

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Sistema de Monitorização Remota e Interface de Operações para um Robô de Minas e Armadilhas

João Álvaro Silva Costa e Sá

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Hélio Mendes de Sousa Mendonça

Coorientador: Doutor Andry Maykol Gomes Pinto

Setembro de 2016

Resumo

Com a evolução no setor da robótica móvel, surgiu a necessidade de se conceber soluções cada vez mais inteligentes e autónomas. Estas visam a execução e/ou assistência de operações cada vez mais diversas, que vão desde o típico transporte de materiais perigosos, à inspeção de condutas e de linhas de caminho de ferro, bem como a monitorização de fronteiras e segurança pública. Neste contexto, esta dissertação visa atualizar e dotar um robô de desmantelamento de explosivos já existente, de mais e melhores funcionalidades. Este, pertencente à brigada especial de minas e armadilhas da GNR atuará em condições e cenários reais.

Através destas atualizações, pretende-se adaptar a plataforma robótica existente através da incorporação de um sistema de manipulação de engenhos explosivos (garra e manipulador), de um sistema de monitorização (câmaras) e de uma interface gráfica que permitirá usufruir do robô em operações remotas.

No âmbito desta dissertação foi concebido e testado um protótipo de uma garra que suprisse as mais comuns necessidades da brigada da GNR na manipulação dos diferentes engenhos explosivos, por eles apresentados. Foi também concebido e testado o protótipo de um manipulador com dois graus de liberdade para efetuar movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e *PITCH*. Um sistema de transmissão de vídeo em tempo-real composto por duas câmaras foi concebido para incorporar no robô. Uma das câmaras permite uma visão ampla do manipulador e da garra, enquanto que a segunda permite uma visão macro da garra. Por fim, foi criada uma aplicação que permite a comunicação do utilizador com o robô, recorrendo a uma rede sem fios encriptada. Esta aplicação é composta por uma interface gráfica, na qual se encontram integradas as imagens obtidas pelo sistema de monitorização remota e que através de um gamepad permite o controlo do gripper e do manipulador. Esta interface permite também definir a velocidade e torque a ser exercido por cada motor, bem como verificar o estado de cada um deles em relação à temperatura e tensão de alimentação.

Todos os desenvolvimentos desta dissertação estão contextualizados e suportados por um projeto do grupo de robótica (CRIIS) do INESC TEC.

Abstract

With the evolution in the mobile robotics industry, emerged the need to conceive more and more intelligent and autonomous solutions. These are responsible for the implementation and/or support of more and more diverse operations, ranging from the typical transportation of hazardous materials, the inspection of pipelines and railway lines as well as the monitoring of borders and public safety. In this context, this dissertation aims to update and equip an existing robot of mines and bombs disposal of more and better features. This, belonging to the Special Brigade of mines and bombs of GNR (police) will operate in real conditions and scenarios.

Through these updates, is intended to adapt the existing robotic platform by incorporating a system of handling explosive devices (gripper and manipulator), a monitoring system (cameras) and a graphical interface that will permit the use of the robot in remote operations.

As part of this dissertation it was designed and tested a prototype of a gripper that met the most common GNR brigade needs in handling different explosive devices, presented by them. It was also designed and tested a prototype of a manipulator with two degrees of freedom to perform movement along the rotation directions of *ROLL* and *PITCH*. A video transmission system in real-time composed by two cameras was conceived to be incorporated into the robot. One of the cameras allows a wide view of the manipulator and the gripper, while the second allows a macro view of the gripper. Finally, it was created an application that permits the communication between the user and the robot, through an encrypted wireless network. This application comprises a GUI, in which are integrated the images obtained by the remote monitoring system and through a gamepad allows the control of the gripper and the manipulator. This interface also allows to set the speed and torque to be exercised by each motor and to check the status of each of them in relation to temperature and supply voltage.

All developments of this dissertation are contextualized and supported by a project of the robotics group (CRIIS) of INESC TEC.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Hélio Mendonça por todas as ideias, orientação e confiança, todas as sugestões e disponibilidade. Foi um privilégio trabalhar com ele no INESC TEC.

Quero agradecer ao meu co-orientador Doutor Andry Pinto por toda a ajuda disponibilizada no decorrer desta dissertação. Ao Professor Doutor António Paulo Moreira por todas as ideias, pela disponibilidade e pelo voto de confiança. Quero agradecer ao Sr. Fernando por apoio técnico. Ao Eng. Carlos, à Flavia, ao Eng. Héber, ao Eng. Luís e restantes colaboradores do INESC TEC pela integração, simpatia e ajuda disponibilizada.

Aos meus colegas e amigos, Ana Barbosa, Cristina Sousa, Fernando Sá, João Correia, João Silva e Ricardo Silva, por todo o apoio e ajuda que me prestaram não só neste semestre, mas também ao longo do curso. Cada um à sua maneira desempenhou um papel crucial, quer na minha formação académica como pessoal.

Os meus agradecimentos à minha família, em especial aos meus pais, António e Rita e aos meus irmãos Daniel e Francisco, por todo o apoio, incentivo, formação e por estarem lá sempre nos bons e nos maus momentos.

Quero agradecer à Box Crossfit Durius, que mais do que um local onde treino diariamente, é uma casa que mantém o meu equilíbrio mental e físico. Ainda que não o saibam, sem eles nada disto seria possível.

João Álvaro Silva Costa e Sá

*“Recomeça...
Se puderes,
Sem angústia e sem pressa.
E os passos que deres,
Nesse caminho duro
Do futuro,
Dá-os em liberdade.
Enquanto não alcances
Não descanses.
De nenhum fruto queiras só metade.”*

Miguel Torga TORGA, M., Diário XIII.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Contexto	2
1.3	Objetivos	2
2	Requisitos de usabilidade e operação	3
2.1	Sistema de manipulação	3
2.1.1	Requisitos funcionais	3
2.1.2	Requisitos não-funcionais	4
2.2	Sistema de monitorização	4
2.2.1	Requisitos funcionais	4
2.2.2	Requisitos não-funcionais	5
2.3	Sistema de comunicações	5
2.3.1	Requisitos funcionais	5
2.3.2	Requisitos não-funcionais	5
2.4	Interface com o utilizador	6
2.4.1	Requisitos funcionais	6
2.4.2	Requisitos não-funcionais	6
3	Revisão Bibliográfica	7
3.1	Conceito de gripper e suas aplicações	7
3.2	Tipos de configuração de grippers	7
3.3	Formas de apreensão de grippers	8
3.4	Grippers de dois dedos	9
3.4.1	Grippers para objetos cilíndricos	10
3.4.2	Grippers de dedos flexíveis	10
3.4.3	Grippers de dedos articulados	11
3.5	Grippers de três dedos	11
3.6	Gripper universal	14
3.7	Grippers para aplicações específicas	16
3.7.1	Grippers magnéticos	16
3.7.2	Grippers por sucção (a vácuo)	16
3.8	Especificações de um gripper	19
3.9	Atuadores	19
3.9.1	Atuadores elétricos	19
3.9.2	Atuadores hidráulicos	20
3.9.3	Atuadores pneumáticos	20
3.9.4	Comparação entre atuadores	21

3.10	Soluções do mercado de grippers	22
3.10.1	ROBOTIQ	22
3.10.2	GIMATIC	24
3.10.3	FESTO	24
3.10.4	BOTNROLL	25
3.11	Robô TALON	28
3.11.1	Modelos comercializados	29
4	Construção de um gripper e de um manipulador	31
4.1	Motores	31
4.2	Configuração	32
4.3	Gripper V1	34
4.3.1	Construção no SolidWorks	35
4.3.2	Impressão e montagem	35
4.3.3	Gripper V1 e manipulador	35
4.3.4	Conclusões e problemas encontrados	38
4.4	Gripper V2	40
4.4.1	Dimensões	40
4.4.2	Rodas dentadas helicoidais e fuso sem fim	40
4.4.3	Servo-motor de abertura e fecho do gripper	43
4.4.4	Rolamentos, casquilhos e veios	44
4.4.5	Resolução do problema 1 - problema da direção de rotação de <i>ROLL</i>	45
4.4.6	Mecanismo de fim de curso mecânico	46
4.4.7	Assemblagem final	46
4.5	Gripper V2 e manipulador	49
4.5.1	Mecanismo para movimento do gripper segundo a direção de rotação de <i>ROLL</i>	49
4.5.2	Mecanismo para movimento do gripper segundo a direção de rotação de <i>PITCH</i>	50
4.5.3	Assemblagem final	52
4.6	Impressão e montagem	52
4.7	Maquinagem de Peças	54
4.7.1	Peça usada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador	54
5	Sistema de monitorização e interface de operações	55
5.1	Arquitetura do Sistema	55
5.1.1	Disposição do sistema	55
5.1.2	Funcionamento do sistema	57
5.2	Atuadores e Controlador	57
5.2.1	Dynamixel RX-24F	57
5.2.2	Dynamixel RX-64	57
5.2.3	Controlador CM-700	58
5.2.4	Programação	58
5.2.5	Controlos de segurança	61
5.2.6	Conclusões e problemas encontrados	61
5.3	Sistema de monitorização	62
5.3.1	MAKO	62
5.3.2	Raspberry Pi NoIR Camera	62
5.4	Raspberry Pi	65

5.4.1	Gateway	65
5.4.2	Router e encriptação das comunicações	65
5.5	Interface com o utilizador	67
5.5.1	Aplicação	68
5.5.2	Gamepad	70
6	Resultados experimentais	71
6.1	Validação da construção e montagem do modelo impresso em plástico	71
6.2	Manipulação de Objetos	72
6.3	Sistema de monitorização	75
6.4	Comunicações	75
6.5	Recuperação do sistema a falhas	76
7	Conclusões e Trabalho Futuro	77
A	Soluções do mercado - ROBOTIQ	79
B	Maquinagem das rodas dentadas e fuso sem fim HPC	81
B.1	Roda dentada helicoidal HPC M0.8-70	81
B.2	Fuso sem fim HPC SW0.8-1	82
B.3	Roda dentada HPC G0.8-30	83
B.4	Roda dentada HPC G0.8-20	85
B.5	Roda dentada HPC G0.8-80	86
C	Especificações mecânicas, elétricas e de controlo dos servo-motores Dynamixel	89
D	Comandos usados para configuração e conexão ao servidor de streaming de vídeo UV4L	91
	Referências	93

Lista de Figuras

3.1	Seis tipos básicos de preensão de uma mão humana. [1].	8
3.2	Preensões internas e externas de diversas garras mecânicas [1].	9
3.3	Grippers de dois dedos de movimento paralelo e de rotação (respectivamente) [2].	9
3.4	Gripper de dois dedos para objetos cilíndricos [2].	10
3.5	Gripper com dedos flexíveis [1].	10
3.6	Gripper de dedos articulados [2].	11
3.7	Gripper de três dedos manipulando objetos de diferentes formas e tamanhos [3].	12
3.8	Gripper de três dedos adaptativo [3].	12
3.9	Gripper de três dedos manipulando objetos de diferentes formas e tamanhos, com a nova disposição [3].	13
3.10	Quatro fases do processo de manipulação por um gripper universal por efeito de Jamming [4].	15
3.11	Três tipos de preensões permitidas por um gripper universal por efeito de Jamming [5].	15
3.12	Gripper universal por efeito de Jamming a manipular diversos objetos de diversas formas e tamanhos [6].	15
3.13	Gripper magnético ROBOTIQ recorrendo a eletroímãs [7].	17
3.14	Gripper magnético IMA recorrendo a ímãs permanentes [8].	17
3.15	Gripper por sucção SCHMALZ manuseando caixas de cartão [9].	18
3.16	Sistema da unidade hidráulica [2].	21
3.17	Gripper 2-FINGER 85 e gripper 2-FINGER 140 ROBOTIQ (respectivamente) [10].	23
3.18	Desenho técnico do Gripper 2-FINGER 85 e gripper 2-FINGER 140 ROBOTIQ (unidades em mm e [in.]) [11].	23
3.19	Gripper 3-FINGER ROBOTIQ [12].	24
3.20	Desenho técnico do Gripper 3-FINGER ROBOTIQ (unidades em mm e [in.]) [13].	24
3.21	Gripper "BotnRoll ROB-11524" com pega aberta [14].	25
3.22	Gripper "BotnRoll ROB-11524" com pega fechada [14].	26
3.23	Desenho técnico do Gripper "BotnRoll ROB-11524" (unidades em mm) [14].	26
3.24	"Garra Bot'n Roll c/ servo"[15].	27
3.25	"Garra Bot'n Roll c/ servo" a manipular um objeto cilíndrico (lata) [15].	27
3.26	Robô TALON utilizado no desarme e manipulação de engenhos explosivos [16].	28
4.1	Três posições possíveis numa garra com dois dedos articulada: abertura máxima, abertura intermédia e pega fechada.	33
4.2	Manipulação de caixas: aproximação na posição abertura máxima, ajuste ao tamanho da caixa e por fim preensão da caixa.	33
4.3	Manipulação de objetos cilíndricos: aproximação na posição abertura intermédia e por fim preensão do objeto.	34

4.4	Manipulação de uma mochila: aproximação na posição abertura intermédia e por fim pega fechada.	34
4.5	Peças desenhadas em SolidWorks na construção do gripper: uma pinça, dois tipos de haste e de um suporte para a pinça.	36
4.6	Peças desenhadas em SolidWorks na construção do gripper: estrutura base. . . .	36
4.7	Peças desenhadas em SolidWorks na construção do gripper: roda helicoidal e fuso sem fim.	36
4.8	Modelo em SolidWorks da primeira versão do protótipo do gripper, pós montagem.	37
4.9	Primeira versão do protótipo do gripper pós impressão e montagem.	37
4.10	Acoplação do fuso sem fim ao servo-motor Dynamixel AX-12, para abertura e fecho da garra na versão impressa.	38
4.11	Estrutura do servo-motor Dynamixel AX-12 responsável pela abertura e fecho do gripper aparafusada à estrutura base deste.	38
4.12	Servo-motores Dynamixel AX-12 responsáveis pela abertura e fecho do gripper e pelos movimentos segundo as direções de rotação de <i>ROLL</i> e de <i>PITCH</i>	39
4.13	Desalinhamento entre eixo de rotação do motor responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de <i>ROLL</i> (tracejado a vermelho) e o eixo de rotação do gripper (tracejado a azul).	40
4.14	Fuso sem fim SW0.8-1 e as duas rodas dentadas helicoidais M0.8-70 encomendadas. .	41
4.15	Alterações feitas nas rodas dentadas helicoidais HPC M0.8-70 em SolidWorks. . .	42
4.16	Alterações feitas ao fuso HPC SW0.8-1 em SolidWorks.	42
4.17	Chumaceira desenhada em SolidWorks para rolamento SKF HK 0810.	42
4.18	Base do gripper desenhada em SolidWorks.	43
4.19	Assemblagem das rodas helicoidais à base do gripper e do fuso sem fim aos rolamentos SKF HK 0810 suportados pelas chumaceiras projetadas (visão de cima, frontal e lateral).	43
4.20	Servo-motor de abertura e fecho fixo no interior da base do gripper e a fazer transmissão por meio de duas rodas dentadas ao fuso sem fim.	44
4.21	Veio fixo ao servo-motor a rodar num rolamento cravado na base do gripper, por forma a que o servo-motor gire sempre em torno do mesmo eixo.	44
4.22	Desenho em SolidWorks de um casquilho auto lubrificado da Igus tipo F 0608 utilizado no projeto.	45
4.23	Desenho em SolidWorks de uma das peças do gripper onde foram utilizados casquilhos auto lubrificados da Igus.	45
4.24	Veio (a azul) aparafusado à base do gripper que permite resolver o problema do movimento segundo a direção de rotação de <i>ROLL</i> supracitado em 4.3.4.	46
4.25	Fim de curso mecânico limitando a abertura do gripper.	47
4.26	Fim de curso mecânico limitando o fecho do gripper.	47
4.27	Montagem final do gripper V2 em SolidWorks.	48
4.28	Montagem final do gripper V2 em SolidWorks (vista lateral).	48
4.29	Mecanismo utilizado para dotar o gripper segundo a direção de rotação de <i>ROLL</i> . .	49
4.30	Peça usada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador.	50
4.31	Mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento segundo a direção de rotação de <i>ROLL</i> , em funcionamento.	50
4.32	Mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento de <i>PITCH</i> (vista lateral e traseira).	50

4.33	Mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento de <i>PITCH</i> (vista pormenorizada).	51
4.34	Peça que permite o acoplamento entre o manipulador e o braço extensível do robô da GNR (vista de cima).	52
4.35	Montagem final do gripper e manipulador V2 em SolidWorks.	52
4.36	Peça que permite a acoplação do gripper e manipulador V2 impresso ao manipulador da ABB (em SolidWorks).	53
4.37	Resultado final do protótipo V2 impresso, montado e acoplado ao manipulador da ABB.	53
4.38	Gripper, mecanismo responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de <i>ROLL</i> e segundo a direção de rotação de <i>PITCH</i> , respetivamente, ao pormenor.	54
4.39	Peça usada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador, referente à figura 4.30, maquinada em alumínio.	54
5.1	Sistema de monitorização remota e interface de operações.	56
5.2	Servo-motor Dynamixel RX-24F[17].	58
5.3	Servo-motor Dynamixel RX-64[17].	58
5.4	Controlador e sub-board Dynamixel CM-700[17].	59
5.5	Conversor USB porta-série Dynamixel LN-101[17].	59
5.6	Raspberry Pi NoIR Camera v1.3 que permite obter uma visão macro do gripper[18].	63
5.7	Ligação da câmara Raspberry Pi NoIR Camera v1.3 ao RPi[18].	63
5.8	Servidor de vídeo UV4L com as diversas soluções/serviços para streaming.	64
5.9	Controlos e configurações que o servidor UV4L, através do serviço "Control Panel" permite exercer sobre os dispositivos de captura de vídeo.	64
5.10	Router TP-LINK AC1200 Archer C50[19].	66
5.11	Reserva de um endereço IP estático, atribuído pelo servidor DHCP, em função do endereço MAC do RPi.	67
5.12	Controlo de acessos à rede sem fios encriptada recorrendo aos endereços MAC.	67
5.13	Interface da aplicação que permite o controlo do gripper e manipulador e a visualização da câmara do Raspberry Pi.	68
5.14	Interface da aplicação que permite o configurar o torque e a velocidade de cada servo-motor do gripper e manipulador.	69
5.15	Interface da aplicação que permite fazer leituras da temperatura e da tensão de alimentação de cada servo-motor do gripper e manipulador.	69
5.16	Gamepad sem fios Logitech F710[20].	70
6.1	Testes efetuados ao mecanismo de abertura e fecho do gripper.	72
6.2	Testes efetuados aos mecanismos responsáveis pelos movimentos segundo as direções de rotação de <i>ROLL</i> e de <i>PITCH</i> .	72
6.3	Mesa de testes composta pelo protótipo do gripper e protótipo do manipulador, Raspberry Pi NoIR Camera Rev1.3, controlador CM-700, RPi, PC e o gamepad sem fios Logitech F710.	73
6.4	Testes à manipulação de um objeto retangular.	73
6.5	Testes à manipulação de um objeto cilíndrico.	74
6.6	Testes à manipulação de uma mochila.	74
6.7	Streaming da câmara Raspberry Pi NoIR Rev1.3 na GUI da aplicação desenvolvida.	75
6.8	Resultado dos testes à latência e perda de pacotes entre o PC e o Raspberry Pi.	76
B.1	Roda dentada helicoidal HPC M0.8-70 original.	81

B.2	Roda dentada helicoidal HPC M0.8-70 pós-maquinagem em SolidWorks.	82
B.3	Fuso sem fim HPC SW0.8-1 original.	83
B.4	Fuso sem fim HPC SW0.8-1 pós-maquinagem em SolidWorks.	83
B.5	Roda dentada HPC G0.8-30 original.	84
B.6	Roda dentada HPC G0.8-30(1) pós-maquinagem em SolidWorks.	84
B.7	Roda dentada HPC G0.8-30(2) pós-maquinagem em SolidWorks.	85
B.8	Roda dentada HPC G0.8-30(3) pós-maquinagem em SolidWorks.	85
B.9	Roda dentada HPC G0.8-20 original.	86
B.10	Roda dentada HPC G0.8-20 pós-maquinagem em SolidWorks.	86
B.11	Roda dentada HPC G0.8-80 original.	87
B.12	Roda dentada HPC G0.8-80 pós-maquinagem em SolidWorks.	87

Lista de Tabelas

3.1	5 Vantagens e desvantagens dos grippers magnéticos[7].	18
3.2	5 Vantagens e desvantagens dos grippers por sucção[21].	18
A.1	Especificações mecânicas grippers 2-FINGER 85 e 2-FINGER 140 ROBOTIQ [11].	79
A.2	Especificações elétricas grippers 2-FINGER 85 e 2-FINGER 140 ROBOTIQ [11].	79
A.3	Especificações de controlo grippers 2-FINGER 85 e 2-FINGER 140 ROBOTIQ [11].	79
A.4	Especificações mecânicas gripper 3-FINGER ROBOTIQ [13].	80
A.5	Especificações elétricas gripper 3-FINGER ROBOTIQ [13].	80
A.6	Especificações de controlo gripper 3-FINGER ROBOTIQ [13].	80
C.1	Especificações mecânicas, elétricas e de controlo do servo-motor Dynamixel RX-24F[22].	89
C.2	Especificações mecânicas, elétricas e de controlo do servo-motor Dynamixel RX-64[23].	90

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CAD	Desenho assistido por computador (do inglês: computer aided design)
CCW	Counterclockwise (sentido contrário aos ponteiros do relógio)
CRIIS	Centro de Robótica Industrial e Sistemas Inteligentes
CW	Clockwise (sentido dos ponteiros do relógio)
DC	Discrete current (corrente contínua)
EUA	Estados Unidos da América
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
fps	frames por segundo
p	pixel
PCB	Printed circuit board (Placa de circuito impresso)
GNR	Guarda Nacional Republicana
GUI	Graphical user interface (Interface gráfica do utilizador)
IDE	Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
INESC TEC	INstituto de Engenharia de Sistemas e Computadores - Tecnologia e Ciência
MIEEC	Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
RPI	Raspberry Pi

Lista de símbolos

V	volt
mm	milímetro
m	metro
N	newton
g	grama
kg	quilograma
s	segundo
A	ampere
W	watt
in.	inches (polegadas)
3D	3 dimensões
°C	graus celsius
°	graus
€	euro

Capítulo 1

Introdução

Este documento ilustra o desenvolvimento de uma Dissertação do MIEEC: "Sistema de monitorização remota e interface de operações para um robô de minas e armadilhas", que se encontra contextualizada e suportada por um projeto do grupo de robótica (CRIIS) do INESC TEC. Neste será ilustrado todo o trabalho teórico e prático que foi realizado no âmbito deste projeto, cujo principal objetivo é atualizar e dotar um robô de desmantelamento de explosivos pertencente à brigada especial de minas e armadilhas da GNR de mais e melhores funcionalidades. Através destas atualizações, pretende-se adaptar a plataforma robótica existente através da incorporação de um sistema de manipulação de engenhos explosivos (garra e manipulador), de um sistema de monitorização (câmaras) e de uma interface gráfica que permitirá usufruir do robô em operações remotas.

Neste primeiro capítulo é descrita a motivação, o contexto e os objetivos desta dissertação.

1.1 Motivação

Atualmente existe uma plataforma robótica pertencente à brigada especial de minas e armadilhas da GNR que opera em condições e cenários reais no desarme de engenhos explosivos. Derivado da sua idade, esta plataforma apresenta uma grande carência de atualizações, ao nível de funcionalidades, no sentido de colmatar as necessidades da brigada durante as operações.

Trata-se de um robô de lagartas com dois motores alimentados a 24V, que possui um braço basculante extensível até a um máximo de 2m. Este pode ser controlado via rádio ou através de um cabo extensível até 100m conectado a uma consola. Através desta consola, é efetuado o controlo dos motores responsáveis pela locomoção do robô, pela extensão do braço e orientação deste, bem como o disparo de uma caçadeira e dos canhões de água, usados na detonação dos dispositivos.

Para melhor entender estas necessidades, é importante perceber de uma forma geral o procedimento de operações da brigada. Inicialmente o local é inspecionado, o engenho é avaliado e é analisado o risco de desarme no local. Caso seja possível desativar o engenho, este é desmantelado manualmente. Caso não seja possível desativar no local, este é transportado para um local seguro onde o desarme é feito por detonação.

Atualmente o robô apenas é usado neste último cenário, permitindo a detonação dos engenhos através do disparo/explosão em ambientes controlados. Dado que a grande parte do procedimento (inspeção do local, avaliação do engenho e desmantelamento) é feito manualmente recorrendo a um agente da brigada da GNR equipado com um fato próprio e um kit de garra manual, temos um risco humano acrescido à operação. Este risco poderia ser minimizado com a atualização de certas funcionalidades no robô. Existe então uma necessidade clara ao nível da manipulação, de forma remota, dos engenhos explosivos.

1.2 Contexto

Com a evolução no setor da robótica móvel, surgiu a necessidade de se conceber soluções cada vez mais inteligentes e autónomas. Estas visam a execução e/ou assistência de operações cada vez mais diversas, que vão desde o típico transporte de materiais perigosos, à inspeção de condutas e de linhas de caminho de ferro, bem como a monitorização de fronteiras e segurança pública. Neste contexto, esta dissertação visa atualizar e dotar um robô de desmantelamento de explosivos já existente, de mais e melhores funcionalidades. Este, pertencente à brigada especial de minas e armadilhas da GNR atuará em condições e cenários reais.

1.3 Objetivos

O objetivo deste projeto é atualizar e dotar o robô pertencente à brigada especial de minas e armadilhas da GNR de mais e melhores funcionalidades. Através destas atualizações, pretende-se adaptar a estrutura robótica existente com a incorporação de um sistema de manipulação de engenhos explosivos (garra e manipulador), de um sistema de monitorização (câmaras) e de uma interface gráfica que permitirá usufruir do robô em operações remotas. Este sistema será totalmente independente em relação ao sistema atual, que permite a locomoção do robô, extensão do braço e o disparo de uma caçadeira e dos canhões de água.

No âmbito desta dissertação foi concebido e testado um protótipo de uma garra que suprisse as mais comuns necessidades da brigada da GNR na manipulação dos diferentes engenhos explosivos, por eles apresentados. Foi também concebido e testado o protótipo de um manipulador com dois graus de liberdade para efetuar movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e *PITCH*. Um sistema de transmissão de vídeo em tempo-real composto por duas câmaras foi concebido para ser incorporado no robô. Uma das câmaras permite uma visão ampla do manipulador e da garra, enquanto que a segunda permite uma visão macro da garra. Por fim, foi criada uma aplicação que permite a comunicação do utilizador com o robô, recorrendo a uma rede sem fios encriptada. Esta aplicação é composta por uma interface gráfica, na qual se encontram integradas as imagens obtidas pelo sistema de monitorização remota e que através de um gamepad permite o controlo do gripper e do manipulador. Esta interface permite também definir a velocidade e torque a ser exercido por cada motor, bem como verificar o estado de cada um deles em relação à temperatura e tensão de alimentação.

Capítulo 2

Requisitos de usabilidade e operação

Neste capítulo apresenta-se um levantamento de requisitos que foi elaborado junto do responsável da brigada especial de minas e armadilhas da GNR. Este levantamento, datado de 17/02/2016, foi elaborado no âmbito de um simulacro de uma operação de desmantelamento de um explosivo no aeródromo da Maia. Este consistiu na recriação de um cenário real no qual este explosivo, do tipo "caseiro", encontrava-se no interior de uma aeronave. Este foi inspecionado e retirado desta por um elemento da brigada através de um kit de garra manual. No final, foi simulado o desarme de um outro explosivo por detonação.

O robô não foi utilizado durante as operações de desmantelamento por detonação devido às más condições climáticas que se faziam sentir. No entanto, deu para perceber as necessidades urgentes da brigada, que não tendo um kit de garra no robô, precisavam de fazer esta primeira abordagem manualmente, criando um perigo de vida humana acrescido à operação. Mesmo durante a operação de detonação, em que usavam o robô para disparar uma caçadeira ou os canhões de água, derivado do facto de não terem câmaras no braço extensível, esta operação era difícil e um tanto imprecisa.

Os requisitos foram numerados e agrupados funcionalmente. Foram divididos em quatro sub-capítulos: sistema de manipulação, sistema de monitorização, sistema de comunicações e interface com o utilizador. O primeiro compreende os requisitos relacionados com o gripper e o manipulador. O segundo abarca os requisitos relacionados com as câmaras de vídeo. O terceiro compreende os requisitos referentes às comunicações entre a interface com o utilizador e o sistema de manipulação e monitorização. O quarto e último, trata os requisitos levantados face à aplicação e à interação do utilizador com o sistema.

2.1 Sistema de manipulação

2.1.1 Requisitos funcionais

1. Como movimentos expectáveis e necessários para a garra mecânica foram requeridos movimentos nas direções de rotação de *ROLL* de 180° e de *PITCH* de 180°.

2. A garra e respetivo manipulador expecta-se que sejam removíveis, podendo ser alternada a sua utilização com a utilização dos canhões de água.
3. O gripper e o manipulador deverão ser capazes de manipular diferentes engenhos explosivos (de construção caseira e militar), que não excedam os 5kg de peso.
4. A força de preensão exercido pelo gripper expecta-se que seja ajustável.
5. A velocidade na manipulação e na abertura e fecho da garra expecta-se configurável.
6. O alcance do gripper juntamente com o manipulador e com o braço extensível (volume útil) foi definido de aproximadamente 2 metros.

O objetivo do requisito funcional 2 é separar a fase de manipulação do engenho e possível desarme, da fase em que caso não haja alternativa, este é desarmado por detonação. O local de colocação destes no robô encontra-se já definido. Este apresenta-se como um cilindro oco cujo diâmetro interno é de 31.6mm.

No seguimento do requisito funcional 3, os engenhos explosivos a manipular foram descritos como objetos cujo o tipo e forma variam. Estes, podem ser pequenas caixas de cartão, bem como mochilas ou objetos cilíndricos. As dimensões das caixas não deverão exceder em altura, em comprimento e/ou em largura os 120mm. No caso dos objetos cilíndricos, o diâmetro destes não deverão ultrapassar também os 120mm. Estes objetos cilíndricos são maioritariamente munições/sub-munições, espoletas e material pirotécnico como: petardos, balonas e foguetes. Como peso máximo destes, foi definido 5kg.

A força de preensão exercida pelo gripper (requisito funcional 4) deverá ser ajustável pois poderá ser necessário pegar em morteiros (rígidos) como em petardos (mais frágeis). Desta forma, o torque exercido pelo motor responsável pelo fecho do gripper deverá ser configurável.

A velocidade na manipulação e na abertura e fecho da garra (requisito funcional 5) deverá ser configurável. Ainda que ajustável, dado tratarem-se de operações de manipulação lentas que requerem bastante tempo, a velocidade não foi definida como um requisito crucial.

2.1.2 Requisitos não-funcionais

1. A garra deverá ser robusta, podendo ser utilizada em situações urbanas e dentro de habitações, bem como cenários de chuva, terra e pó (cenários ao ar livre).
2. O manuseamento deverá ser estável por se tratar de material sensível e perigoso.

2.2 Sistema de monitorização

2.2.1 Requisitos funcionais

1. Foi requerida uma câmara de vídeo colocada sobre o braço do robô.

2. Expecta-se que a câmara tenha uma proteção mecânica (invólucro) resistente a estilhaços.
3. Expecta-se que o sistema de monitorização efetue streaming em tempo-real.

Em relação ao sistema de monitorização, foi requerida uma câmara colocada sobre o braço, que permitisse uma visão ampla do manipulador e da garra. Esta deverá ficar disponível no robô tanto para a manipulação dos engenhos explosivos, como na detonação dos mesmos.

Ainda que requerida uma câmara, foi sugerida uma segunda que permitisse uma visão macro do gripper. Esta, é apenas necessária durante a fase de manipulação.

2.2.2 Requisitos não-funcionais

1. O sistema de monitorização deverá ser robusto, podendo ser utilizado, tal como o sistema de manipulação, em situações urbanas e dentro de habitações, bem como cenários de chuva, terra e pó (cenários ao ar livre).
2. Expecta-se que o sistema de monitorização seja independente do atualmente implementado na plataforma robótica.

2.3 Sistema de comunicações

2.3.1 Requisitos funcionais

1. As comunicações deverão ser sem fios.
2. As comunicações deverão ser encriptadas.
3. A rede criada deve conter um controlo de acessos ao meio.
4. Expecta-se que o alcance mínimo em "campo aberto" destas seja aproximadamente 100m.

2.3.2 Requisitos não-funcionais

1. O sistema de comunicações deverá ser robusto, podendo ser utilizado, tal como o sistema de manipulação e monitorização, em situações urbanas e dentro de habitações, bem como cenários de chuva, terra e pó (cenários ao ar livre).
2. O sistema de comunicações deve ser seguro e protegido face ao acesso não autorizado.
3. Expecta-se que o sistema de comunicações seja independente do atualmente implementado na plataforma robótica.

2.4 Interface com o utilizador

2.4.1 Requisitos funcionais

1. A interface deverá permitir a manipulação de forma remota do gripper (abertura e fecho) e exercer os movimentos expectáveis do manipulador segundo as direções de rotação de *ROLL* e *PITCH* já definidas, através de um joystick ou de um gamepad.
2. Esta deverá também fornecer o streaming em tempo-real do sistema de monitorização.
3. A interface deverá prover o utilizador de definir a velocidade e torque de cada motor (dentro das limitações destes).
4. Esta deverá permitir a leitura do estado (temperatura e tensão de alimentação) de cada um dos motores.

2.4.2 Requisitos não-funcionais

1. A interface e o sistema será totalmente independente do sistema atual, que permite a locomoção do robô, extensão do braço e o disparo de uma caçadeira e dos canhões de água.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é ilustrada uma revisão bibliográfica no âmbito de grippers e atuadores. Neste é abordado o conceito de gripper e suas aplicações. São apresentados os diferentes tipos de configurações e formas de preensão destes, bem como abordados os grippers de dois, três dedos e para aplicações especiais. Por fim são ilustrados os diferentes tipos de atuadores e apresentada uma breve pesquisa das soluções que o mercado atualmente apresenta. Neste capítulo é também abordada uma solução de robótica militar, o robô TALON, apresentada pela empresa líder mundial no fornecimento de material militar robótico, QinetiQ.

3.1 Conceito de gripper e suas aplicações

O conceito de gripper ou garra mecânica está intrinsecamente ligado à manipulação de objetos. Os grippers são constituídos por dedos ou pinças mecânicas capazes de em conjunto executar uma série de tarefas diferentes, manuseando objetos de diferentes formas, dimensões, pesos, rigidez e tipos de material. Estas tarefas vão desde o auxílio de operadores fabris no desempenho das suas funções, a operações de seleção e retiro de peças defeituosas num tapete de uma linha de montagem, entre outros.

3.2 Tipos de configuração de grippers

Os grippers podem apresentar diferentes configurações em função das tarefas que desempenham. Em [24], SALISBURY e CRAIG (1982) estudaram 600 diferentes configurações e chegaram à conclusão que em termos cinemáticos a configuração em forma de mão humana (5 dedos) é a que apresenta maior versatilidade no manuseamento dos mais diversos objetos, derivado do seu elevado número de graus de liberdade. Esta configuração é também a que permite uma preensão mais cuidada, sendo possível exercer apenas a força necessária aquando o transporte e manipulação de objetos, tornando-se particularmente útil quando estes são frágeis.

Comparando o número de dedos, e segundo MATSUOKA (1995) [25], uma garra mecânica com uma configuração de quatro dedos consegue manipular cerca de 99% dos objetos que uma de

5 dedos ou em forma de mão humana consegue. Segundo [1], um gripper com três dedos pode manipular 90% de todos objetos, enquanto que um com dois dedos pode manusear aproximadamente 40%.

Embora cinematicamente uma garra mecânica com a configuração de mão humana possua a maior versatilidade no manuseamento dos mais variados objetos, industrialmente uma configuração mais simples de dois ou três dedos é geralmente suficiente e preferível. Esta escolha resulta essencialmente da elevada complexidade de construção e controlo desta. Esta exige também um elevado número de sensores de forma a permitir uma manipulação eficiente e possibilitar um planeamento de trajetórias. A nível industrial, em que o modelo do objeto é conhecido, é então utilizada em grande escala grippers com dois dedos, que combatem a sua falta de versatilidade de manipulação e/ou destreza com uma modelação e programação de elevada precisão. Em ambientes desconhecidos, é mais complicado usar uma garra com tão poucos graus de liberdade.

3.3 Formas de preensão de grippers

Quando se projeta uma garra mecânica, além da configuração desta, é igualmente importante definir a forma e estabilidade de preensão, a força necessária a ser exercida pelo gripper, a velocidade e aceleração do manipulador, em função do objeto a manusear.

Na figura 3.1 estão representados os tipos básicos de preensão de diferentes objetos. Estes são denominados por: cilíndrico, ponta de dedo, gancho, palmar, esférico e lateral [1].

Na figura 3.2 estão representados vários tipos de preensões internas e externas de diversas garras mecânicas [1].

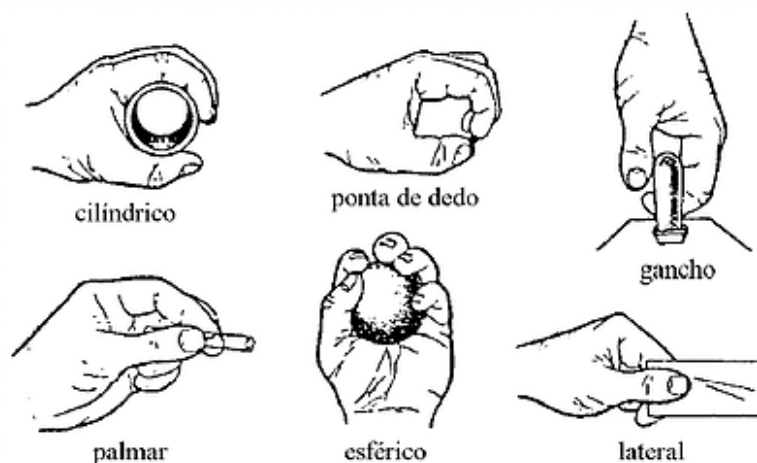


Figura 3.1: Seis tipos básicos de preensão de uma mão humana. [1].

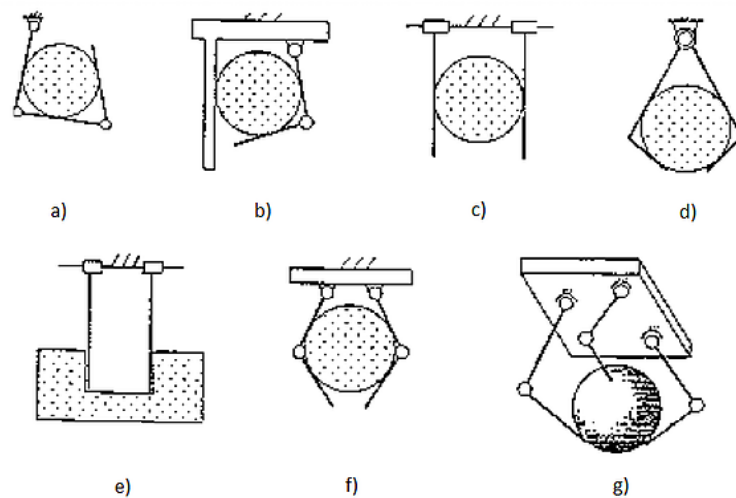


Figura 3.2: Prensões internas e externas de diversas garras mecânicas [1].

3.4 Grippers de dois dedos

Como supracitado em 3.2, embora cinematicamente uma garra mecânica com a configuração de mão humana possua a maior versatilidade no manuseamento dos mais variados objetos, industrialmente uma configuração mais simples de dois ou três dedos é geralmente suficiente e preferível.

A configuração de dois dedos é a mais utilizada pela sua simplicidade e surge sob diferentes formas de acordo com os objetos a manipular. Pode apresentar dois tipos de movimentos como é possível ver na figura 3.3: paralelo ou de rotação. Como desvantagens tem o facto de proporcionar pouca versatilidade na manipulação de certos objetos que excedam a abertura máxima dos seus dedos [2].

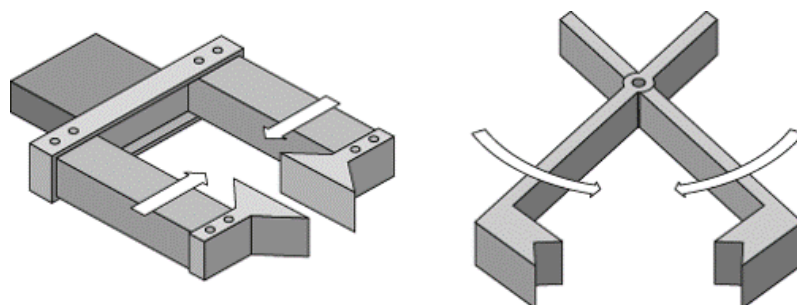


Figura 3.3: Grippers de dois dedos de movimento paralelo e de rotação (respetivamente) [2].

3.4.1 Grippers para objetos cilíndricos

Partindo da necessidade de se manipular objetos cilíndricos de forma eficiente, foram introduzidos semi-círculos de diferentes tamanhos nos dedos, possibilitando manipular objetos de diferentes diâmetros. Na figura 3.4 encontra-se representado um gripper de dois dedos para objetos cilíndricos.

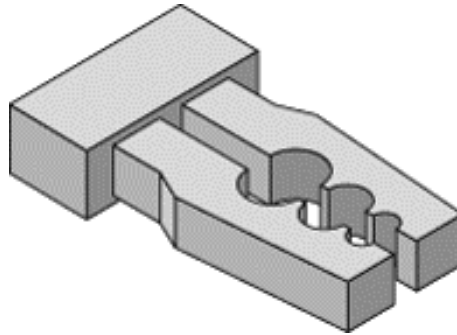


Figura 3.4: Gripper de dois dedos para objetos cilíndricos [2].

3.4.2 Grippers de dedos flexíveis

Derivado da vasta diversidade de objetos a manipular, não só a forma ou peso, mas também a fragilidade destes tem uma influência direta na concepção de garras mecânicas. Surgiram então grippers próprios para exercer um determinado grau de força na manipulação do objeto, de forma a não o danificar. Estas garras mecânicas apresentadas na figura 3.5 são constituídas por dois dedos flexíveis que se curvam para dentro, permitindo um ajuste mais suave à peça a manipular. A força exercida é controlada por um compressor de ar comprimido ou sob a pressão interna de algum fluido.

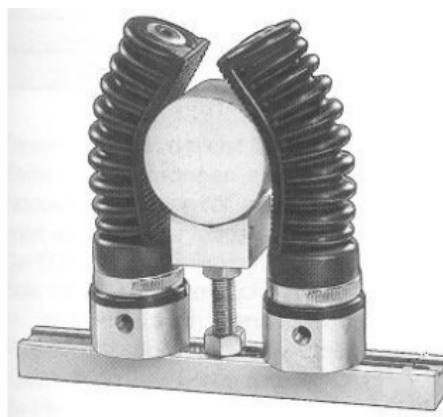


Figura 3.5: Gripper com dedos flexíveis [1].

3.4.3 Grippers de dedos articulados

Inspirada na mão humana, surgiram garras mecânicas de dois dedos articuladas. A principal característica destas é ter vários elos que permitem uma maior versatilidade na manipulação de objetos irregulares e de diferentes tamanhos. Estas articulações/elos são controladas por músculos artificiais ou cabos. Cada elo é movimentado por um par de cabos: um cabo flexiona a articulação enquanto que o outro a estende. Na figura 3.6 encontra-se representado um gripper de dois dedos articulados.

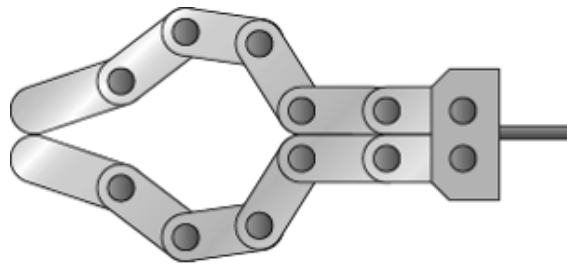


Figura 3.6: Gripper de dedos articulados [2].

3.5 Grippers de três dedos

Representam um upgrade na configuração de dois dedos. Aumentam a complexidade do sistema, mas permitem manusear objetos de diferentes tamanhos e formas (circular, triangular e irregular) com maior firmeza. Os dedos podem ser articulados e formados por diversos elos. Um exemplo destas está presente na figura 3.7.

Neste tipo de garras é comum que existam mecanismos para alteração da disposição dos dedos, permitindo um manuseamento ainda mais preciso. Esta nova disposição pode ser vista na figura 3.8. É também possível ver na figura 3.9 exemplos de objetos a serem manuseados por um gripper de três dedos adaptativo com a nova disposição.

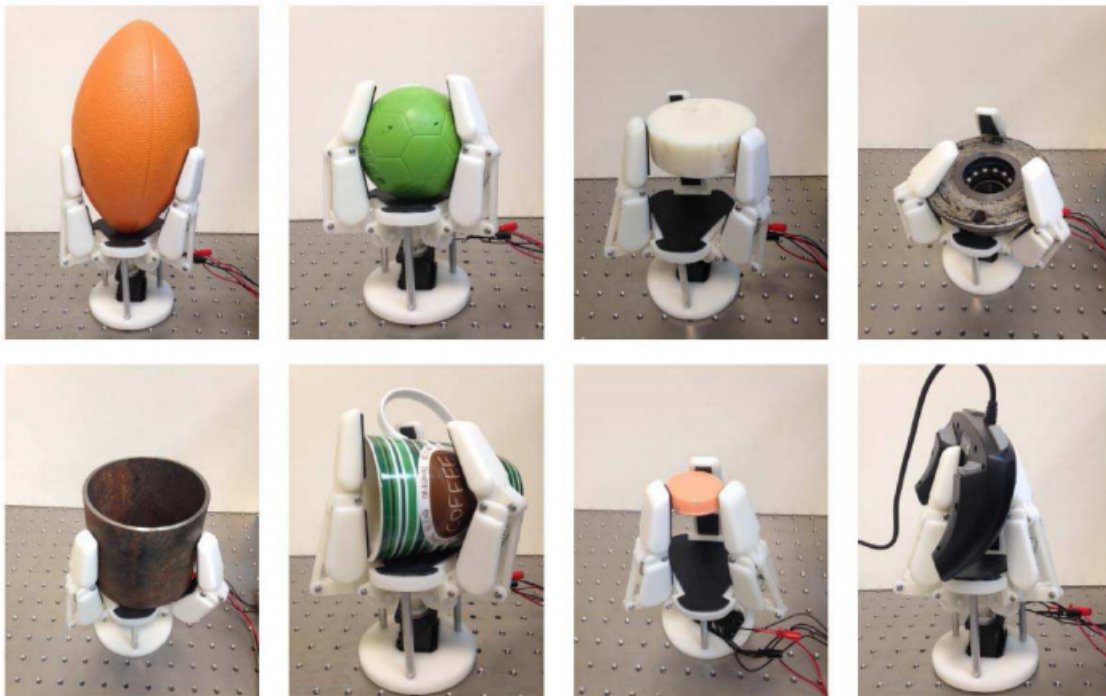


Figura 3.7: Gripper de três dedos manipulando objetos de diferentes formas e tamanhos [3].

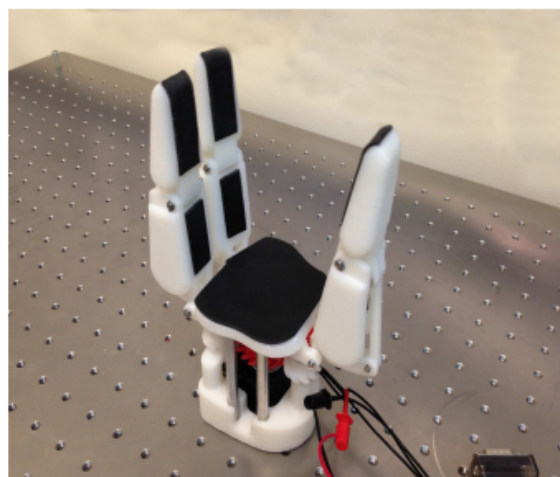


Figura 3.8: Gripper de três dedos adaptativo [3].

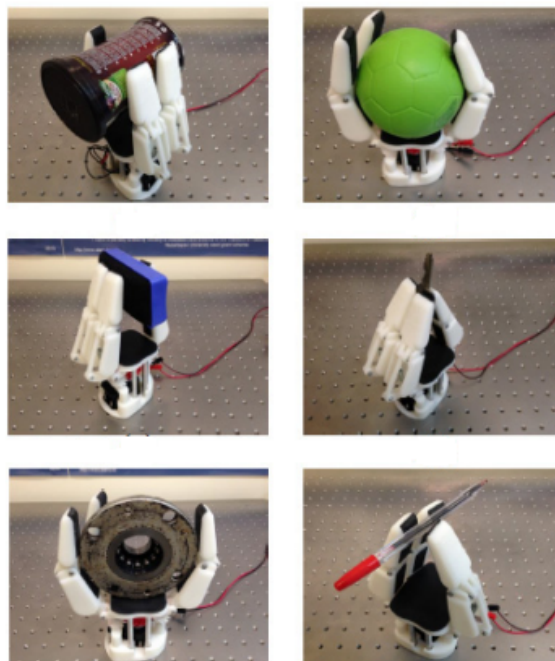


Figura 3.9: Gripper de três dedos manipulando objetos de diferentes formas e tamanhos, com a nova disposição [3].

3.6 Gripper universal

Um gripper universal traduz-se como sendo um gripper capaz de manusear objetos aleatórios e de modelos desconhecidos de forma eficiente e segura.

Como supracitado em 3.2: “em termos cinemáticos a configuração em forma de mão humana (5 dedos) é a que apresenta maior versatilidade no manuseamento dos mais diversos objetos, derivado do seu elevado número de graus de liberdade.”. Embora academicamente faça bastante sentido ser estudada, a nível industrial é uma solução bastante cara e inviável. A elevada complexidade de construção e controlo desta, aliado à exigência de um elevado número de motores e de sensores, levou a que se procurassem outras soluções fora do espectro antropomórfico. Foi então que em 2010, investigadores da Universidade de Cornell (EUA), da Universidade de Chicago (EUA) e da iRobot Corporation descobriram um novo tipo de gripper universal que se apresenta como sendo das soluções mais inovadoras até à data. Este, recorrendo a um simples balão de latex, grãos de café moído, uma bomba para criar vácuo e utilizando o fenómeno de Jamming consegue facilmente moldar-se ao objeto em questão, permitindo uma manipulação segura e eficiente.

O fenómeno de Jamming encontra-se presente no nosso dia a dia. Os pacotes de café moído embalados a vácuo são um exemplo deste fenómeno. Quando fechados a vácuo a sua rigidez é bastante elevada, até que o pacote é aberto. Segundo Hod Lipson, professor da Universidade de Cornell e parte integrante no desenvolvimento do projeto, “Os grãos de café são como conjuntos de pequenas engrenagens. Quando não estão compactados, eles conseguem rolar uns sobre os outros e fluírem. Quando eles estão compactados ainda que pouco, eles interligam-se, bloqueiam e tornam-se sólidos” [26]. Este fenómeno permite aos materiais granulados comportarem-se tanto como um sólido como um líquido.

Na prática este processo é separado em quatro etapas. Inicialmente o gripper é aproximado do objeto a manipular com a bomba de vácuo desligada. De seguida, este é pressionado contra o objeto, deformando-se em torno dele. Numa terceira fase, o ar é evacuado recorrendo à bomba de criação de vácuo. O fenómeno de Jamming é então criado e por fim, o objeto pode ser manipulado. As quatro fases encontram-se representadas na figura 3.10 [4].

Diferentes objetos requerem diferentes tipos de preensões. Um gripper universal por efeito de Jamming permite exercer três tipos de preensões: por atrito estático da superfície de contacto, por restrições geométricas de encravamento e pela criação de vácuo entre a peça e o gripper. Estes três tipos encontram-se representados na figura 3.11 [5] pela ordem apresentada, da esquerda para a direita. Na figura 3.12 é possível ver o gripper a manipular diversos objetos de diversas formas e tamanhos [6].

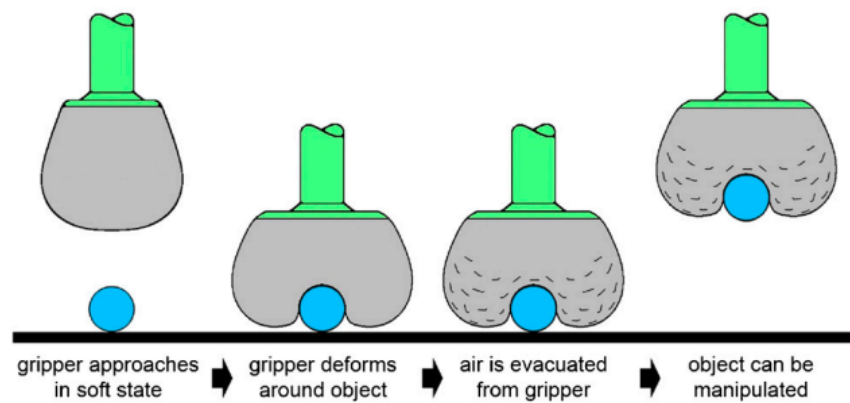


Figura 3.10: Quatro fases do processo de manipulação por um gripper universal por efeito de Jamming [4].

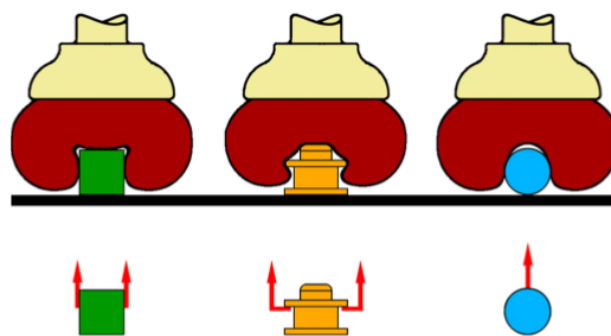


Figura 3.11: Três tipos de preensões permitidas por um gripper universal por efeito de Jamming [5].

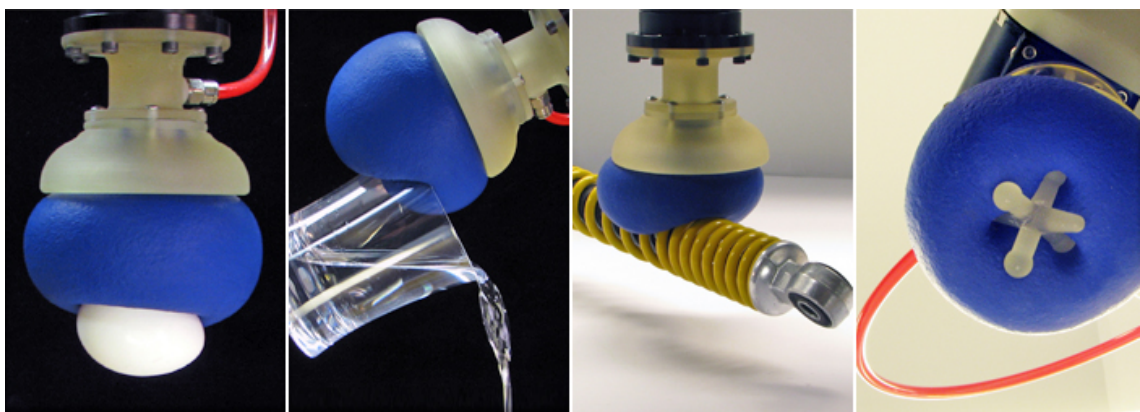


Figura 3.12: Gripper universal por efeito de Jamming a manipular diversos objetos de diversas formas e tamanhos [6].

3.7 Grippers para aplicações específicas

Para além de grippers de dois e três dedos, existem grippers que são concebidos para aplicações especiais. Estas aplicações recorrem a outras soluções de grippers que incluem ou não o uso de dedos ou pinças mecânicas, aliados a outros mecanismos. Destas destacam-se as garras magnéticas e as garras de sucção (a vácuo). A título de curiosidade, existem grippers de fitas adesivas utilizadas para manipulação de materiais têxteis e/ou leves. Existem também grippers por agulhas, usados para aplicações em que o material possa ser picado e/ou perfurado como é o caso de têxteis, plásticos e borrachas.

3.7.1 Grippers magnéticos

Os grippers magnéticos são geralmente utilizados na manipulação de materiais ferromagnéticos. Estes, através da criação de um campo magnético permitem manusear objetos de diversas dimensões e até formas irregulares de forma bastante eficiente. Os materiais a manipular podem tanto ser chapas metálicas ou tubos metálicos de dimensões e formatos conhecidos como materiais de dimensões e formatos aleatórios.

Este campo magnético é criado através do uso de eletroímãs ou ímãs permanentes. Estes primeiros são geralmente alimentados por uma fonte DC e são facilmente controlados dado que basta deixar de fornecer corrente e este deixa de exercer uma força magnética. Um exemplo destes encontra-se presente na figura 3.13. Por outro lado, os grippers magnéticos de ímãs permanentes não precisam de corrente para funcionarem, apresentando assim uma solução mais segura, visto que em caso de falta de fornecimento de energia estes continuam a funcionar. Neste caso, para desconectar o gripper da peça a manipular é usada uma alavanca que separa o objeto da superfície de contacto do gripper. Um exemplo deste tipo de gripper magnético e do seu mecanismo encontra-se presente na figura 3.14.

Este tipo de grippers apresentam (como todos os outros) vantagens e desvantagens. Ainda que muito utilizados no manuseamento de materiais ferromagnéticos, nem sempre serão a melhor escolha. Na tabela 3.1 estão presentes as 5 principais vantagens e desvantagens [7].

3.7.2 Grippers por sucção (a vácuo)

Os grippers por sucção utilizam ventosas e uma bomba de ar comprimido para criar vácuo e desta forma manusear objetos de superfície lisas como chapas metálicas, vidros, caixas de cartão e chapas metálicas. São particularmente utilizados na indústria vidraceira. Um exemplo deste tipo de gripper encontra-se representado na figura 3.15.

Este tipo de grippers apresentam também certas vantagens e desvantagens. Na tabela 3.2 estão presentes as 5 principais vantagens e desvantagens [21].



Figura 3.13: Gripper magnético ROBOTIQ recorrendo a eletroímãs [7].



Figura 3.14: Gripper magnético IMA recorrendo a ímanes permanentes [8].

Tabela 3.1: 5 Vantagens e desvantagens dos grippers magnéticos[7].

Vantagens	Desvantagens
Apenas necessita de uma superfície para manusear o objeto.	Quando movido com alta velocidade, a peça a ser manipulada pode escorregar do gripper.
O tempo para agarrar e começar a manipulação é baixo.	Líquidos como óleo podem reduzir drasticamente a força de atração da peça ao gripper.
Não necessita de diferentes designs para diferentes peças.	Limalhas das peças manuseadas podem ficar no gripper mesmo depois destas serem “descarregadas”.
Consegue manusear objetos com furos, algo que nos grippers por sucção não é possível.	Os objetos a manipular podem ficar magnetizados.
Baixa necessidade de manutenção.	Apenas permite o manuseamento de materiais ferromagnéticos.

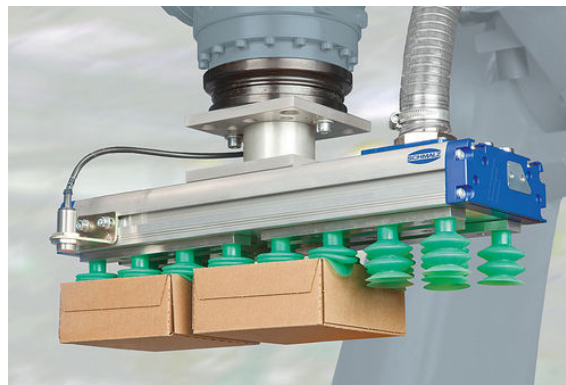


Figura 3.15: Gripper por sucção SCHMALZ manuseando caixas de cartão [9].

Tabela 3.2: 5 Vantagens e desvantagens dos grippers por sucção[21].

Vantagens	Desvantagens
Apenas necessita de uma superfície para manusear o objeto.	A força máxima a exercer é limitada pelo tamanho (área de contacto) das ventosas.
Uma pressão uniforme pode ser exercida em vários pontos da peça, em vez de esta ser concentrada num só ponto.	O posicionamento do gripper pode ser um tanto impreciso.
O gripper apresenta um peso baixo.	É necessário tempo para que seja criado vácuo entre as ventosas e a superfície da peça.
Consegue manusear objetos de diferentes materiais.	Impróprio para manipular objetos com superfícies curvas ou com furos ou cavidades.
Útil para manusear objetos frágeis sem haver perigo de se partirem.	Cria poluição sonora por necessitar de uma bomba de ar comprimido para criar vácuo.

3.8 Especificações de um gripper

Durante a fase de projeto de garras mecânicas, existem certas especificações/aspetos que devem ser tidos em conta, que dependem das funções para que estas são projetadas, bem como os objetos a manipular.

Segundo a norma ISO/DIS 14539 (1998), os principais itens são:

- Geometria dos dedos e da palma;
- Posicionamento dos dedos na palma;
- Forma dos dedos e dos seus movimentos durante o fecho dos dedos;
- Número e posicionamento dos atuadores;
- Número e posicionamento dos sensores;
- Mecanismos de transmissão da potência;
- Mecanismo de fixação do efetuador/manipulador;
- Tipo e força de apreensão;
- Tempo de operação (de apreensão, tempo do ciclo);
- Tipo de sistema de controle empregado (força e/ou posição);
- Número e material dos dedos;
- Número de graus de liberdade dos dedos;
- Geometria, peso, temperatura máxima e mínima, propriedades magnéticas e características da superfície do objeto a ser manipulado.[1]

3.9 Atuadores

Durante a fase de projeto de garras mecânicas é igualmente importante definir o tipo de atuador(es) a utilizar. Estes podem ser elétricos, hidráulicos ou pneumáticos.

3.9.1 Atuadores elétricos

Atuadores elétricos utilizam motores elétricos, que podem ser de corrente contínua ou alternada.

As principais vantagens deste tipo de atuadores, segundo [27], são:

- Eficiência e controlo preciso.

- Estrutura simples e de fácil manutenção.
- Não requererem uma fonte de energia cara.
- Custo relativamente baixo.

As principais desvantagens deste tipo de atuadores, segundo [27], são:

- Não manterem um binário constante nas mudanças de velocidade de rotação.
- Danificarem-se com cargas pesadas.
- Baixa razão de potência de saída do motor em relação ao seu peso, necessitando de motores de grandes dimensões.

3.9.2 Atuadores hidráulicos

Atuadores hidráulicos utilizam uma unidade hidráulica composta por um motor de movimento rotativo e por um cilindro para a realização de movimentos deslizantes. Esta unidade provoca o movimento em pistões que comprimem o óleo. O controle é então feito através de válvulas que regulam a pressão do óleo nas duas partes do cilindro e que impulsionam o pistão. Na figura 3.16 encontra-se representado este sistema [2].

As principais vantagens deste tipo de atuadores, segundo [27], são:

- O alto e constante binário sob uma grande faixa de variação de velocidade.
- A alta precisão de operação (entre o elétrico e o pneumático).
- Poder manter um binário alto por um longo período de tempo, quando parados.

As principais desvantagens deste tipo de atuadores, segundo [27], são:

- Requererem uma fonte de energia cara.
- Requererem uma manutenção cara e intensa.
- Requererem válvulas de precisão caras.
- Estarem sujeitos a fugas de óleo.

3.9.3 Atuadores pneumáticos

Atuadores pneumáticos utilizam uma unidade pneumática cujo princípio de funcionamento é igual à unidade hidráulica, com a exceção de em vez de óleo utiliza-se ar. Este tipo de atuador é muito utilizado para abrir e fechar garras mecânicas.

As principais vantagens deste tipo de atuadores, segundo [27], são:

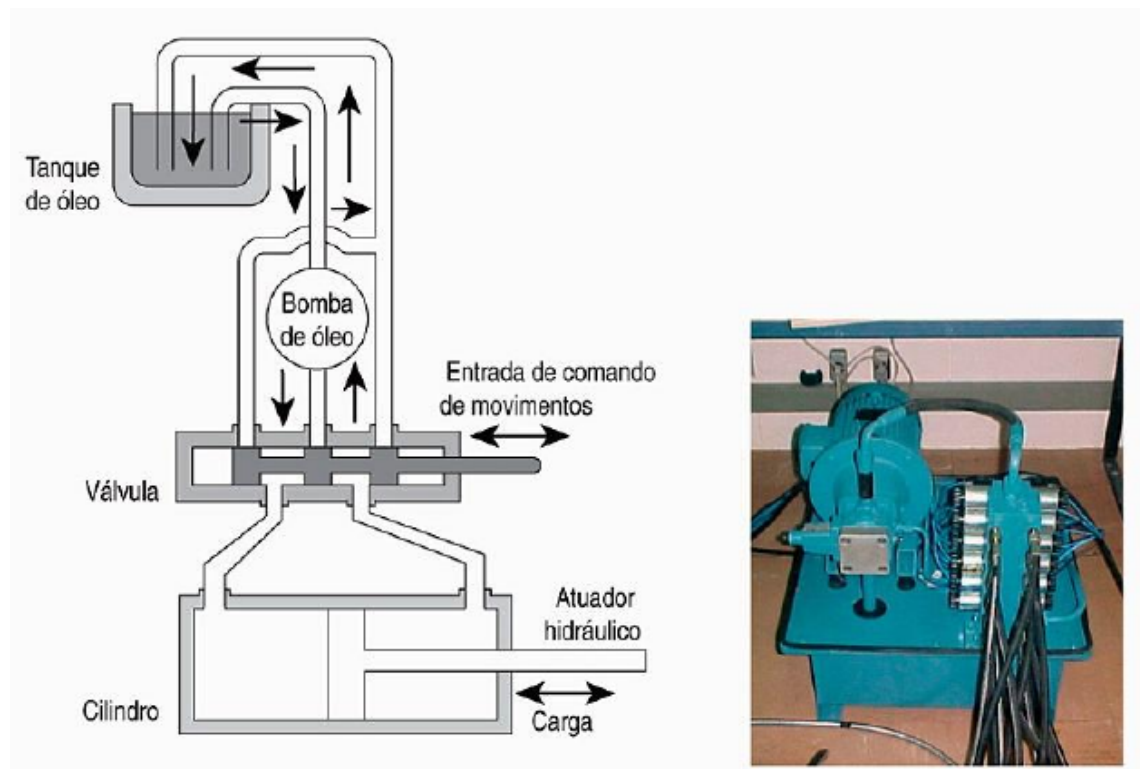


Figura 3.16: Sistema da unidade hidráulica [2].

- Poderem funcionar a velocidades altas.
- Custo relativamente baixo.
- Fácil manutenção.
- Poderem manter um binário constante numa grande faixa de velocidades.
- Quando parados, poderem manter o binário alto por longos períodos de tempo.

As principais desvantagens deste tipo de atuadores, segundo [27], são:

- Não possuírem alta precisão.
- Estarem sujeitos a vibrações quando o motor ou cilindro pneumático é parado.

3.9.4 Comparação entre atuadores

Comparando os três tipos de atuadores em relação à precisão de posicionamento, capacidade de manipulação de cargas e velocidade na atuação, podemos concluir que:

Os atuadores elétricos são, segundo [27], melhores em aplicações que envolvem:

- Alta precisão de posicionamento.

- Cargas de tamanho pequeno e médio.
- Ambientes difíceis para sistemas de compressores de óleo e ar.

Os atuadores hidráulicos são, segundo [27], melhores em aplicações que envolvem:

- Cargas pesadas.
- Média/alta precisão no posicionamento e na velocidade.

Os atuadores pneumáticos são, segundo [27], melhores em aplicações que envolvem:

- Baixa precisão.
- Necessidade de baixo custo.
- Altas velocidades.
- Transferência de cargas pequenas ou médias.

3.10 Soluções do mercado de grippers

Atualmente existem diversas soluções do mercado de grippers apresentadas por empresas de renome internacional como é o caso da ROBOTIQ¹, GIMATIC² e a FESTO³. Neste sentido foram exploradas as soluções apresentadas por estas empresas. Também foi feito um estudo de soluções de garras mecânicas apresentadas pelas tradicionais lojas de eletrônica, largamente utilizadas em pequenos projetos de robótica.

3.10.1 ROBOTIQ

A ROBOTIQ apresenta como soluções dois grippers de dois dedos adaptativos (2-FINGER 85 e 2-FINGER 140) e um gripper de três dedos adaptativo (3-FINGER).

As duas primeiras soluções para grippers de dois dedos, presentes na figura 3.17, têm as suas especificações técnicas (especificações mecânicas, especificações elétricas e especificações de controlo) na tabela A.1, tabela A.2 e tabela A.3, disponíveis no anexo A. O desenho técnico com informações relevantes como a área de trabalho de cada um dos grippers, está presente na figura 3.18.

A terceira solução, um gripper de três dedos adaptativo, presente na figura 3.19, tem as suas informações técnicas (especificações mecânicas, especificações elétricas e controlo) presentes na tabela A.4, tabela A.5 e tabela A.6, disponíveis no anexo A. O desenho técnico com informações relevantes como a área de trabalho deste gripper, está presente na figura 3.20.

¹www.robotiq.com

²www.gimatic.com

³www.festo.com



Figura 3.19: Gripper 3-FINGER ROBOTIQ [12].

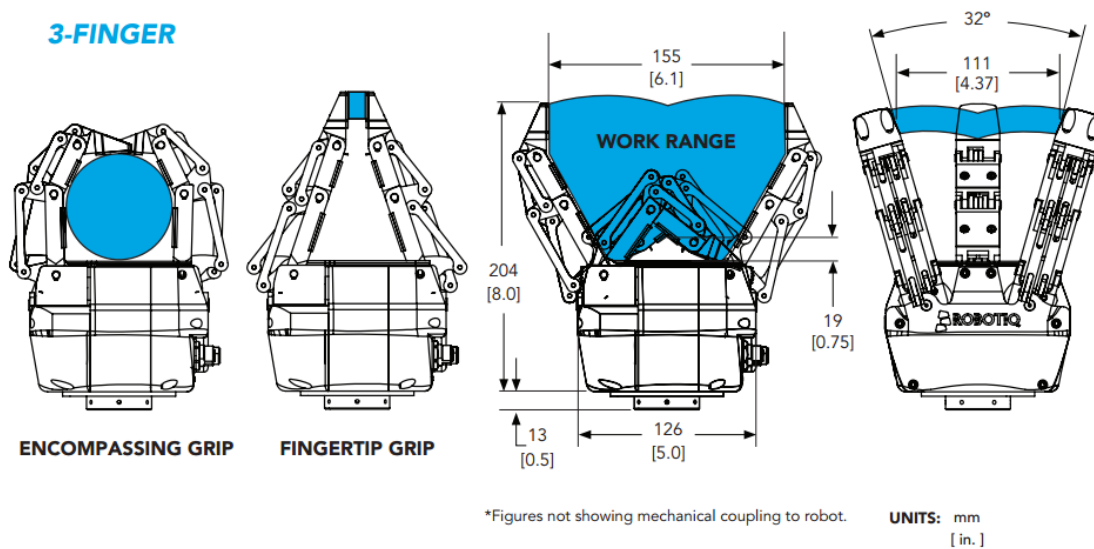


Figura 3.20: Desenho técnico do Gripper 3-FINGER ROBOTIQ (unidades em mm e [in.]) [13].

3.10.2 GIMATIC

A GIMATIC apresenta como soluções grippers elétricos de garras paralelas, de 3 dedos e com controlo angular, radial e rotativo. Todas as informações relativas a estes encontram-se disponíveis online em www.gimatic.com/en/products/handling.

3.10.3 FESTO

A FESTO apresenta como soluções garras paralelas, garras de 3 pontos, garras angulares e garras radiais com atuadores pneumáticos. Todas as informações relativas a estes encontram-se

disponíveis online em www.festo.com/cat/pt_pt/products_010800.

3.10.4 BOTNROLL

A BOTNROLL⁶ é uma pequena loja de eletrónica situada em Guimarães e que se especializou em comercializar artigos para pequenos projetos de robótica. Esta apresenta como soluções de garras a "ROB-11524" e a "Garra Bot'n Roll c/ servo".

A primeira trata-se de uma garra de dois dedos com uma articulação. É feita em metal e tem uma abertura máxima entre pinças de aproximadamente 5cm. Esta encontra-se apresentada na figura 3.21 e figura 3.22. Na figura 3.23 é possível obter o desenho e dimensões desta. O preço disponibilizado online é de €11,35.



Figura 3.21: Gripper "BotnRoll ROB-11524" com pega aberta [14].

A segunda garra, "Garra Bot'n Roll c/ servo", trata-se de uma garra de dois dedos de movimento de rotação (ver em 3.4). Trata-se de uma pequena garra feita em alumínio de 2mm de espessura e com uma abertura superior a 180°, permitindo manipular objetos com diâmetro entre 47mm e 110mm através de duas pinças de 69mm de comprimento. Esta encontra-se apresentada na figura 3.24 e figura 3.25. O preço disponibilizado online é de €34,90.

⁶www.botnroll.com

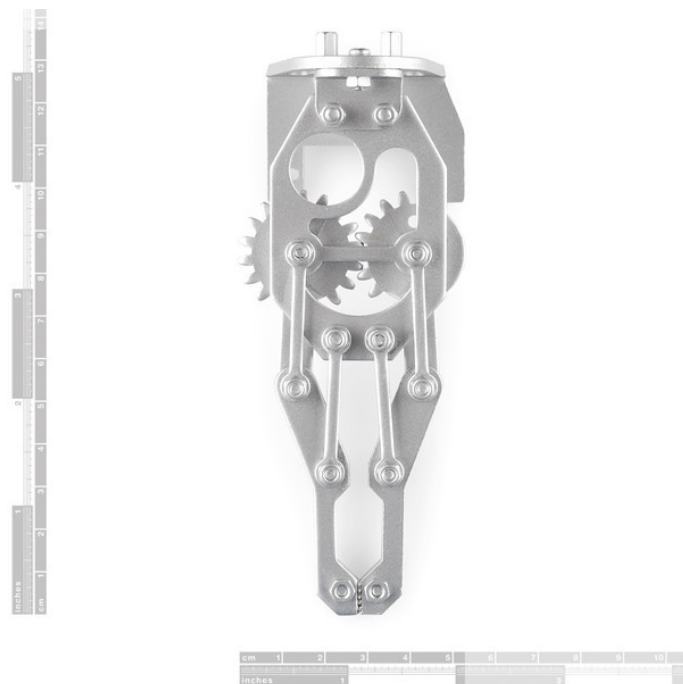


Figura 3.22: Gripper "BotnRoll ROB-11524" com pega fechada [14].

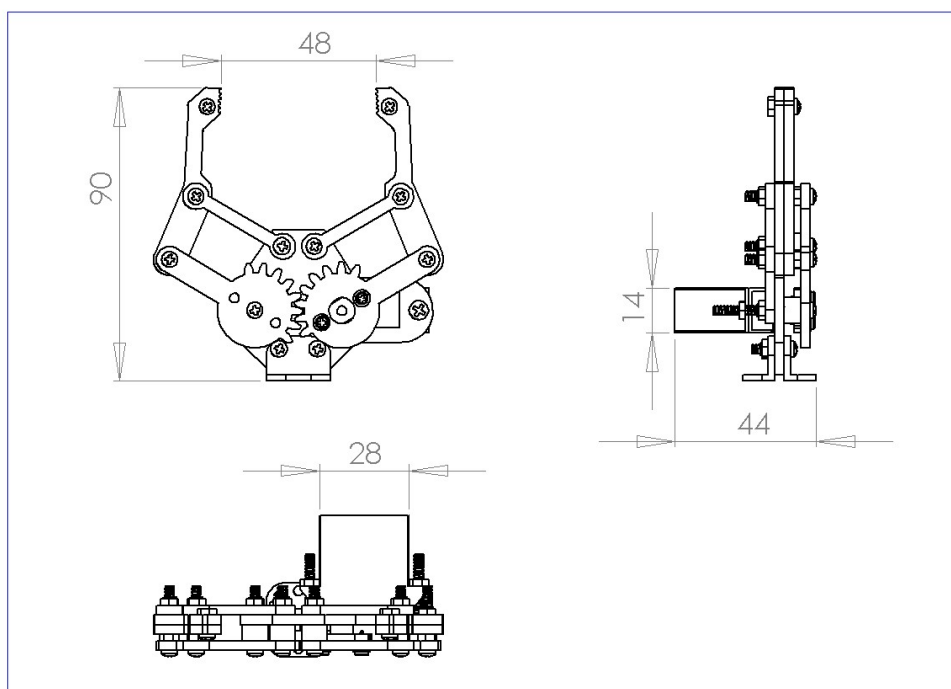


Figura 3.23: Desenho técnico do Gripper "BotnRoll ROB-11524" (unidades em mm) [14].

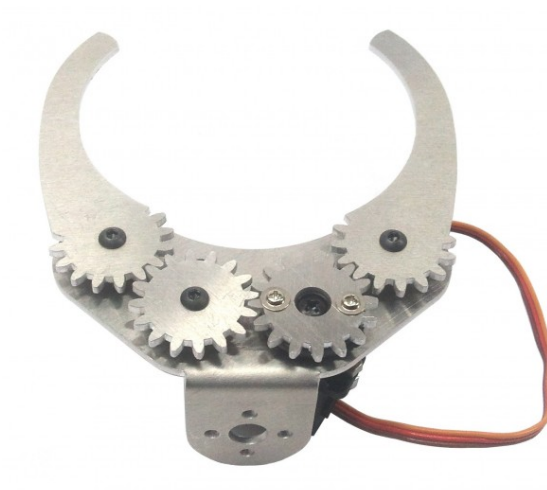


Figura 3.24: "Garra Bot'n Roll c/ servo"[15].



Figura 3.25: "Garra Bot'n Roll c/ servo" a manipular um objeto cilíndrico (lata) [15].

3.11 Robô TALON

TALON é um das soluções militares mais procuradas atualmente no desarme de minas e armadilhas, destacando-se pela sua alta tecnologia, robustez e pequenas dimensões. Produzido e comercializado pela QinetiQ⁷, que é a empresa líder mundial no fornecimento de material militar robótico, foi projetado com o objetivo de ajudar os militares em casos de manipulação/desarme de engenhos explosivos, evitando assim a exposição destes a situações de alto risco e possíveis danos irreversíveis.

Este poderoso mas ágil robô, apresentado na figura 3.26, pode ser manipulado em terrenos arenosos, na água, na neve e em terrenos urbanos, tendo a capacidade de subir escadas. É amplamente utilizado no desarme de dispositivos improvisados explosivos (IED) e destruição de material explosivo (EOD), em missões de reconhecimento, comunicações, manipulação de materiais perigosos CBRNE (química, biológica, radiológica, nuclear, Explosivo), missões de segurança, transporte de algumas cargas pesadas, de defesa e de salvamento.

As suas dimensões é fator de destaque, sendo leve (+52kg) e pequeno o suficiente para ser facilmente transportado. Tem sido largamente utilizado em todo o mundo, desde o Ground Zero depois do 11 de Setembro (ataque ao World Trade Center), no Iraque e Afeganistão, na procura de suspeitas de bomba na maratona de Boston e, na assistência de segurança durante a maioria dos grandes eventos desportivos [28].



Figura 3.26: Robô TALON utilizado no desarme e manipulação de engenhos explosivos [16].

⁷www.qinetiq.com

3.11.1 Modelos comercializados

Derivado das suas inúmeras aplicações, encontram-se disponíveis no mercado diferentes modelos, projetados para desempenharem diferentes funções. São eles:

1. **TALON Military** – O modelo original e standard TALON.
2. **TALON Hazmat** – Configurado com equipamentos de detecção de materiais perigosos.
3. **TALON Responder** – Desenhado especialmente para aplicações de segurança pública e urbana.
4. **TALON SWAT/MP** – Equipado para cenários táticos, frequentemente encontrados pelas unidades SWAT e polícia militar.
5. **TALON V** – IOP (inter-operável) compatível, mais rápido, câmara vídeo HD e comunicações melhoradas.

Todas as informações relativas a estes encontram-se disponíveis online em www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/talon/.

Capítulo 4

Construção de um gripper e de um manipulador

Neste capítulo é apresentada a construção de um prototipo de um gripper e de um manipulador capaz de suprir a maioria das necessidades da brigada na manipulação dos engenhos explosivos por eles apresentados. Inicialmente escolheu-se os atuadores que os iriam equipar, pensou-se qual seria a melhor configuração da garra, projetou-se e construiu-se um primeiro protótipo. Através destes validou-se certos mecanismos e encontrou-se certos problemas. Por fim concebeu-se o prototipo final.

Após ter sido efetuado um levantamento de requisitos no capítulo 2 e feito um estudo de várias soluções do mercado no capítulo 3, chegou-se à conclusão que a melhor decisão seria construir um gripper e um manipulador de raiz, que fosse de encontro às especificações pedidas. Como principais razões temos o alto preço das soluções de mercado, resultante da elevada complexidade e número de configurações destes (exemplo das soluções apresentadas pela empresa ROBOTIQ, em 3.10.1). Outras razões consideradas foram a dependência em termos de dimensões e configurações do gripper, bem como especificações dos atuadores destes.

O protótipo da garra foi projetado recorrendo à ferramenta de CAD SolidWorks, muito utilizada no desenho de peças 3D. Após projetadas, as peças foram impressas numa impressora 3D pertencente ao INESC TEC.

4.1 Motores

Antes de se começar a projetar e a construir o gripper e manipulador foram escolhidos os atuadores que os iriam equipar.

O tipo de atuador escolhido foi elétrico, derivado do facto de como supracitado no capítulo 3, em 3.9.4: "Os atuadores elétricos são melhores em aplicações que envolvem: Alta precisão de posicionamento e cargas de tamanho pequeno e médio e em ambientes difíceis para sistemas de compressores de óleo e ar." Tratando-se de um estrutura robótica móvel e o espaço reservado para o nosso sistema ser pequeno o que impedia a colocação de uma unidade hidráulica ou de um

compressor, decidiu-se que a solução seria atuadores elétricos. Isto, aliado ao preço relativamente baixo deste tipo de soluções, de não requererem uma fonte de energia cara e que já se encontrava disponível no robô, e à facilidade em serem integrados no sistema.

Os motores elétricos escolhidos foram servo-motores. Esta escolha destes baseou-se na simplicidade de programação, bem como na precisão, peso, relação tamanho força e no facto de alguns já terem certos sensores embutidos e permitirem fazer o controlo da velocidade e torque.

Os servo-motores escolhidos foram servo-motores Dynamixel da empresa ROBOTIS¹. Esta escolha recaiu no facto de já termos disponíveis no INESC TEC alguns para teste, os Dynamixel AX-12 (usados em 4.3) e um deles que já integraria a solução final, o Dynamixel RX-64. Foi decidido que este último seria responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *PITCH*. Derivado do facto dos AX-12 não conterem engrenagens em metal como o RX-64, foram adquiridos dois Dynamixel RX-24F para o movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* e abertura e fecho do gripper. Estes motores serão posteriormente apresentados no capítulo 5, servindo esta referência apenas para ao projetar o gripper e manipulador, termos noção das dimensões destes e da melhor maneira de efetuar a sua acoplação. É importante também mencionar que o motor Dynamixel RX-64 permite exercer um torque máximo de 64 kg*cm, ou seja 6,28N*m.

4.2 Configuração

Escolhidos os atuadores que iriam equipar o gripper e manipulador, pensou-se que configuração seria a mais indicada face aos requisitos. Neste subcapítulo apresenta-se a configuração escolhida para o gripper e as razões que levaram a essa escolha. Será utilizada a primeira versão do prototipo do gripper (apresentada posteriormente a sua projeção e construção em 4.3) por uma questão de simplicidade na justificação dessas escolhas.

A configuração escolhida deve ser capaz de suprir as necessidades básicas da brigada na manipulação dos diferentes objetos por eles apresentados. Os objetos apresentados pela brigada como exemplo, no capítulo 2, em 2.1, traduzem-se essencialmente em pequenas caixas de cartão, objetos cilíndricos e mochilas. Inspirado no gripper Botnroll ROB-11524, apresentado no capítulo 3, presente na figura 3.21, começou-se por considerar se esta configuração seria a mais adequada. Trata-se de uma garra mecânica de dois dedos com uma articulação. Esta configuração além de mais simples e robusta que outras (garra de três dedos ou com mais articulações), permite exercer vários tipos de preensões, sendo elas do tipo cilíndrico, ponta de dedo, palmar e de gancho. Estas preensões traduzem-se na capacidade de manipulação de objetos de diferentes formas, como objetos retangulares e cilíndricos.

Ainda que o movimento de abertura e fecho do gripper seja contínuo, por forma a perceber de que forma esta configuração pode ou não ser vantajosa face aos requisitos, dividamos as posições principais deste tipo de configuração de gripper em três: Abertura máxima, abertura intermédia e fechada. Estas posições são apresentadas na figura 4.1.

¹www.robotis.com

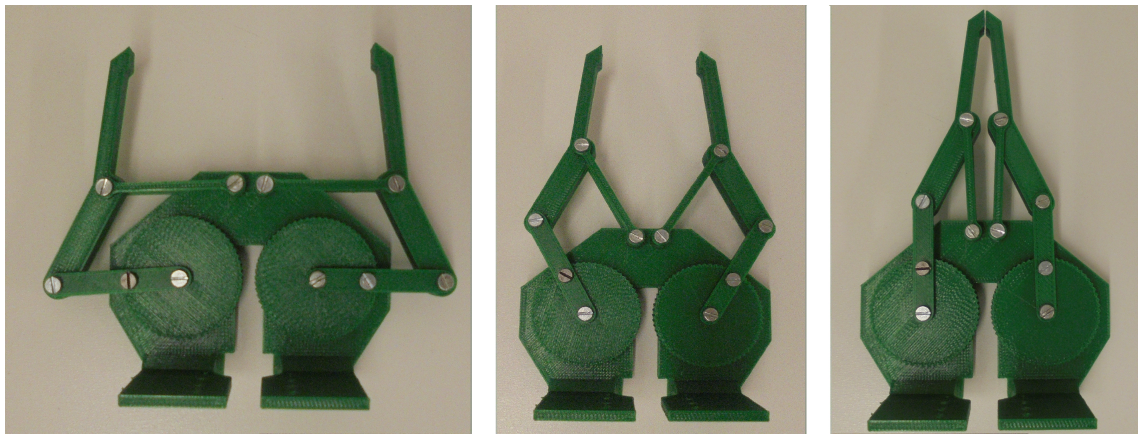


Figura 4.1: Três posições possíveis numa garra com dois dedos articulada: abertura máxima, abertura intermédia e pega fechada.

Ao avaliar as três posições, é possível considerar que a primeira posição pode ser útil na manipulação de caixas (ver figura 4.2), aproximando-se de uma garra de dois dedos de movimento paralelo. A segunda posição poderá ser utilizada em objetos cilíndricos (ver figura 4.3), aproximando-se de uma garra de dois dedos com um movimento de rotação. Por fim, a terceira posição permite a manipulação de mochilas através das alças (ver figura 4.4), funcionando como um gancho.

Também é possível verificar que esta configuração permite uma pega mais ajustada ao objeto, traduzindo-se também num aumento da estabilidade de manipulação. Nesta configuração, os pontos de contacto são geralmente quatro. Numa configuração de garra de dois dedos sem articulação, teríamos dois pontos, em que a preensão seria maioritariamente feita em forma de "ponta de dedo", funcionando como uma pinça.



Figura 4.2: Manipulação de caixas: aproximação na posição abertura máxima, ajuste ao tamanho da caixa e por fim preensão da caixa.

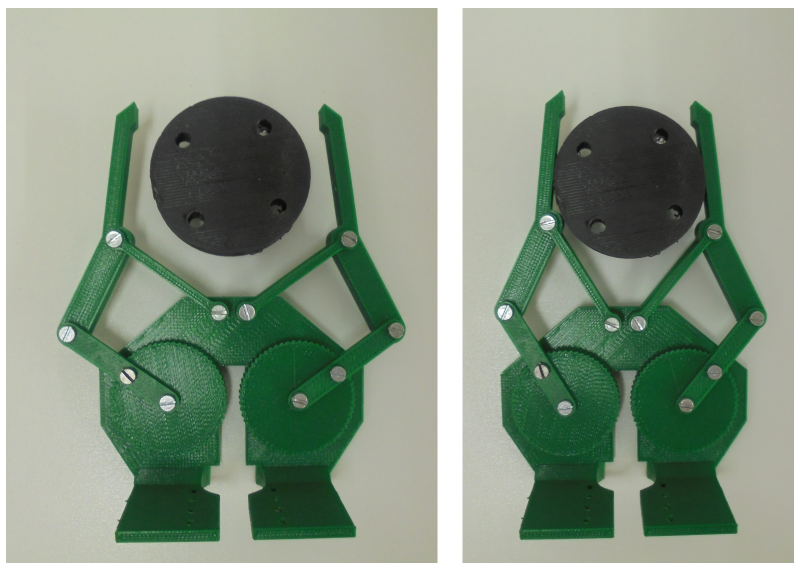


Figura 4.3: Manipulação de objetos cilíndricos: aproximação na posição abertura intermédia e e por fim prensão do objeto.



Figura 4.4: Manipulação de uma mochila: aproximação na posição abertura intermédia e por fim pega fechada.

4.3 Gripper V1

Escolhidos os atuadores e a configuração, começou-se por projetar e construir a primeira versão do protótipo da garra. A ideia deste protótipo seria além de testar a configuração, testar o funcionamento de um fuso sem fim e duas rodas helicoidais para o mecanismo de abertura e fecho do gripper. No gripper Botnroll ROB-11524, para este efeito eram utilizadas duas rodas dentadas que formavam uma engrenagem, e em que a transmissão do movimento do motor era feita através da acoplação deste a uma das rodas dentadas. Este último mecanismo é possível de ser visto na

figura 3.24. Este mecanismo era mais fácil e barato de conceber (não necessitava de um fuso sem fim), mas na teoria retirava força e precisão na abertura e fecho da garra. Para tal poderia ter sido utilizada uma caixa redutora, mas traria ainda mais complexidade do que o uso de um fuso sem fim e duas rodas helicoidais. Outra vantagem do uso deste tipo de mecanismo é que o fuso permite a transferência de movimento às rodas dentadas helicoidais, mas as rodas dentadas não permitem a transferência de movimento ao fuso sem fim. Desta maneira, a posição da abertura/fecho do gripper é sempre mantida quando o fuso está parado, exercendo assim a função de encravamento mecânico, não sendo necessário alimentar continuamente o servo-motor para mantê-la. Este mecanismo acrescenta, desta forma, segurança na manipulação caso o sistema fique sem energia.

4.3.1 Construção no SolidWorks

Inicialmente consultou-se alguns tutoriais de construção de grippers de dois dedos em SolidWorks, de forma a serem dados os primeiros passos na utilização desta ferramenta. Desses tutoriais destaca-se o "SolidWorks Robot Kol"[29], em que é feito o desenho de todas as peças e finalmente a montagem de um gripper de dois dedos com uma articulação, bastante similar ao gripper BotnRoll ROB-11524.

Primeiramente foram desenhadas algumas peças deste tutorial e feitas as alterações necessárias. Na figura 4.5 encontra-se o desenho de uma pinça, dois tipos de haste e de um suporte usados na construção do gripper. A inserção das rodas helicoidais e do fuso foi feita consultando o site GrabCad², em que são disponibilizados alguns projetos básicos em SolidWorks. Procurando por "worm gear" encontrou-se um exemplo de um fuso e uma roda dentada helicoidal em [30]. Foram procedidas as alterações necessárias e criada uma interface para a acoplação de um servo Dynamixel AX-12 ao fuso e feita a furação necessária para prender a estrutura do servo-motor à estrutura da garra. A estrutura base da garra pode ser vista na figura 4.6 e o fuso e uma das rodas helicoidais na figura 4.7. Todos os veios foram definidos com um diâmetro de 3mm. Esta escolha baseou-se na disponibilidade destes (utilizados parafusos na montagem) no INESC TEC e das suas dimensões serem adequadas ao tamanho do protótipo.

Por fim, efetuou-se a montagem das peças. Na figura 4.8 encontra-se o modelo em SolidWorks da primeira versão do protótipo do gripper.

4.3.2 Impressão e montagem

Depois de impresso numa impressora 3D, a primeira versão do protótipo do gripper foi montada. Na figura 4.9 apresenta-se o resultado final. Na figura 4.10 encontra-se a acoplação do fuso sem fim ao servo-motor Dynamixel AX-12, para abertura e fecho da garra na versão impressa.

4.3.3 Gripper V1 e manipulador

Após impressão e montagem do gripper, acoplou-se o primeiro servo-motor Dynamixel AX-12 para abertura e fecho da garra. Este, como se pode ver pela figura 4.11 tem a sua estrutura

²www.grabcad.com

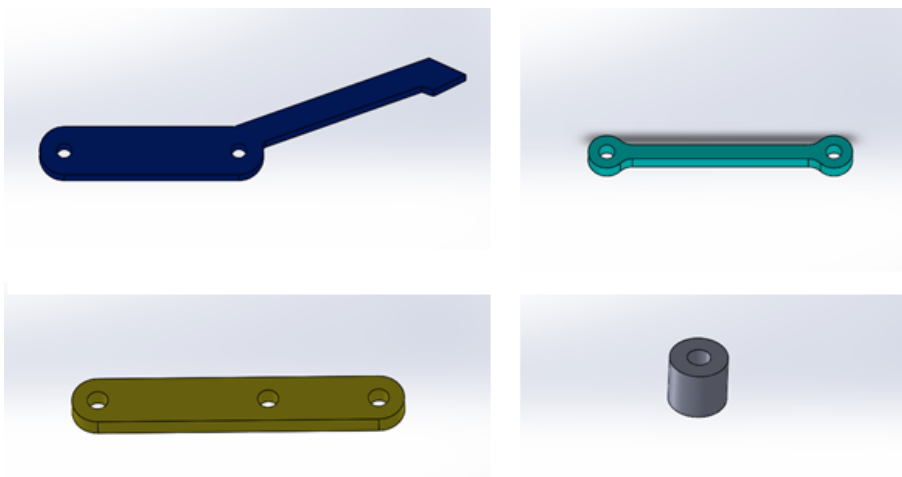


Figura 4.5: Peças desenhadas em SolidWorks na construção do gripper: uma pinça, dois tipos de haste e de um suporte para a pinça.

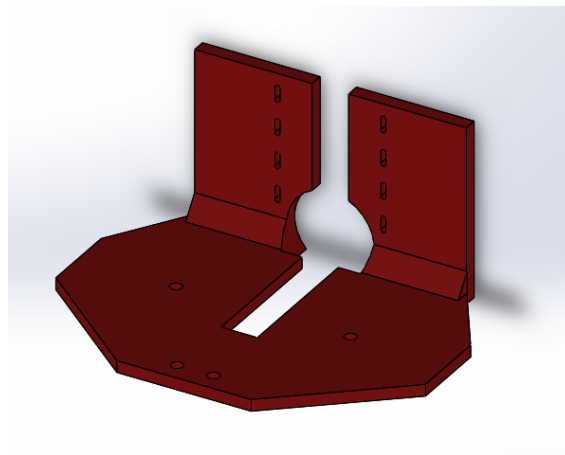


Figura 4.6: Peças desenhadas em SolidWorks na construção do gripper: estrutura base.

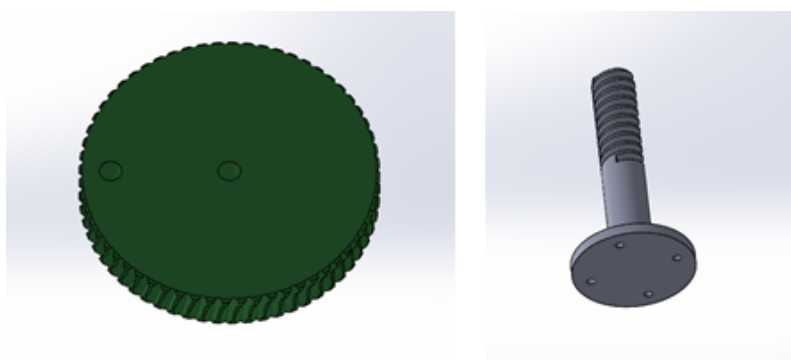


Figura 4.7: Peças desenhadas em SolidWorks na construção do gripper: roda helicoidal e fuso sem fim.

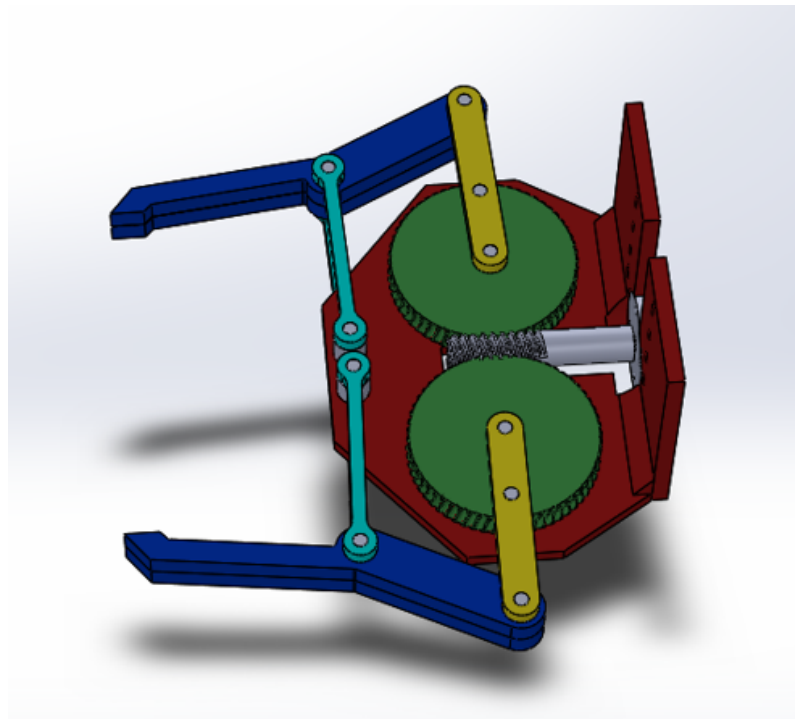


Figura 4.8: Modelo em SolidWorks da primeira versão do protótipo do gripper, pós montagem.

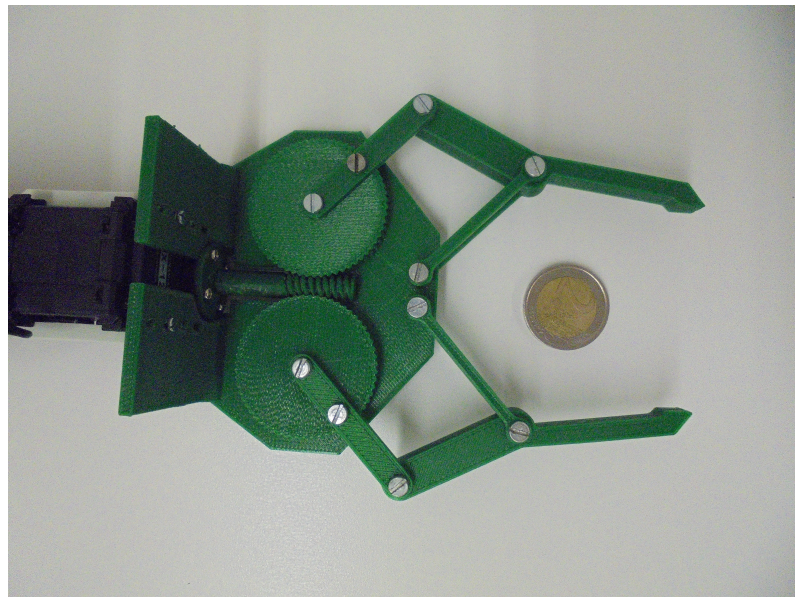


Figura 4.9: Primeira versão do protótipo do gripper pós impressão e montagem.

aparafusada à estrutura base da garra. A este servo-motor foram acoplados mais dois, que permitiriam movimentos nas direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*. Estes podem ser vistos na figura [4.12](#).

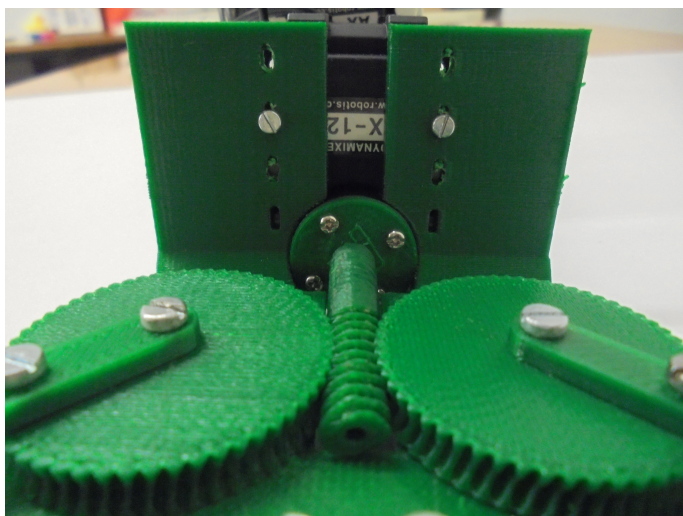


Figura 4.10: Acoplação do fuso sem fim ao servo-motor Dynamixel AX-12, para abertura e fecho da garra na versão impressa.

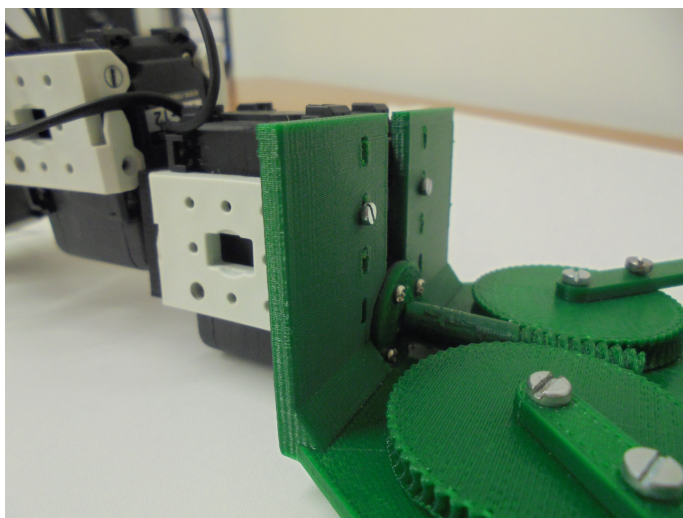


Figura 4.11: Estrutura do servo-motor Dynamixel AX-12 responsável pela abertura e fecho do gripper aparafusada à estrutura base deste.

4.3.4 Conclusões e problemas encontrados

Tal como supracitado em 4.3, o objetivo deste primeiro protótipo seria além de testar a configuração (ver 4.2), testar o funcionamento de um fuso sem fim e duas rodas helicoidais para o mecanismo de abertura e fecho do gripper. Ambas foram testadas e validadas.

Com a inclusão dos dois motores que acrescentariam a possibilidade de movimentos nas direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH* e por assim dizer a criação de um manipulador com dois graus de liberdade, foram detetados certos problemas. Por questão de simplificação, suponha-se que o servo-motor responsável pelo movimento na direção de rotação de *ROLL* é o servo-motor 2

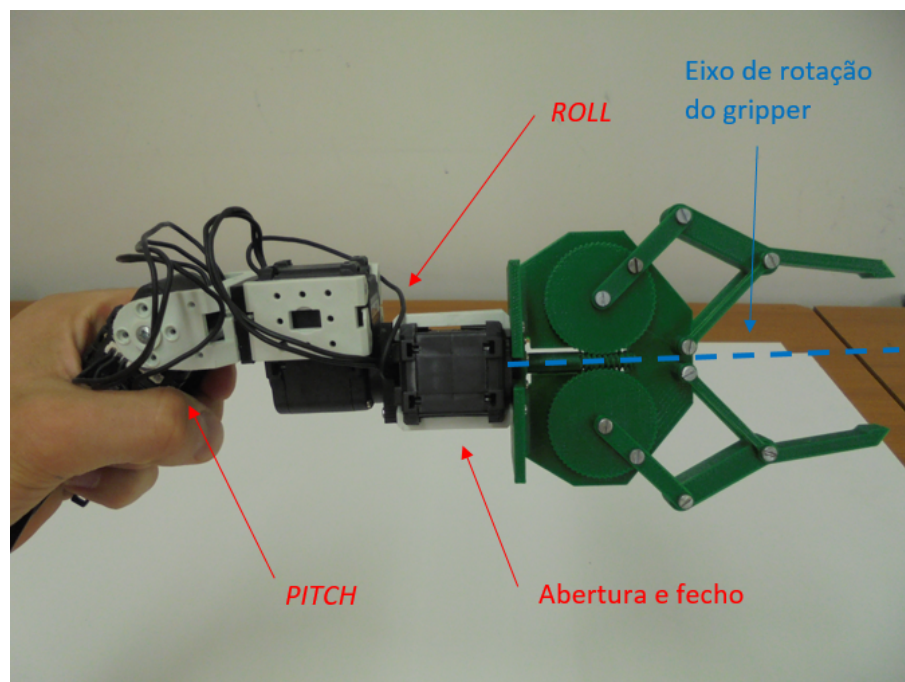


Figura 4.12: Servo-motores Dynamixel AX-12 responsáveis pela abertura e fecho do gripper e pelos movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*.

e o servo-motor responsável pelo movimento na direção de rotação de *PITCH* é o servo-motor 3.

O primeiro problema detetado foi na direção de rotação de *ROLL*. Derivado do facto do eixo do fuso sem fim do gripper (que aponta para o centro de manipulação da garra) não se encontrar alinhado com o eixo de rotação do servo-motor 2, isto leva a que quando este motor é acionado, o gripper não gire em torno de um ponto mas em redor dele. Este desalinhamento de eixos é apresentado na figura 4.13, sendo que o eixo tracejado a vermelho representa o eixo de rotação exercido pelo motor 2 e o eixo tracejado a azul o eixo de rotação do gripper.

O segundo problema detetado prende-se no facto de o peso suportado pelo gripper ser inteiramente sustentado pelo veio do servo-motor 2. O peso é também suportado por toda a cadeia emparelhada dos três servo-motores (estrutura destes). A ideia seria que este peso fosse inteiramente sustentado por uma estrutura mecânica em que os motores eram unicamente utilizados para fazer a transmissão do movimento a rodas dentadas.

Como terceiro problema detetado, temos o elevado tamanho (em termos de comprimento) da solução. Este tamanho é resultado de termos os três servo-motores emparelhados em cadeia.

Como quarto problema, constatou-se que o fuso sem fim deveria ser fixado sobre dois rolamentos, por forma a que este não tenha somente um ponto de apoio (apoio no servo-motor que realiza o movimento de abertura e fecho do gripper).

Como quinto e último problema, temos a não normalização do fuso sem fim e rodas dentadas helicoidais. Considerando-se que o protótipo final será posteriormente maquinado, este é um fator crucial a ter em conta.

Todos estes problemas foram abordados e resolvidos no subcapítulo 4.4.

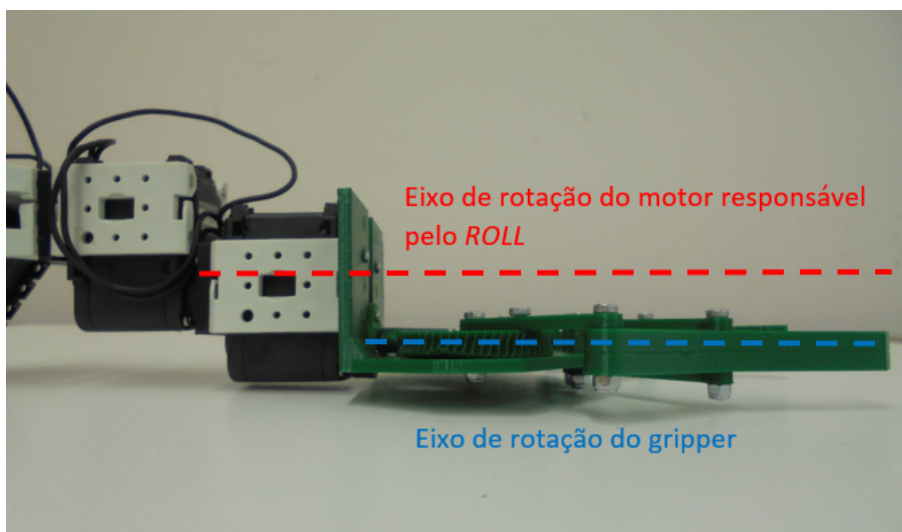


Figura 4.13: Desalinhamento entre eixo de rotação do motor responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* (tracejado a vermelho) e o eixo de rotação do gripper (tracejado a azul).

4.4 Gripper V2

4.4.1 Dimensões

Considerando que o gripper V2 será um protótipo muito próximo do produto final, começou-se por definir as dimensões deste.

Para uma posição abertura máxima (ver 4.2) definiu-se em função dos objetos apresentados como exemplo em 2.1 que uma distância de 125mm entre pinças numa abertura máxima seria a ideal. Foi procedido um redimensionamento da primeira versão do protótipo 4.3 para cumprir este objetivo e avaliado o tamanho deste.

Nesta fase, com esta avaliação definiu-se o tamanho aproximado das rodas dentadas helicoidais e do fuso sem fim. Esta avaliação foi crucial para a escolha das rodas dentadas e do fuso sem fim apresentadas no subcapítulo 4.4.2.

4.4.2 Rodas dentadas helicoidais e fuso sem fim

Definido o comprimento da abertura máxima e procedido o redimensionamento da primeira versão do protótipo da garra em função deste, começou-se por abordar o quinto e último problema apresentado no subcapítulo 4.3: não normalização do fuso sem fim e das rodas dentadas helicoidais.

Depois de uma consulta por fornecedores de rodas dentadas helicoidais e fusos sem fim, conhecidos como "worm gears", encontrou-se um fornecedor HPC-Gears³ que comercializa, além de rodas dentadas em geral, este tipo de produtos.

Através da consulta do catálogo fornecido no site da empresa, disponível em [31], escolhido o módulo das rodas dentadas como 0.8 (valor que fornece uma precisão suficientemente grande por conter um número elevado de dentes e ao mesmo tempo robusta pelo tamanho de cada dente), encomendou-se o fuso sem fim SW0.8-1 e duas rodas dentadas helicoidais HPC M0.8-70 (dimensões mais próximas das rodas dentadas pós redimensionamento da primeira versão). Na figura 4.14 apresenta-se o fuso SW0.8-1 e as duas rodas helicoidais M0.8-70 encomendadas.

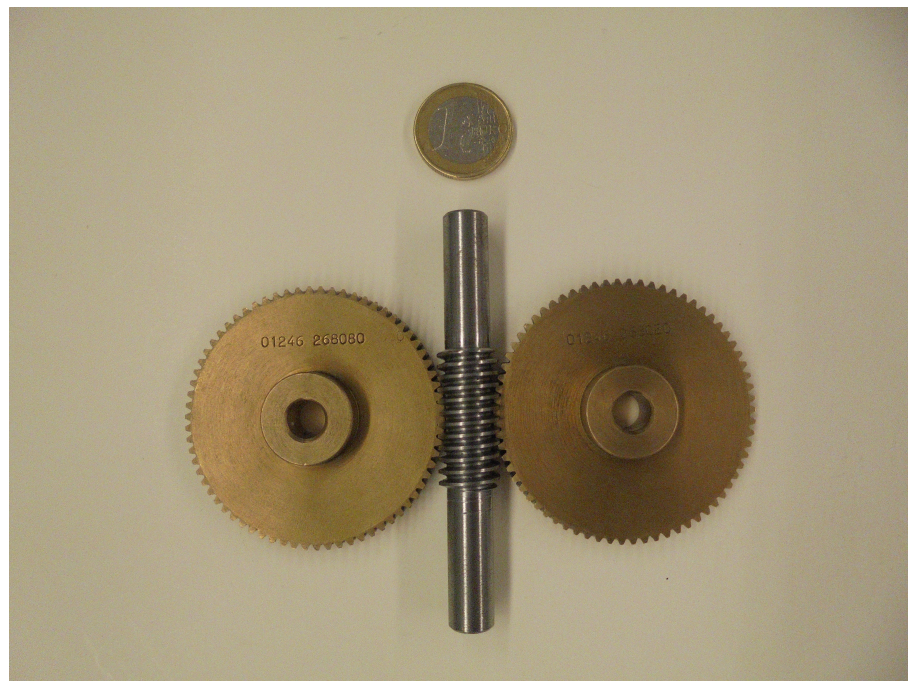


Figura 4.14: Fuso sem fim SW0.8-1 e as duas rodas dentadas helicoidais M0.8-70 encomendadas.

A construção do gripper V2 iniciou-se assim com a escolha do fuso e das rodas dentadas helicoidais. Através de uma base de dados da HPC-Gears, disponível em [32], foi feito o download do desenho CAD destas e procedidas as alterações necessárias em SolidWorks. Estas alterações traduziram-se na inclusão de um rolamento de esferas de diâmetro interior 6mm, diâmetro exterior 13mm de profundidade 5mm nas rodas helicoidais (ver figura 4.15) e alteração do fuso sem fim de parte do seu veio de 10mm para 8mm (ver figura 4.16). Esta última alteração prendeu-se no facto de resolver o problema quatro apresentado em 4.3.4 e fixar o veio em dois rolamentos SKF⁴ HK 0810 (diâmetro interior 8mm, diâmetro exterior 10mm e profundidade 10mm). Estes rolamentos de agulhas foram escolhidos e encomendados. Para estes foram projetadas duas chumaceiras, cujo desenho destas se apresenta na figura 4.17. Nas rodas dentadas também foi feito um furo de

³www.hpcgears.com

⁴www.skf.com

6mm a uma distância de 20mm do centro para permitir o mecanismo de fim de curso mecânico apresentado no subcapítulo 4.4.6.

A base do gripper foi redesenhada, apresentando-se na figura 4.18 a versão final desta.

Na figura 4.19 temos a montagem das rodas helicoidais à base do gripper e do fuso sem fim aos rolamentos SKF HK 0810 suportados pelas chumaceiras projetadas para estes.

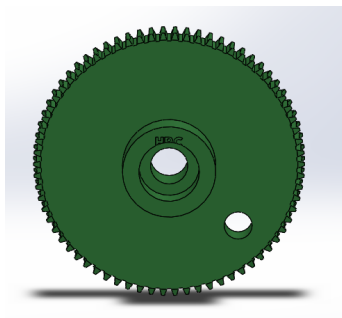


Figura 4.15: Alterações feitas nas rodas dentadas helicoidais HPC M0.8-70 em SolidWorks.

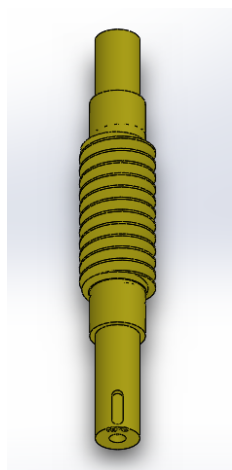


Figura 4.16: Alterações feitas ao fuso HPC SW0.8-1 em SolidWorks.

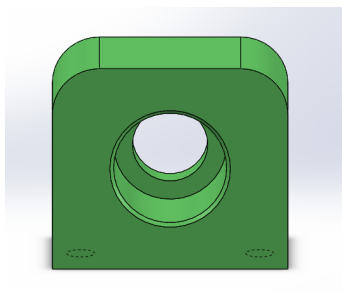


Figura 4.17: Chumaceira desenhada em SolidWorks para rolamento SKF HK 0810.

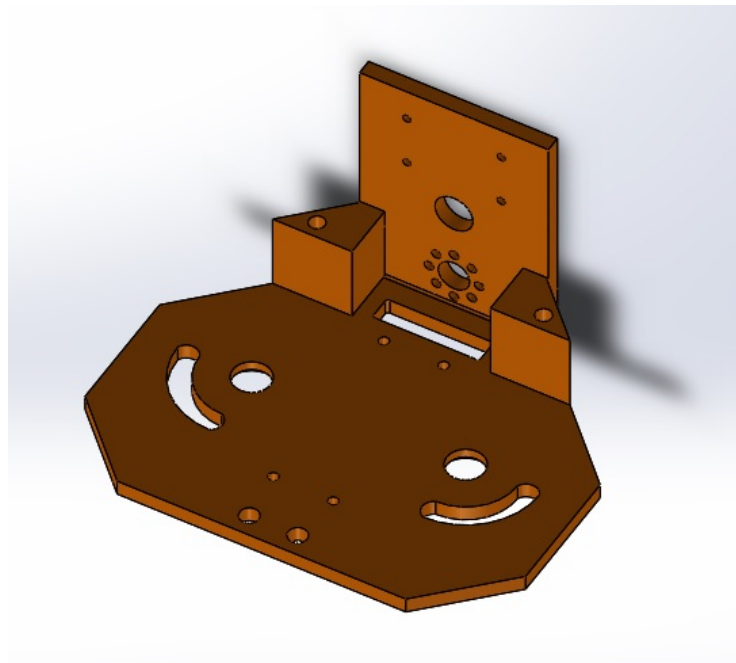


Figura 4.18: Base do gripper desenhada em SolidWorks.

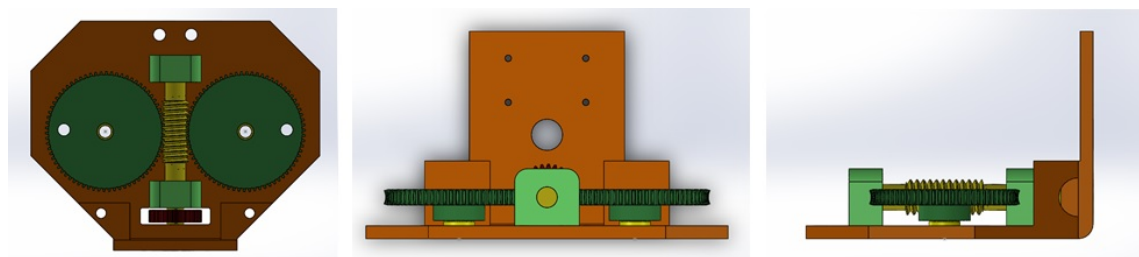


Figura 4.19: Assemblagem das rodas helicoidais à base do gripper e do fuso sem fim aos rolamentos SKF HK 0810 suportados pelas chumaceiras projetadas (visão de cima, frontal e lateral).

4.4.3 Servo-motor de abertura e fecho do gripper

Por forma a resolver o problema três apresentado em 4.3.4 (servo-motores dispostos em série ocupam bastante espaço), o servo-motor para abertura e fecho da garra foi retirado da posição em que se encontrava e colocado do lado de dentro da base do gripper por cima do fuso sem fim. Para que este fizesse transmissão ao fuso foram inseridas duas rodas dentadas HPC G0.8-30 que foram "maquinadas" no SolidWorks. Uma delas, através de uma chaveta, foi fixada ao fuso sem fim, enquanto que a outra foi aparafusada ao servo-motor. Na figura 4.20 apresenta-se o servo-motor Dynamixel RX-24F aparafusado no interior da base do gripper e a fazer transmissão por meio de duas rodas dentadas ao fuso sem fim. Por forma a que a roda dentada HPC G0.8-30 aparafusada ao servo-motor de abertura e fecho da garra gire sempre em torno do mesmo eixo, foi colocado um veio fixo à roda dentada acoplada ao servo-motor e a rodar num rolamento SKF HK 0810 cravado na base do gripper. Tal ilustra-se na figura 4.21.

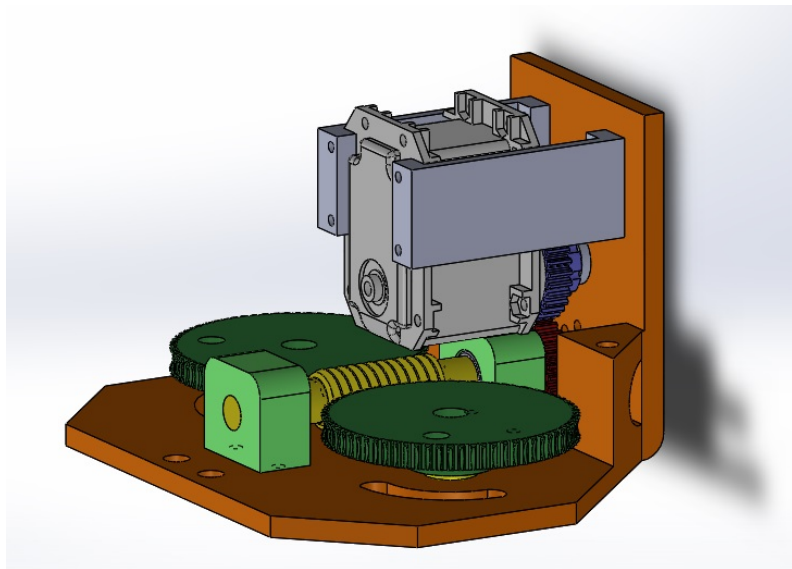


Figura 4.20: Servo-motor de abertura e fecho fixo no interior da base do gripper e a fazer transmissão por meio de duas rodas dentadas ao fuso sem fim.

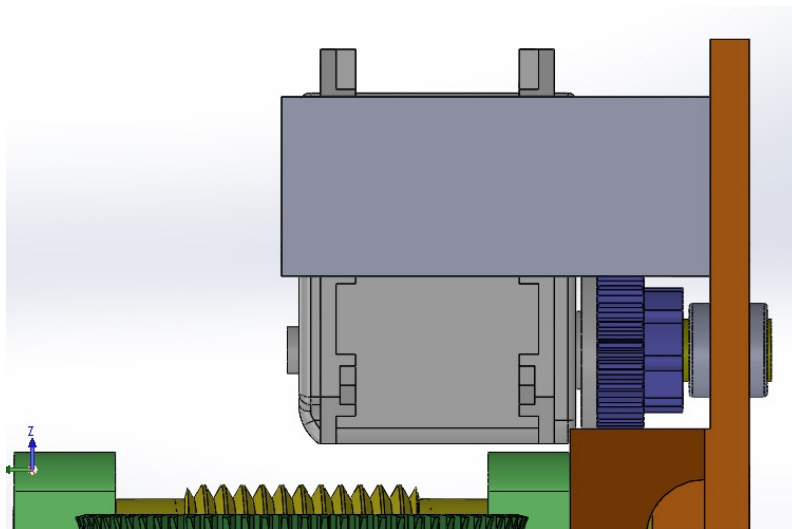


Figura 4.21: Veio fixo ao servo-motor a rodar num rolamento cravado na base do gripper, por forma a que o servo-motor gire sempre em torno do mesmo eixo.

4.4.4 Rolamentos, casquilhos e veios

Todas as peças que executam movimentos de rotação precisam de ter pelo menos um rolamento ou um casquilho e por fim um veio. Já foram apresentados exemplos no subcapítulo 4.4.2 e subcapítulo 4.4.3 em que foram utilizados rolamentos.

O uso de rolamentos está geralmente associado a motores, rodas dentadas e fusos, que executam muitos movimentos e são suscetíveis a maiores pontos de esforço e torção. Peças que não realizem movimentos tão frequentes ou em que seja apenas necessário reduzir o atrito entre elas,

podemos utilizar casquilhos auto lubrificados.

Consultou-se o catálogo da Igus⁵ em [32] e escolheu-se casquilhos auto lubrificados do tipo F 0608 (diâmetro interno 6mm e exterior 8mm). O desenho em SolidWorks destes ilustra-se na figura 4.22. Estes foram utilizados em várias peças do gripper. Uma das peças apresenta-se na figura 4.23.

Por forma a uniformizar os veios a utilizar em todo o protótipo Gripper V2, definiu-se que estes teriam um diâmetro de 6mm (com a exceção do veio do motor que é de 8mm). A utilização destes era já necessária nas rodas helicoidais por se estar a utilizar rolamentos de diâmetro interno 6mm. Para além de ser um diâmetro aceitável, encontravam-se disponíveis no INESC TEC.

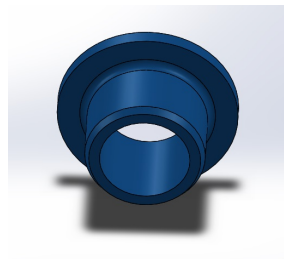


Figura 4.22: Desenho em SolidWorks de um casquilho auto lubrificado da Igus tipo F 0608 utilizado no projeto.

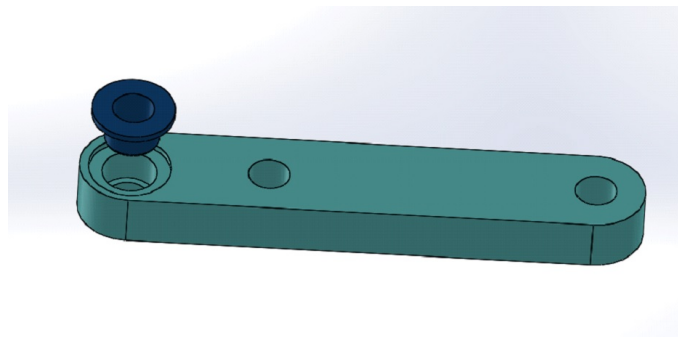


Figura 4.23: Desenho em SolidWorks de uma das peças do gripper onde foram utilizados casquilhos auto lubrificados da Igus.

4.4.5 Resolução do problema 1 - problema da direção de rotação de *ROLL*

Como supracitado em 4.3.4, o primeiro problema detetado foi no movimento segundo a direção de rotação de *ROLL*. Derivado do facto do eixo do fuso sem fim do gripper (que aponta para o centro de manipulação da garra) não se encontrar alinhado com o eixo de rotação do servo-motor 2, isto leva a que quando este motor é acionado, o gripper não gire em torno de um ponto mas em redor dele. Com a colocação do servo-motor na posição apresentada pela figura 4.20, foi possível

⁵www.igus.pt

colocar um veio aparafusado à base do gripper, segundo o eixo do fuso sem fim, que coincide também com o eixo do centro da garra. Desta forma, quando o movimento segundo a direção de rotação de *ROLL*, que será apresentado no subcapítulo 4.5.1 for executado, a garra rodará em torno do eixo correto. Este veio apresenta-se na figura 4.24.

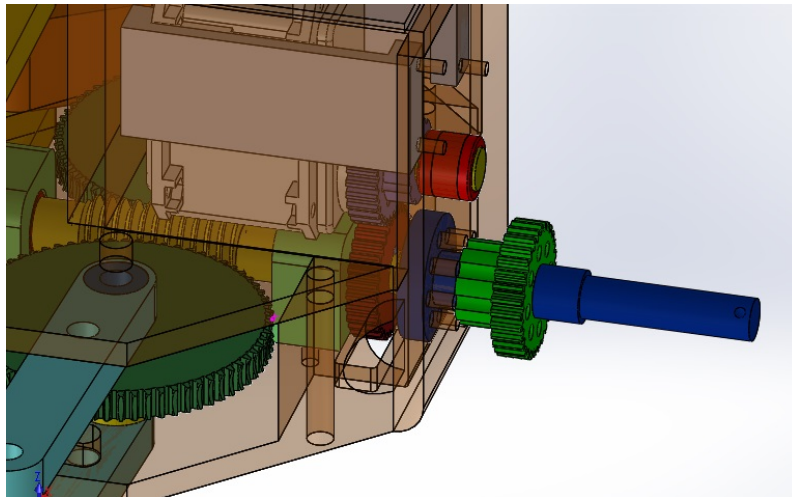


Figura 4.24: Veio (a azul) aparafusado à base do gripper que permite resolver o problema do movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* supracitado em 4.3.4.

4.4.6 Mecanismo de fim de curso mecânico

De forma a ser criado um fim de curso mecânico, as rodas dentadas foram furadas, assim como as hastes a azul claro. Na base do gripper foi feito um rasgo circular, que se pode ver na figura 4.18 e que delimita a abertura e fecho do gripper. Foi inserido por fim um veio que atravessa as hastes, a roda dentada e o interior do rasgo e criado um fim de curso mecânico. Tal ilustra-se nas figuras 4.25 e 4.26.

4.4.7 Assemblagem final

Depois de se resolvidos todos os problemas e desenhadas todas as peças relativas ao gripper, procedeu-se à montagem final em SolidWorks. As figuras 4.27 e 4.28 ilustram esse resultado.

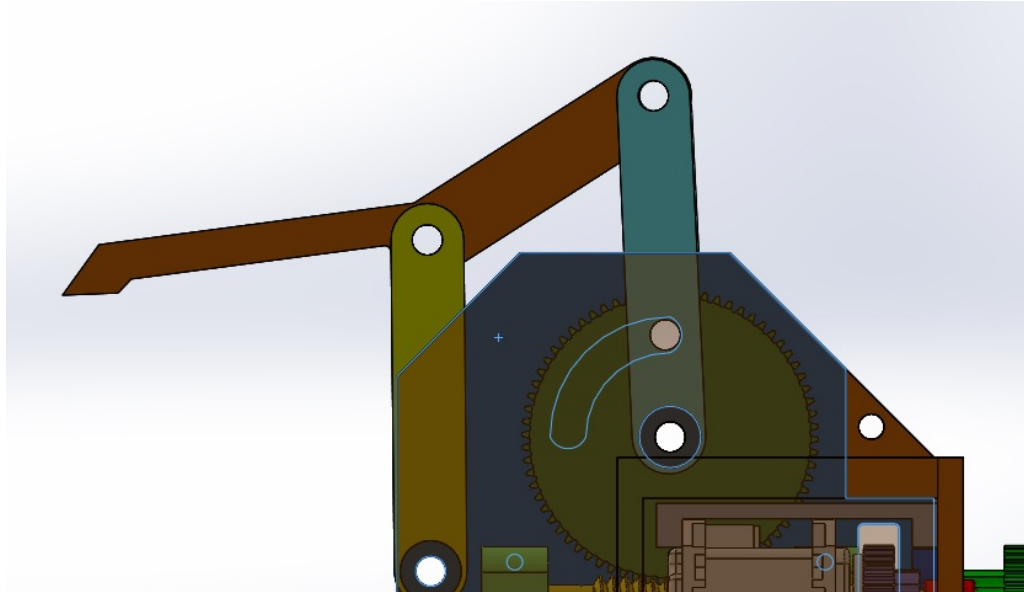


Figura 4.25: Fim de curso mecânico limitando a abertura do gripper.

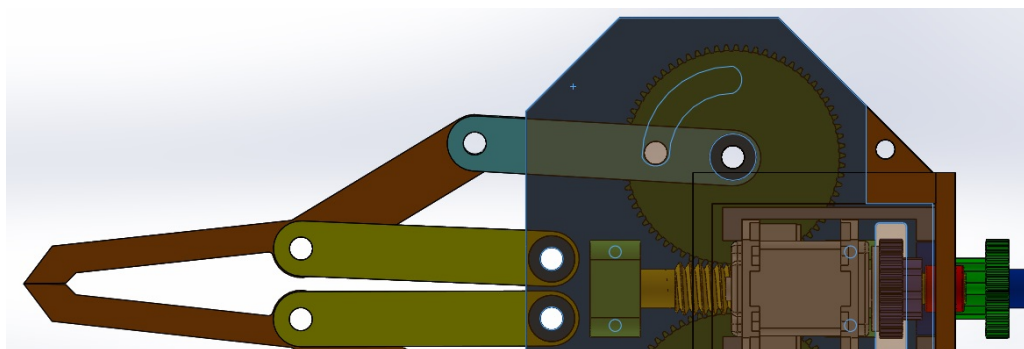


Figura 4.26: Fim de curso mecânico limitando o fecho do gripper.

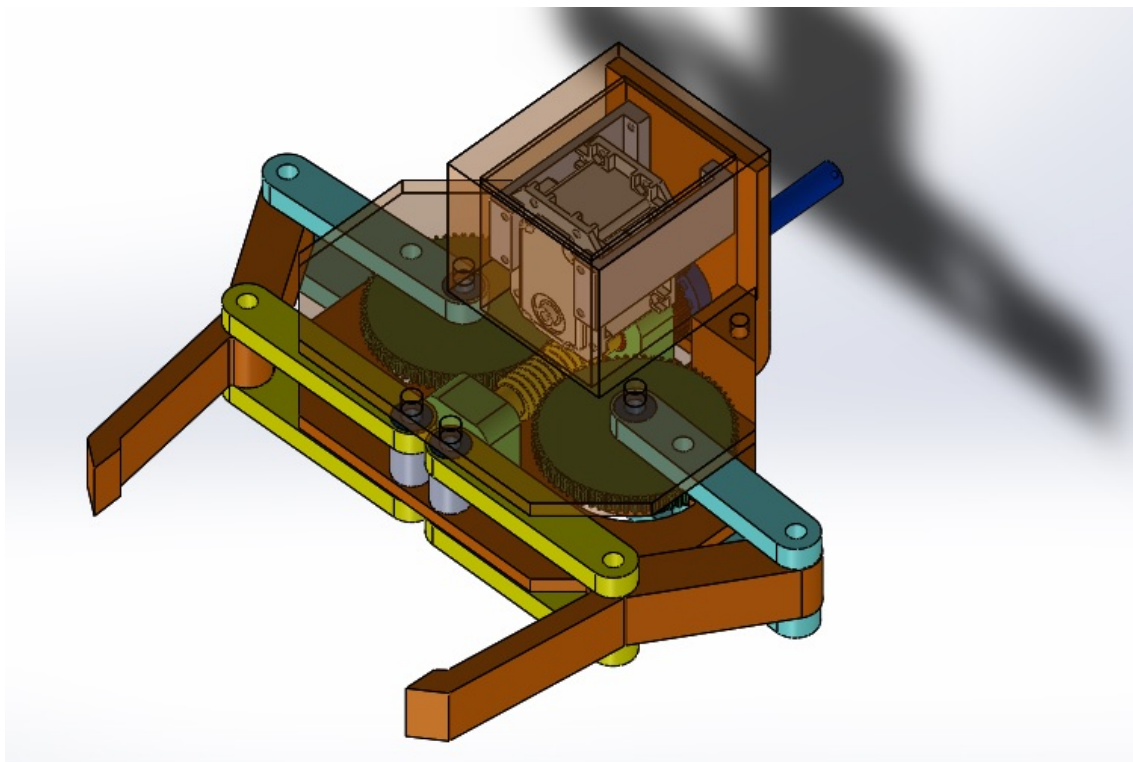


Figura 4.27: Montagem final do gripper V2 em SolidWorks.

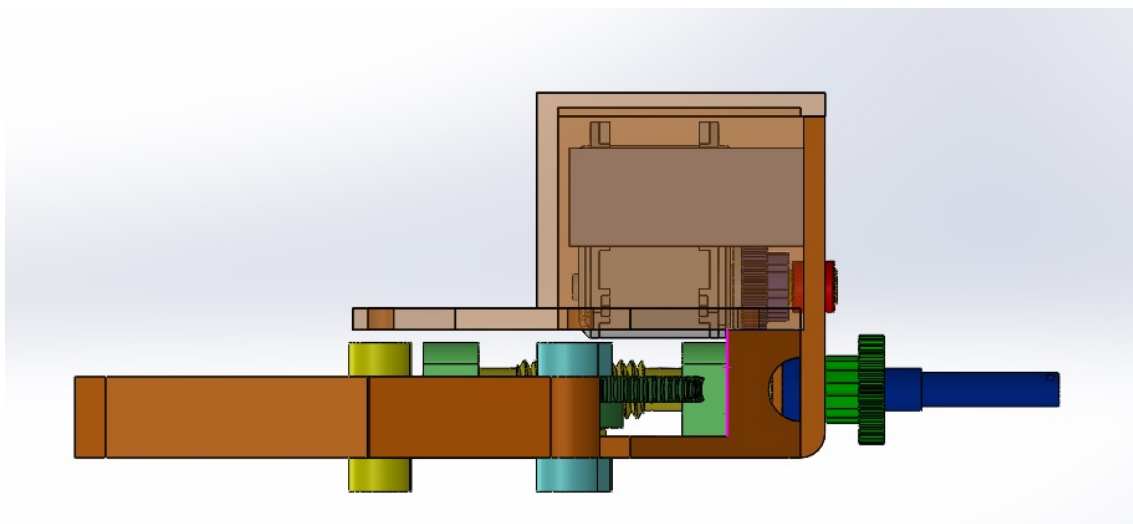


Figura 4.28: Montagem final do gripper V2 em SolidWorks (vista lateral).

4.5 Gripper V2 e manipulador

Construído o gripper, foi necessário dotá-lo dos movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*. Neste subcapítulo apresenta-se o manipulador projetado em SolidWorks.

4.5.1 Mecanismo para movimento do gripper segundo a direção de rotação de *ROLL*

O mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* encontra-se representado na figura 4.29.

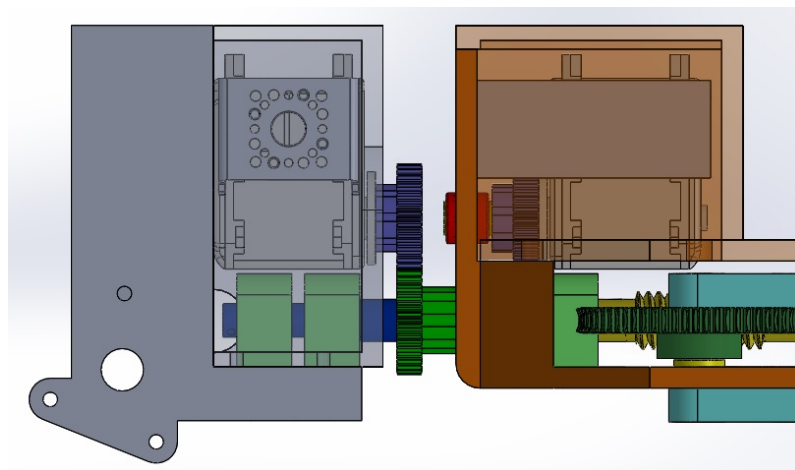


Figura 4.29: Mecanismo utilizado para dotar o gripper segundo a direção de rotação de *ROLL*.

Como já supracitado em 4.4.5, de forma a resolver o problema 1, criou-se uma peça que faz o acoplamento entre o gripper e o manipulador. Esta pode ser vista na figura 4.30. Esta peça é composta por uma chapa arredondada e com uma furação específica que é soldada a um veio de 10mm, e que a uma distância definida foi maquinado para 8mm. Esta peça é aparafusada à base do gripper a partir de dentro deste. Do lado de fora deste é aparafusada uma roda dentada HPC G0.8-30, ficando fixa à base do gripper. Será por meio desta que o motor à esquerda apresentado na figura 4.29 fará o veio girar. O veio de 8mm deste gripper encontra-se a girar em dois rolamentos SKF 0810. Estes, assim como as respectivas chumaceiras, são iguais aos utilizados para fixar o fuso sem fim. A razão porque o veio é de 10mm e parte dele é maquinado para 8mm prende-se ao facto de ser necessário fixa-lo na horizontal, por forma a que as duas rodas dentadas HPC G0.8-30 se mantenham alinhadas. Do outro lado para bloquear o veio, foi colocada uma grupilha. Na figura 4.31 encontra-se três fases do funcionamento deste mecanismo. É de salientar que este mecanismo permitiria que o gripper girasse teoricamente sem fim, mas derivado da limitação dada pela torção dos cabos do motor de abertura e fecho da garra, tal não será possível. O servo-motor utilizado foi um Dynamixel RX-24F.

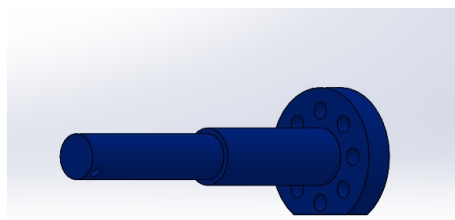


Figura 4.30: Peça usada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador.

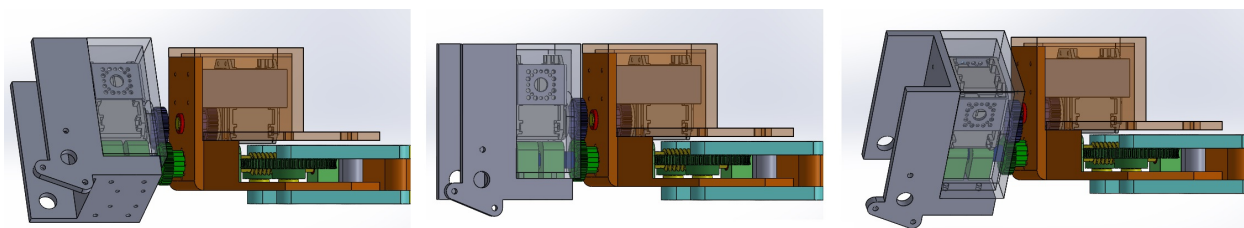


Figura 4.31: Mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento segundo a direção de rotação de *ROLL*, em funcionamento.

4.5.2 Mecanismo para movimento do gripper segundo a direção de rotação de *PITCH*

O mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento de *PITCH* encontra-se representado na figura 4.32.

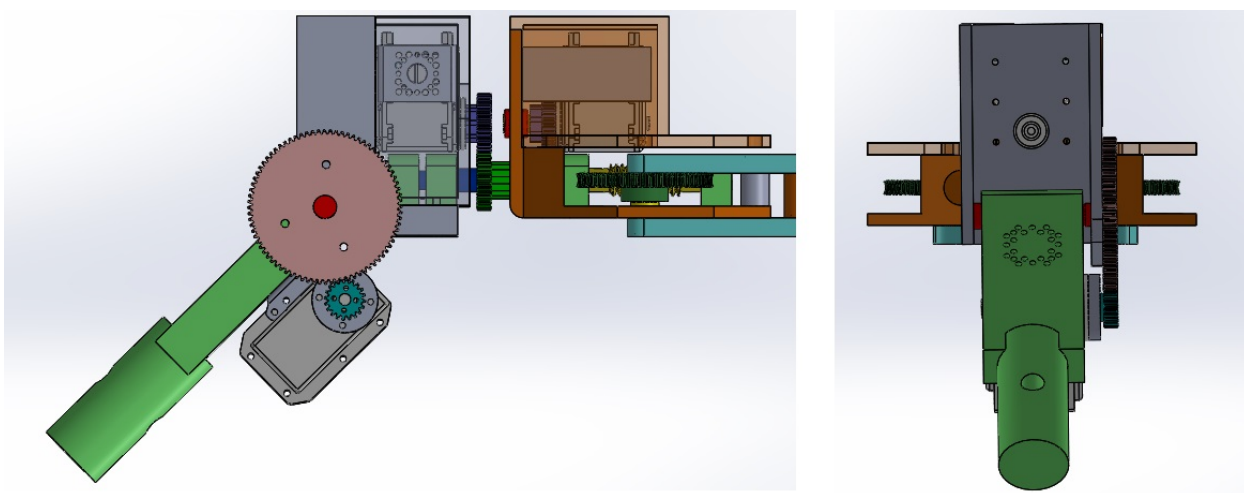


Figura 4.32: Mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento de *PITCH* (vista lateral e traseira).

Uma roda dentada HPC G0.8-80 (representada a cor-de-rosa) foi aparafusada à estrutura responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *ROLL*. Um veio de 10mm (representado a vermelho) foi cravado nesta mesma estrutura. No braço (representado a verde) foi feita uma furação de 11mm e cravados dois rolamentos de agulhas SKF 1012, um em cada extremo. Tal é apresentado na figura 4.33, sendo que o braço está numa vista transparente para ser possível a visualização dos rolamentos e do veio. Este braço serve como chumaceira e rodará em torno do veio (representado a vermelho) cravado na estrutura.

Para efetuar a transmissão do movimento de *PITCH*, foi utilizado um servo-motor Dynamixel RX-64 aparafusado ao braço através de um bracket da ROBOTIS. Como supracitado em 4.1, este servo-motor permite exercer um torque máximo de 64 kg*cm. Considerando que, tal como mencionado em 2.1, o peso máximo estipulado de um engenho a manipular é de 5kg e dado que a distância do eixo de rotação do servo à ponta da garra fechada é de 33.2cm, verifica-se que: o peso máximo que este servo-motor conseguiria manipular seria aproximadamente de 2kg. Para aumentar este valor, foi concebida uma caixa com uma relação de 1:4, aumentando este valor para 8kg (contando com o valor final do gripper e estrutura responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *ROLL*). O que foi feito foi utilizar uma roda dentada HPC G0.8-20 (representada a verde na figura 4.32) aparafusada ao servo-motor e a fazer transmissão do movimento à roda dentada HPC G0.8-80 presa à estrutura.

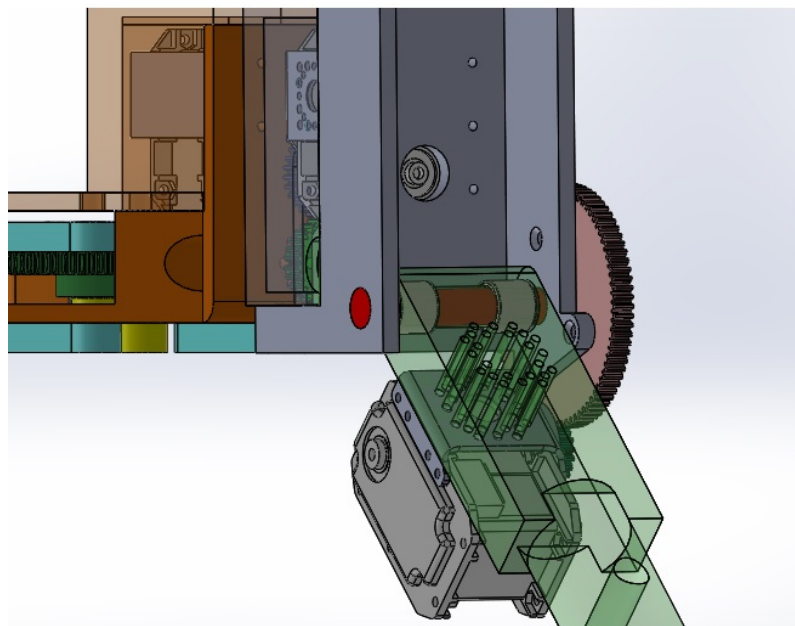


Figura 4.33: Mecanismo utilizado para dotar o gripper do movimento de *PITCH* (vista pormenorizada).

Como supracitado em 2.1, o local para a colocação do manipulador e gripper traduz-se num cilindro oco cujo diâmetro interno é de 31.6mm. Por esta razão, o braço (representado a verde) foi concebido com um diâmetro externo de 30mm para permitir o encaixe. O tipo de encaixe será por

encaixe rápido através de uma cavilha, razão pela qual o braço tem um furo na sua parte superior. Este braço encontra-se ilustrado na figura 4.34.

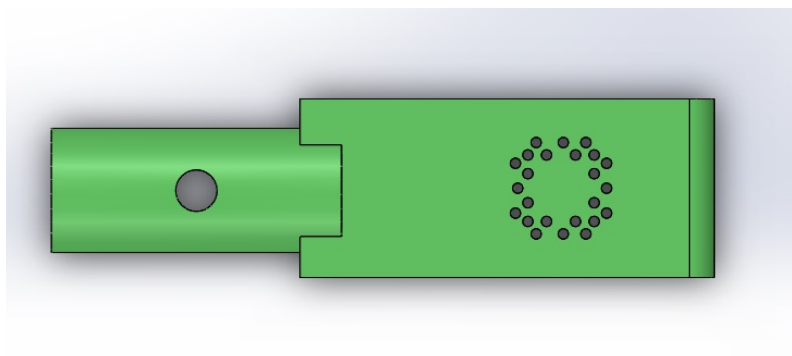


Figura 4.34: Peça que permite o acoplamento entre o manipulador e o braço extensível do robô da GNR (vista de cima).

4.5.3 Assemblagem final

Na figura 4.35 encontra-se a montagem final do gripper e manipulador V2 em SolidWorks já com as tampas de proteção.

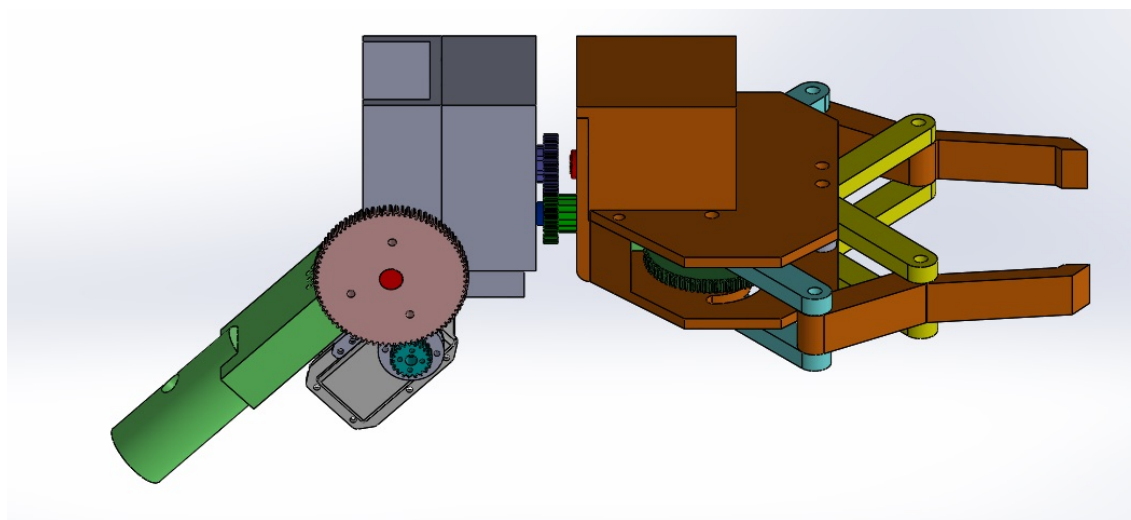


Figura 4.35: Montagem final do gripper e manipulador V2 em SolidWorks.

4.6 Impressão e montagem

Depois de impresso numa impressora 3D, a segunda versão do protótipo do gripper e manipulador foi montada. Para simular o braço do robô da GNR, foi utilizado um manipulador da ABB pertencente ao INESC TEC. Para tal foi preciso fazer uma peça que permitisse interligar este com

o manipulador concebido. Na figura 4.36 apresenta-se essa mesma peça. Na figura 4.37 apresenta-se o resultado final da última versão do protótipo impresso, montado e acoplado ao manipulador da ABB. Por fim, na figura 4.38 apresenta-se ao pormenor o gripper, o mecanismo responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* e o mecanismo do movimento segundo a direção de rotação de *PITCH*, respetivamente.

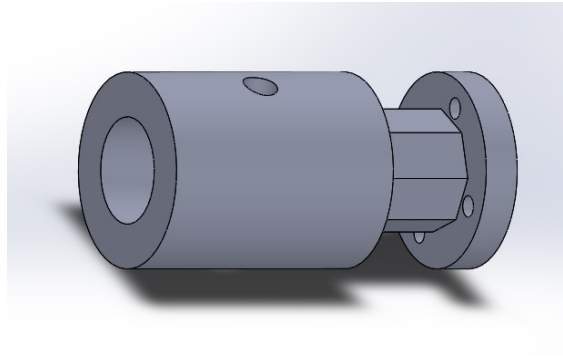


Figura 4.36: Peça que permite a acoplação do gripper e manipulador V2 impresso ao manipulador da ABB (em SolidWorks).

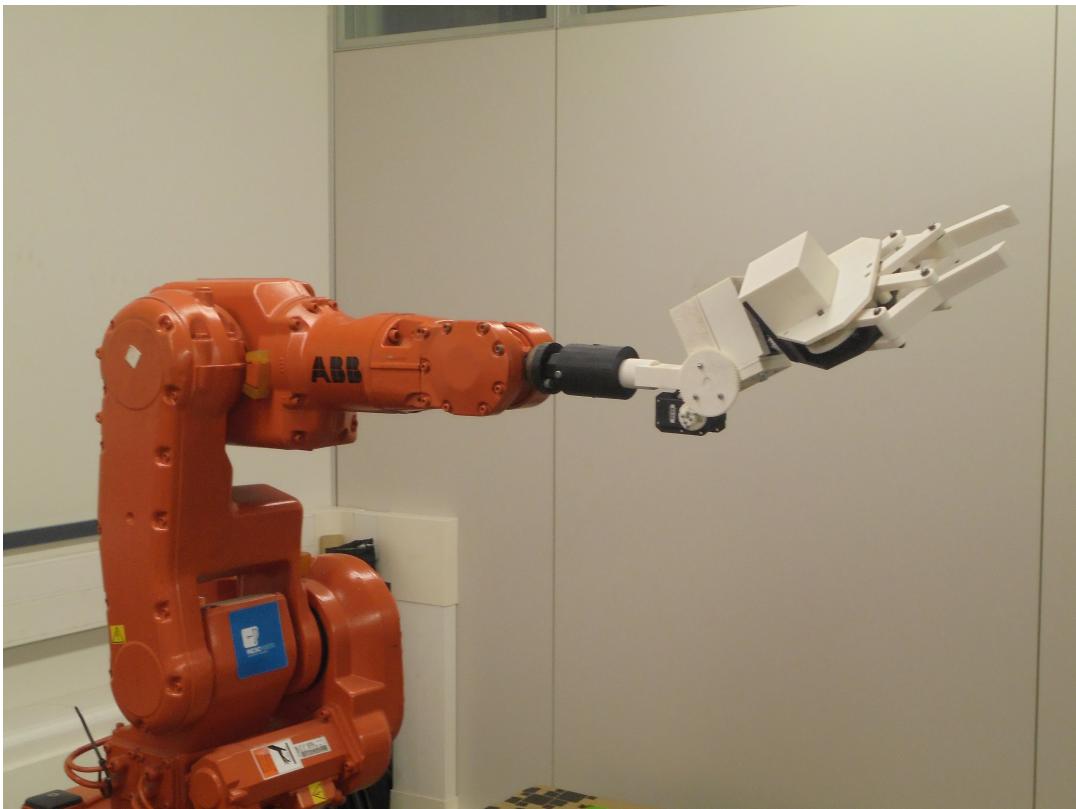


Figura 4.37: Resultado final do protótipo V2 impresso, montado e acoplado ao manipulador da ABB.

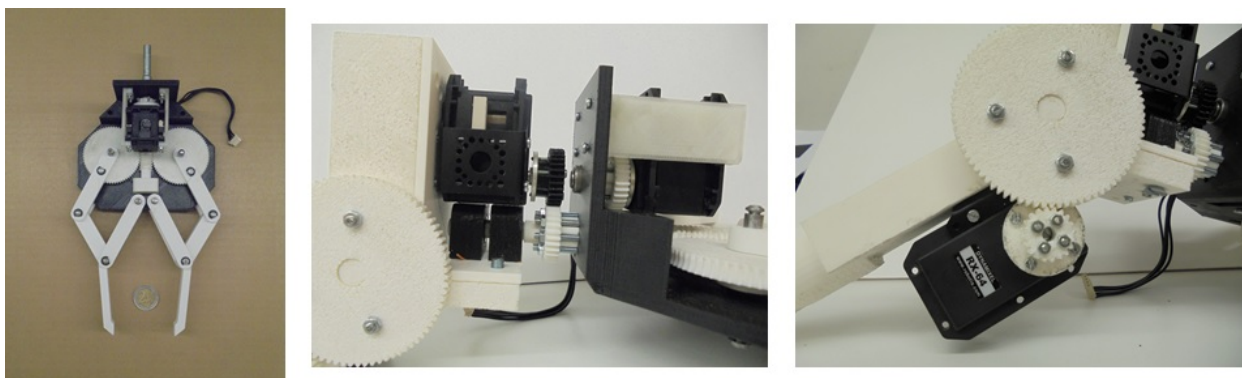


Figura 4.38: Gripper, mecanismo responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* e segundo a direção de rotação de *PITCH*, respetivamente, ao pormenor.

4.7 Maquinagem de Peças

Todas as rodas dentadas HPC e o fuso sem fim HPC SW0.8-1 utilizados neste projeto necessitarão de ser maquinados. A maquinagem vai desde corte, a furação, bem como desgaste de uma secção para uma secção inferior. Com o objetivo de auxiliar uma futura maquinagem de peças, este subcapítulo foi criado. Todas as informações relativas à alteração das rodas dentadas e do fuso sem fim HPC SW0.8-1 estão disponíveis no anexo B. Neste subcapítulo encontra-se a única peça que foi maquinada antecipadamente em alumínio e que é utilizada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador.

4.7.1 Peça usada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador

Dado que todo o peso suportado pelo gripper é suportado pelo veio referente à figura 4.30, esta peça foi maquinada em alumínio e incluída no protótipo. Inicialmente este foi impresso na impressora 3D, mas o esforço sobre este era notório, não aguentando que fossem efetuados testes. Na figura 4.39 apresenta-se o resultado dessa maquinagem.

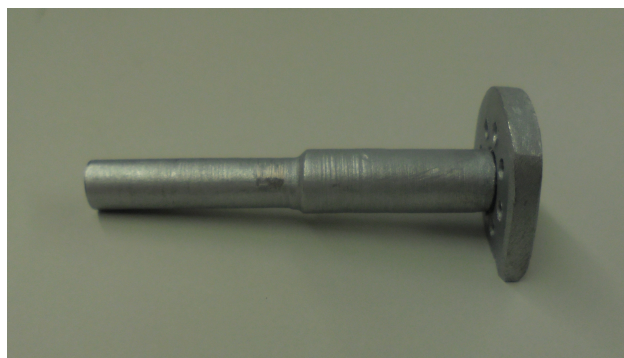


Figura 4.39: Peça usada para fazer o acoplamento entre o gripper e o manipulador, referente à figura 4.30, maquinada em alumínio.

Capítulo 5

Sistema de monitorização e interface de operações

Neste capítulo é apresentada a conceção de um sistema que permite a monitorização e manipulação de forma remota do manipulador e do gripper projetado e construído no capítulo 4, ilustrado na figura 4.37.

Após ter sido elaborado um levantamento de requisitos no capítulo 2 e construído um protótipo de um gripper e de um manipulador no capítulo 4, idealizou-se e desenvolveu-se um sistema que permitisse a interação do utilizador com a plataforma robótica. Este sistema encontra-se dividido em dois subsistemas: interface com o utilizador e sistema implementado no robô. O primeiro é constituído por um computador portátil e um gamepad sem fios, enquanto que o sistema implementado na plataforma é constituído por um Raspberry Pi 3, um controlador, três servo-motores, duas câmaras e um router.

5.1 Arquitetura do Sistema

5.1.1 Disposição do sistema

Como supracitado no início deste capítulo, este sistema encontra-se dividido em duas partes: interface com o utilizador e sistema implementado na plataforma robótica. O sistema concebido encontra-se representado na figura 5.1.

A interface de utilizador, é constituído por um PC, no qual é executada uma aplicação com uma GUI. Esta permite definir a velocidade e torque a ser exercido por cada motor, bem como verificar o estado de cada um deles em relação à temperatura e tensão de alimentação. Nesta encontram-se também integradas as imagens obtidas pelo sistema de monitorização remota. Esta interface compreende também a utilização de um gamepad sem fios, que conectado ao PC permite acionar o movimento, de forma independente, de cada servo-motor.

Dado que o utilizador fará o controlo e monitorização do robô de forma remota através da interface de utilizador, foi necessário que o sistema implementado na plataforma robótica fosse

compacto e permitisse ser controlado e monitorizado à distância. Desta forma, este sistema é composto por um computador em placa única, um Raspberry Pi 3, ao qual se encontram conectados por ligações cabladas o controlador e as duas câmaras, Mako e RPi NoIR Camera. Ao controlador encontram-se conectados, por ligações igualmente cabladas, os três servo-motores (dois Dynamixel RX-24F e um Dynamixel RX-64). Com o objetivo de máxima portabilidade, os subsistemas comunicam através de ligações sem fios. Dado que, como especificado em 2.3, o sistema deve permitir ser acedido remotamente a uma distância de 100m, foi colocado um router no robô, no qual foi criada uma rede encriptada que permite a comunicação entre os dois subsistemas.

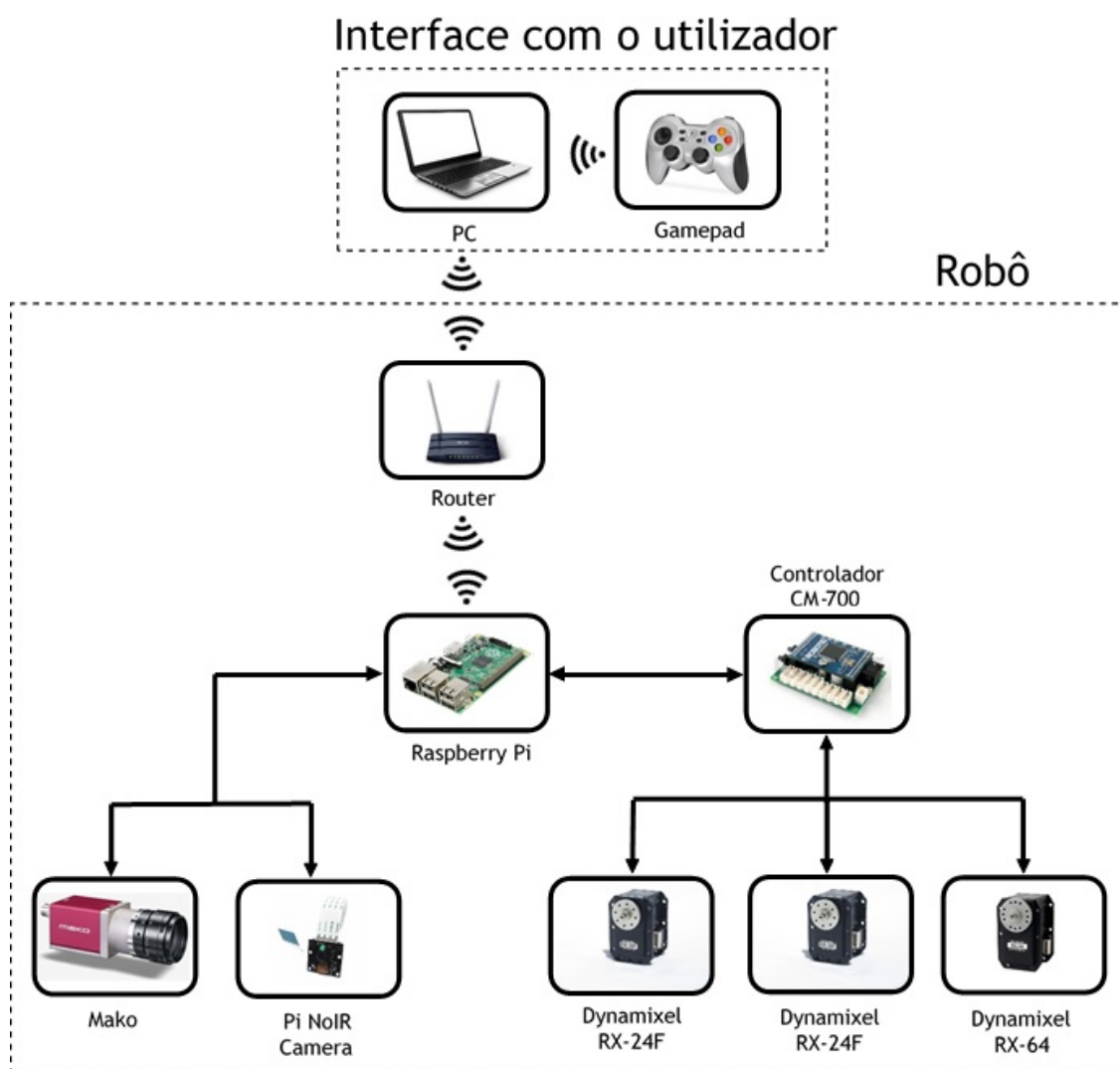


Figura 5.1: Sistema de monitorização remota e interface de operações.

5.1.2 Funcionamento do sistema

O sistema foi concebido com o propósito de ser portátil e funcional. O funcionamento deste baseia-se no modelo mestre/escravo. Desta forma, o utilizador através da interface com o utilizador envia ordens/pedidos ao controlador, que os interpreta e atua nos servo-motores. Dado que o controlador utiliza um protocolo de comunicação série e o PC comunica através de um protocolo TCP/IP, no Raspberry Pi foi implementada uma gateway que permite a comunicação entre o PC e o controlador, ao fazer a conversão entre protocolos. No RPi encontram-se também conectadas duas câmaras, Mako e RPi NoIR Camera. As imagens adquiridas são transmitidas pelo Raspberry Pi para o PC e apresentadas na GUI.

Dada a complexidade do sistema, optou-se por começar pelo controlo e programação de baixo nível. Desta forma este capítulo começará por abordar os atuadores (servo-motores) e respetivo controlador, seguido do sistema de monitorização composto pelas câmaras: Mako e RPi NoIR Camera. De seguida, será apresentada a gateway implementada no Raspberry Pi e abordados os controlos de seguranças, implementados ao nível do router, para proteger o sistema de comunicações. Por fim, apresenta-se o desenvolvimento do sistema de interface com o utilizador, composto pela aplicação que é executada no PC e pelo gamepad que permite o controlo do gripper e do manipulador.

5.2 Atuadores e Controlador

Como supracitado no capítulo 4, os atuadores escolhidos foram servo-motores da Dynamixel. Esta escolha baseou-se na precisão, peso, relação tamanho-força destes e por permitirem realizar controlo por velocidade e por torque. Outra razão foi terem certos sensores embutidos, permitindo efetuar leituras da velocidade, carga, tensão de alimentação e temperatura atual do servo-motor.

5.2.1 Dynamixel RX-24F

Dois servo-motores Dynamixel RX-24F foram adquiridos para executar a função de abertura e fecho do gripper e o movimento segundo a direção de rotação de *ROLL*. Um exemplo destes encontra-se representado na figura 5.2. As suas principais especificações mecânicas, elétricas e de controlo encontram-se disponíveis na tabela C.1, no anexo C.

5.2.2 Dynamixel RX-64

Um servo-motor Dynamixel RX-64 foi utilizado para executar o movimento segundo a direção de rotação de *PITCH*. Um exemplo destes ilustra-se na figura 5.3. As suas principais especificações mecânicas, elétricas e de controlo encontram-se disponíveis na tabela C.2, no anexo C.



Figura 5.2: Servo-motor Dynamixel RX-24F[17].



Figura 5.3: Servo-motor Dynamixel RX-64[17].

5.2.3 Controlador CM-700

O controlador utilizado foi o recomendado e também produzido pela ROBOTIS para controlar os servo-motores Dynamixel. Juntamente com este foi adquirido uma sub-board, que permite a conexão deste aos servos e um conversor porta-série USB (LN-101) para conectar o controlador ao Raspberry Pi, através de uma porta USB. Na figura 5.4 ilustra-se o controlador e sub-board CM-700 e na figura 5.5 o conversor LN-101.

5.2.4 Programação

O programa implementado no controlador CM-700 foi elaborado em linguagem de programação C, utilizando o IDE Atmel Studio 7.0¹. Para este controlador são fornecidas bibliotecas pela ROBOTIS, em [33], que facilitam a escrita e leitura do mapa de registos dos servo-motores Dynamixel. Este mapa de endereços, disponibilizado em [22] - "Control Table", é comum a todos os Dynamixel, uniformizando a utilização destes para o utilizador. Desta forma, é apenas necessário

¹www.atmel.com/Microsite/atmel-studio



Figura 5.4: Controlador e sub-board Dynamixel CM-700[17].



Figura 5.5: Conversor USB porta-série Dynamixel LN-101[17].

conhecer o ID de cada servo-motor para aceder e atuar no seu mapa. Através destes registos é possível configurar os modos de funcionamento (por graus/joint mode ou por rotação contínua/wheel mode), definir a posição objetivo em graus, definir velocidades e torques a exercer, bem como fazer leituras da temperatura e da tensão de alimentação atual do servo-motor, da posição ou da velocidade atual, entre outros. O estado dos registos é guardado, permitindo a atuação de vários servos em simultâneo. Inicialmente foi instalado o software RoboPlus, disponibilizado online e gratuitamente, em [34], pela ROBOTIS. Através deste foi possível atuar no mapa de registos de cada servo-motor, efetuar alguns testes e alterar o seu ID. Este software foi igualmente útil para executar o upload do ficheiro .hex gerado apartir do IDE Atmel Studio para o controlador CM-700. Todas as informações necessárias para upload de ficheiros .hex para o controlador, encontram-se disponibilizadas na secção "Programming", em [16].

O código implementado no controlador baseia-se na receção de uma ordem numerada, que o controlador recebe apartir da interface com o utilizador, que é interpretada e por fim atuada nos servo-motores. O algoritmo concebido ilustra-se em 1, sendo que o servo-motor 1 se refere ao atuador responsável pela abertura e fecho da garra, o servo-motor 2 ao atuador responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *ROLL* e o servo-motor 3 ao atuador responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *TILT*.

Definir valores por defeito da velocidade e torque dos servo-motores 1, 2 e 3;

Configurar e inicializar porta-série;

Configurar servo-motores 1, 2 e 3 como free-wheel;

while 1 do

 Ler ordem;

switch ordem do

case 1 do

 Ler configuração da velocidade e do torque dos servo-motores 1, 2 e 3;

 Atualizar o valor da velocidade e do torque nos respetivos registos dos servo-motores 1, 2 e 3.

end

case 2 do

 | Servo-motor 1 roda no sentido CW.

end

case 3 do

 | Servo-motor 1 pára.

end

case 4 do

 | Servo-motor 1 roda no sentido CCW.

end

case 5 do

 | Servo-motor 2 roda no sentido CW.

end

case 6 do

 | Servo-motor 2 pára.

end

case 7 do

 | Servo-motor 2 roda no sentido CCW.

end

case 8 do

 | Servo-motor 3 roda no sentido CW.

end

case 9 do

 | Servo-motor 3 pára.

end

case 10 do

 | Servo-motor 3 roda no sentido CCW.

end

case 11 do

 Ler valores de temperatura atual dos servo-motores 1, 2 e 3;

 Ler valores de tensão de alimentação dos servo-motores 1, 2 e 3;

 Retornar valores de temperatura atual dos servo-motores 1, 2 e 3;

 Retornar valores de tensão de alimentação dos servo-motores 1, 2 e 3.

end

end

end

Algoritmo 1: Algoritmo implementado no controlador CM-700.

5.2.5 Controlos de segurança

Com o objetivo de proteger o gripper (limitar a abertura e fecho máximo) e o servo-motor RX-24F responsável pela abertura e fecho deste, além de um controlo de segurança mecânico (fim-de-curso projetado no capítulo anterior, em 4.4.6), pensou-se em controlos de segurança por software. Certos controlos foram pensados e testados. As opções consideradas foram:

- **Através da leitura de velocidade:**

O controlo por velocidade funciona razoavelmente bem para baixas velocidades e torques, no qual quando o motor é abrandado, resultado de uma força exercida num sentido contrário ao seu movimento, o valor de velocidade lido é inferior ao valor de velocidade estipulada pelo utilizador. Quando o motor não consegue desenvolver trabalho, devido à elevada componente dessa mesma força, a velocidade lida é zero. Porém, para altas velocidades e torques, derivado da inércia, o tempo que decorre desde a deteção à atuação no servo-motor pode não ser suficientemente curto para uma proteção eficaz deste e do gripper.

- **Através da leitura da carga:**

O controlo por carga não pode ser usado, pois como mencionado em [22]: "Notes: Current load is inferred from the internal torque value, not from Torque sensor etc. For that reason, it cannot be used to measure weight or torque; however, it must be used only to detect which direction the force works.", a carga atual é deduzida a partir do valor de torque exercido e não de um sensor de torque. Por essa razão, esta leitura não pode ser utilizada para medir a carga ou o binário.

- **Através da leitura do torque:**

O controlo por torque ou binário também não pode ser usado porque este, como mencionado na leitura por carga, não é medido mas apenas exercido.

- **Através da leitura da corrente:**

O controlo por corrente não pode ser usado dado que os servo-motores em questão não se encontram equipados com sensores que permitam efetuar este tipo de medidas.

5.2.6 Conclusões e problemas encontrados

Dada a dificuldade de se conceber um controlo de segurança eficiente e robusto através das leituras de sensores dos servo-motores, a melhor solução passará possivelmente por se utilizar sensores externos como um fim de curso na abertura da garra e um sensor de força/pressão que permitam medir a força exercida no fechar do gripper. A utilização destes não se encontra contemplada na parte prática desta dissertação, sendo proposta como trabalho futuro.

Outro problema detetado é que quando os motores não estão em movimento, ainda que em carga, estes tendem a perder força e girar livremente. De forma a resolver esse problema configurou-se a velocidade objetivo a zero. Porém a força para manter essa velocidade é baixa, levando a que

com o peso do gripper para o caso do servo-motor responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *PITCH*, este perca força e a posição não seja mantida. Uma possível solução seria fazer a leitura da posição, e no modo "angle", tentar mantê-la. Esta opção foi testada e constatou-se que quando essa posição é muito perto de 0 ou 1023, o servo-motor tem tendência a girar e ajustar no sentido oposto, fazendo com que dê uma volta completa. Uma das soluções mais indicadas seria possivelmente usar um encravamento mecânico através de um eletroímã que, assim que os motores deixassem de ser utilizados, bloqueava na posição em que se encontrava. Outra solução seria, como referido em 4.3, o uso de um fuso e rodas helicoidais, em que a posição é sempre mantida quando o fuso está parado, não sendo necessário alimentar continuamente o servo-motor para mantê-la.

5.3 Sistema de monitorização

No levantamento de requisitos foi requerido que o sistema de monitorização efetuasse streaming em tempo-real e fosse composto por uma câmara de vídeo colocada sobre o braço, que permitisse uma visão ampla do manipulador e da garra (MAKO). Foi sugerida uma segunda câmara que permitisse uma visão macro da garra (RPi NoIR Camera). Estas câmaras encontram-se ligadas ao Raspberry Pi através de ligações cabladas: Mako por meio de uma ligação Ethernet e RPi NoIR Camera por meio de um flexible flat cable recorrendo a um conector reservado na board do RPi especialmente para esta câmara. Ambas comunicam com o PC através do protocolo TCP/IP.

5.3.1 MAKO

A câmara MAKO ainda que presente no projeto e faça sentido ser mencionada no sistema, não foi responsabilidade desta dissertação. Desta forma, a configuração desta, as ligações ao RPi e o desenvolvimento da aplicação para obtenção das imagens e controlo desta câmara pelo utilizador foram desenvolvidas à parte. Tal como requerido em 2.2, a câmara MAKO encontra-se projetada para ser colocada sobre o braço e estará disponível no robô tanto para a manipulação dos engenhos explosivos, como para a detonação dos mesmos.

5.3.2 Raspberry Pi NoIR Camera

Dada a necessidade de se obter uma visão macro do gripper, que permitisse visualizar a abertura e fecho deste, foi sugerida uma segunda câmara. Esta câmara, Raspberry Pi NoIR Camera Rev1.3 (Raspicam), ilustrada na figura 5.6, foi escolhida pelo baixo preço e pela facilidade com que seria integrada no sistema. Como características temos uma resolução de 5 megapixels, capaz de capturar fotografias de 2592x1944 pixels e capturar vídeo com resoluções de 1080p a 30fps, 720p a 60fps e 640x480p a 60 ou 90fps. Dado que esta não aplica um filtro de infravermelhos como o próprio nome dela indica NoIR, que significa "No Infrared", esta permite visão noturna ao ser utilizada conjuntamente com luzes de infravermelhos. Como já supracitado, esta encontra-se

fisicamente ligada ao Raspberry Pi por meio de um flexible flat cable recorrendo a um conector reservado na board do RPi especialmente para esta câmara. Esta ligação apresenta-se na figura 5.7. Depois de conetada fisicamente, esta foi ativada no RPi acedendo a "Menu->Preferences->Raspberry Pi Configuration->Interfaces" e em "Camera" colocando "Enabled".

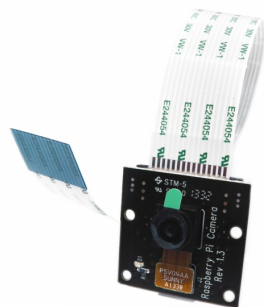


Figura 5.6: Raspberry Pi NoIR Camera v1.3 que permite obter uma visão macro do gripper[18].



Figura 5.7: Ligação da câmara Raspberry Pi NoIR Camera v1.3 ao RPi[18].

Para efetuar streaming a partir da câmara para o Raspberry Pi, foi utilizado um servidor de streaming através de UV4L. UV4L, que significa "User space Video4Linux collection", foi concebido a partir da V4L ("Video4Linux"), que se traduz como uma coleção de drivers e uma API com o objetivo de suportar streaming em tempo-real em sistemas baseados em LINUX. UV4L é descrito como uma interface standard para Linux, com front-end web sobre HTTP/HTTPS. Com a sua evolução foi criado um servidor de streaming suportado por esta coleção, que inclui diversas ferramentas providenciando um conjunto de soluções/serviços para streaming de vídeo e áudio. Na figura 5.8 ilustra-se o servidor de vídeo UV4L com as diversas soluções para streaming que este apresenta. Na figura 5.9 ilustra-se um dos serviços do servidor, o "Control Panel", que permite controlar e configurar o serviço de streaming da imagem. Estes controlos traduzem-se em definir a resolução e formato, bem como configurar o contraste, o brilho, frame rate, entre outros, da imagem.

Depois de instalado no Raspberry Pi o package UV4L é necessário, através da linha de comandos do RPi, configurar o servidor. Esta configuração prende-se ao tipo de encriptação da imagem,

UV4L Streaming Server

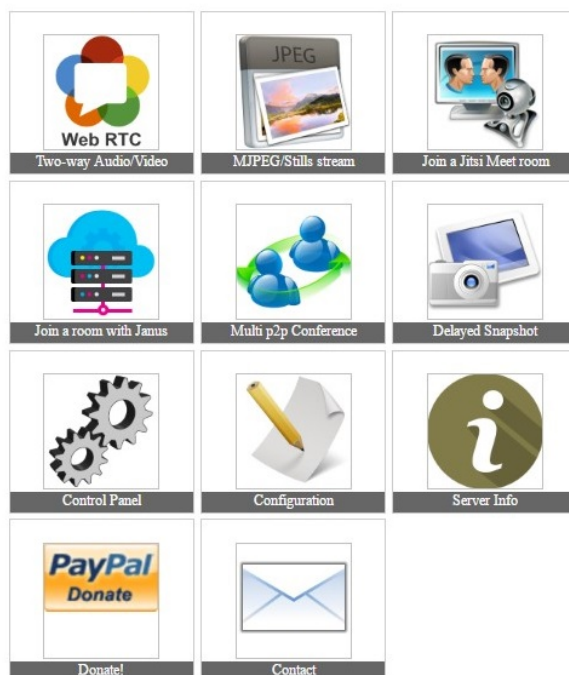


Figura 5.8: Servidor de vídeo UV4L com as diversas soluções/serviços para streaming.

Camera Control Panel

Resolution & Format
width(640) height(480) format(JPEG Still (streamable))
NOTE: if the camera is already in use for streaming by another application/client, applying the resolution & format will not have any effect (until all the streaming sessions have been closed).

Control settings:
brightness
contrast
saturation
red balance
blue balance
sharpness
rotate
shutter speed
zoom factor
iso sensitivity
jpeg quality
frame rate
horizontal mirror
vertical mirror
text overlay
object face detection
multi denoise
video denoise
image stabilization
awb mode
exposure mode
exposure metering
drc strength
Note:

- If you want to turn on *text-overlay* while the camera is in use by another application AND *text-overlay* was turned off when that application opened the Camera, you need to close that application first. The same consideration is valid for *object-detection* (face detection by default). In case, you can also turn on these options when loading the driver.
- When *text-overlay* is enabled, the image width should be multiple of 16.
- red-balance* and *blue-balance* have effect only when *awb* mode is set to off.
- Many other controls are available on driver loading only.

Check to apply resolution, format and changed settings only; uncheck to reapply everything
Apply

Figura 5.9: Controlos e configurações que o servidor UV4L, através do serviço "Control Panel" permite exercer sobre os dispositivos de captura de vídeo.

resolução desta, porta TCP/IP para a qual será transmitida a informação, o máximo de conexões permitidas, entre outros. De seguida o servidor é ligado. Por fim, do lado do cliente, podemos ter acesso aos serviços do servidor, estando conectados na mesma rede, através do endereço IP do Raspberry Pi e a porta para a qual o servidor foi configurado para transmitir. Estes passos e comandos usados encontram-se, a título de exemplo, no anexo D.

5.4 Raspberry Pi

Como supracitado no início deste capítulo, foi necessário que o sistema implementado na plataforma robótica permitisse ser controlado e monitorizado à distância. Desta forma, este sistema é composto pelo computador em placa única Raspberry Pi 3, ao qual se encontra conectado, como mencionado em 5.2.3, o controlador CM-700 através do conversor porta-série USB LN-101. Ao RPi encontra-se também conectado, como mencionado em 5.3, o sistema de monitorização composto pelas duas câmaras: MAKO e Raspicam. Como também supracitado, com o objetivo de máxima portabilidade, os sistemas comunicam através de ligações sem fios e devem, como especificado em 2.3, permitir comunicar a uma distância de 100m em "campo-aberto". Para cumprir este requisito foi necessário adicionar um router ao sistema implementado no robô e criar uma gateway, que efetuasse a conversão de TCP/IP para porta-série e de porta-série para TCP/IP, permitindo a comunicação entre o PC, onde é executada a aplicação de interface com o utilizador e o controlador dos servo-motores. Esta gateway foi implementada no RPi.

5.4.1 Gateway

No Raspberry Pi foi implementada uma gateway em linguagem de programação C++, recorrendo ao IDE Atmel Studio 7.0, que faz a conversão de TCP/IP para porta-série e de porta-série para TCP/IP, permitindo a comunicação entre o PC, onde é executada a aplicação de interface com o utilizador e o controlador dos servo-motores Dynamixel, ROBOTIS CM-700. O algoritmo do código implementado no computador em placa única RPi 3 ilustra-se em 2.

5.4.2 Router e encriptação das comunicações

O router implementado no sistema foi o TP-LINK AC1200 Archer C50, ilustrado na figura 5.10. Este foi escolhido por cumprir o requisito do alcance mínimo pretendido das comunicações, em 2.3, e pertencer ao padrão 802.11ac, que se apresenta como o mais recente, com maiores velocidades de transferência de dados e o menos suscetível a interferências. Tratando-se de um router dual-band, permite wireless na banda de 2.4GHz ou 5GHz.

Neste encontra-se criada uma rede sem fios privada, na qual o PC e o Raspberry Pi se conectam. Este último acede à rede do router através do seu módulo wifi, permitindo uma poupança na utilização de cabos e uma maior portabilidade. Por consequência do tamanho, o router terá de ficar num sítio diferente do proposto para o sistema concebido no robô, o que este tipo de ligações

```
Abrir e configurar porta-série;  
Inicializar socket;  
Criar estrutura do endereço;  
Fazer bind() ao socket;  
Fazer listen() ao socket, ficando à espera de ligações;  
while 1 do  
| Aceitar ligação de um cliente ao socket;  
| Criar thread e executar função Cliente();  
end  
Fechar porta-série; Fechar socket.
```

Função Cliente() :

```
while ligação ao socket aberta do  
| Ler do socket;  
| Enviar dados do socket para a porta-série;  
| Ler resposta da porta-série;  
| Escrever resposta no socket.  
end
```

Algoritmo 2: Algoritmo da gateway implementada no Raspberry Pi 3.

simplifica. De forma a que o endereço IP atribuído ao Raspberry seja sempre o mesmo, foi reservado um IP estático, atribuído pelo servidor DHCP, em função do endereço MAC do RPi. Esta opção ilustra-se na figura 5.11.

A utilização do router permitiu também conceder ao sistema de comunicações encriptação e um controlo de acessos ao meio, o que se traduz em segurança e robustez do sistema à invasão de intrusos. Estes controlos passaram por desativar o broadcast do SSID, tornando a rede oculta, seguida de uma implementação de uma autenticação à rede (SSID e palavra-passe). Por fim, aplicou-se um controlo por endereços MAC do PC e do RPi para acesso à rede. Este controlo encontra-se ilustrado na figura 5.13.



Figura 5.10: Router TP-LINK AC1200 Archer C50[19].

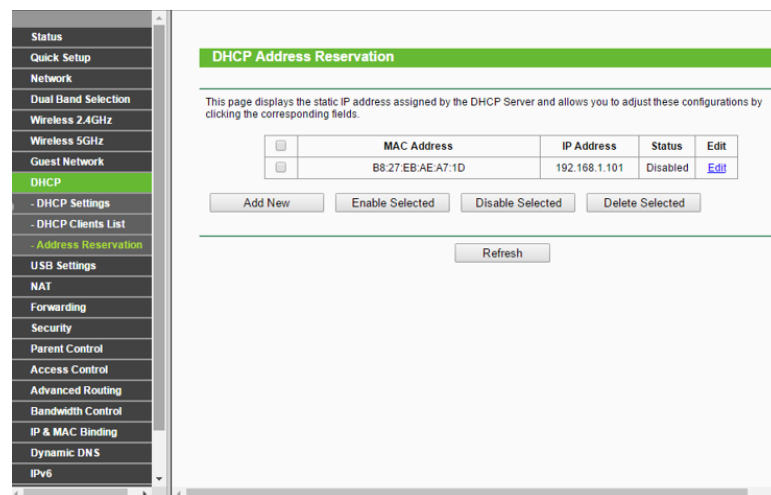


Figura 5.11: Reserva de um endereço IP estático, atribuído pelo servidor DHCP, em função do endereço MAC do RPI.

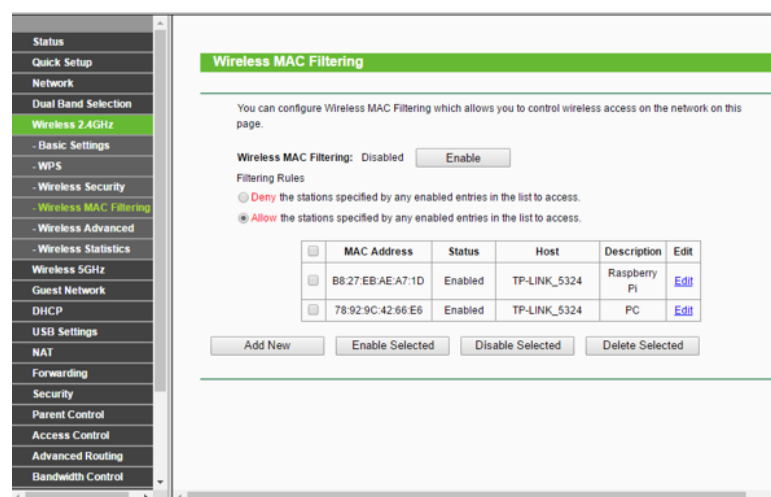


Figura 5.12: Controlo de acessos à rede sem fios encriptada recorrendo aos endereços MAC.

5.5 Interface com o utilizador

O sistema de interface com o utilizador, como supracitado em 5.1.1, é constituído por um PC, no qual é executada uma aplicação com uma GUI e por um gamepad sem fios, que conectado ao PC permite acionar o movimento, de forma independente, de cada servo-motor.

Em termos de aplicação requereu-se que fosse possível manipular remotamente a abertura e fecho do gripper, os graus de liberdade do manipulador (segundo as direções de rotação de *ROLL* e *PITCH*), configurar a velocidade e torque de cada servo-motor, bem como efetuar leituras do estado (temperatura e tensão de alimentação) destes. Foi pedida a transmissão em tempo-real das imagens do sistema de monitorização. A nível de movimentação, visto este sistema ser totalmente autónomo em relação ao sistema atualmente em funcionamento no robô, nada foi especificado.

5.5.1 Aplicação

A aplicação foi elaborada em linguagem de programação C++, recorrendo à framework multi-plataforma para desenvolvimento de interfaces gráficas Qt². A interface concebida foi projetada para ser simples e funcional. Esta, ilustrada na figura 5.13, figura 5.14 e figura 5.15, permite a abertura e fecho do gripper, manipulação dos servo-motores responsáveis pelos movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e *PITCH* e configurar a velocidade e torque a exercer por cada um destes servo-motores. Esta interface permite também efetuar leituras da temperatura e da tensão de alimentação de cada servo-motor e disponibiliza em tempo-real as imagens de parte do sistema de monitorização (RPi NoIR Camera).

Como já mencionado, a comunicação entre a aplicação e a gateway (RPi) foi feita através do uso de sockets, utilizando o protocolo TCP/IP. Para tal, utilizou-se a biblioteca QTcpSocket disponibilizada pela framework. A aplicação (cliente) liga-se ao host especificado na gateway (servidor) e envia ordens numeradas à gateway, que por sua vez faz a conversão entre protocolos e envia para o controlador, que as interpreta e atua nos servo-motores. Estas ordens são despoletadas por eventos, que se traduzem por ações desempenhadas nos botões da interface (se premidos ou se largados).

As imagens cedidas pelo sistema de monitorização foram inseridas na GUI da aplicação através do uso das bibliotecas QNetworkAccessManager, QUrl, QNetworkRequest e QNetworkReply. Através destas, é feito um pedido ao endereço IP configurado e guardada a resposta (imagem) desta já no formato e tamanho pré-definido. Esta é então carregada e apresentada na GUI da interface.

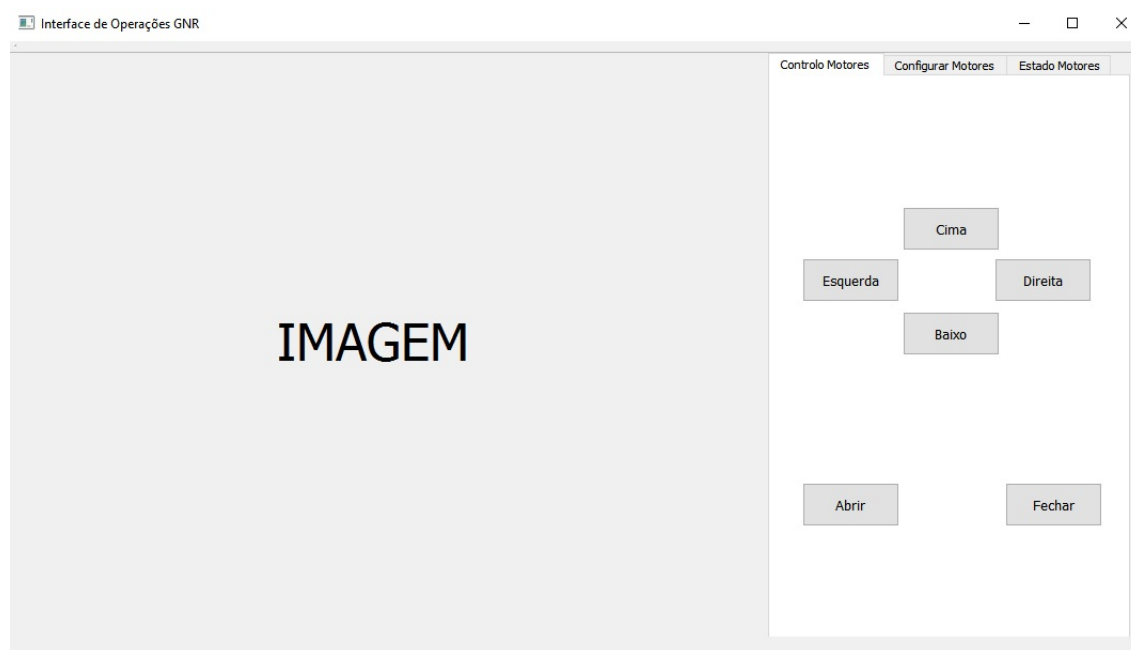


Figura 5.13: Interface da aplicação que permite o controlo do gripper e manipulador e a visualização da câmara do Raspberry Pi.

²www.qt.io

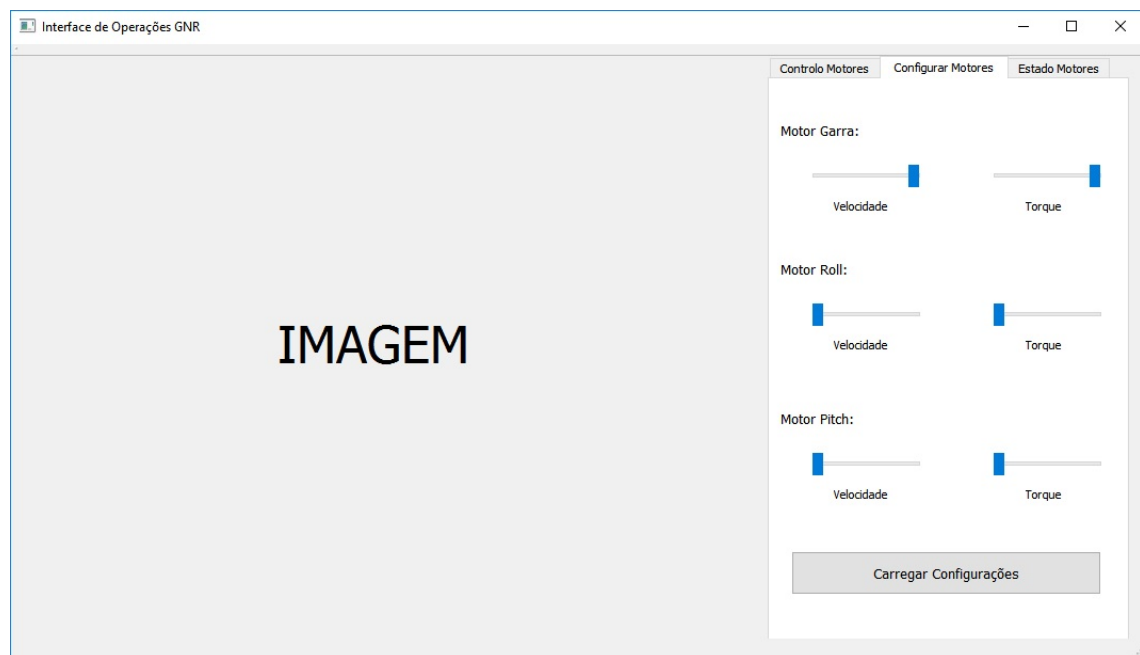


Figura 5.14: Interface da aplicação que permite o configurar o torque e a velocidade de cada servo-motor do gripper e manipulador.

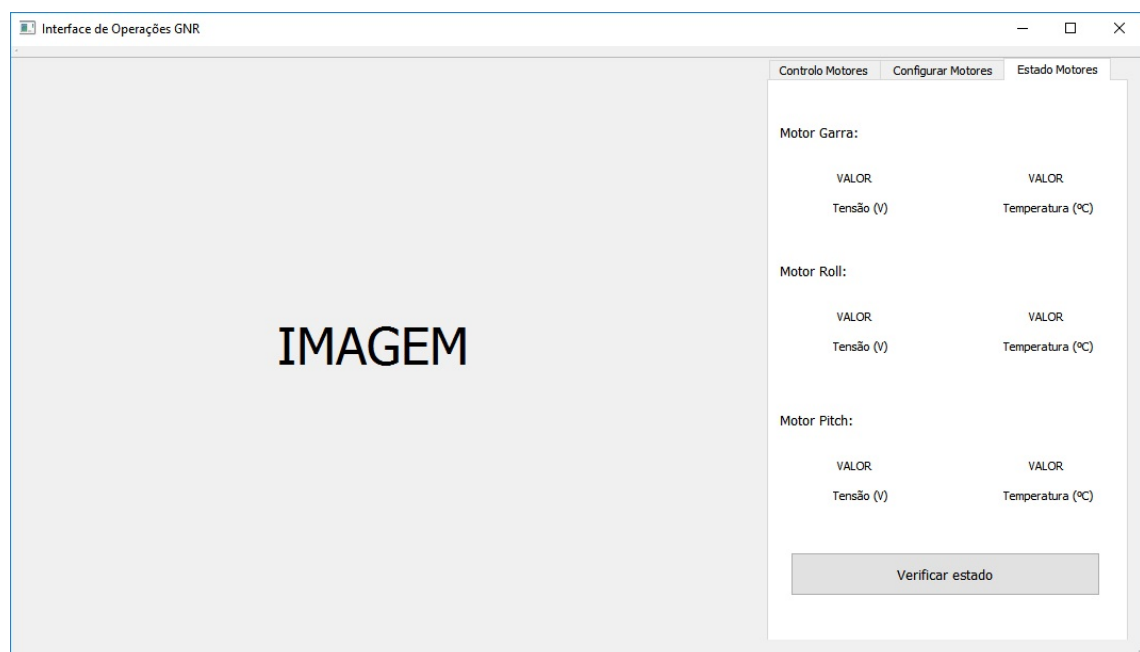


Figura 5.15: Interface da aplicação que permite fazer leituras da temperatura e da tensão de alimentação de cada servo-motor do gripper e manipulador.

5.5.2 Gamepad

Como referido no capítulo 2-requisitos de usabilidade e operação, em 2.1, expecta-se que o controlo do gripper (abertura e fecho) e do manipulador (movimentos nas direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*) seja feito através de um joystick ou de um gamepad. Desta forma, foi incorporado no sistema um gamepad sem fios Logitech³ wireless gamepad F710, ilustrado na figura 5.16. A integração deste na aplicação foi feita através do uso da biblioteca QGamepad, configurando uma ação para cada botão pressionado. Para fechar o gripper botão A, abrir o gripper botão B, para movimentos nas direções de rotação de *ROLL* botões left e right e por fim, para movimentos nas direções de rotação de *PITCH* botões up e down.



Figura 5.16: Gamepad sem fios Logitech F710[20].

³www.logitech.com

Capítulo 6

Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de testes elaborados ao sistema de monitorização e interface de operações remotas apresentado no capítulo 5, já com a integração do gripper e manipulador concebidos no capítulo 4. Estes testes têm como objetivo a validação da construção e montagem do modelo do gripper e do manipulador em plástico para futura maquinação em metal, bem como teste aos mecanismos concebidos para abertura e fecho da garra e para executar os movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*. Validado o modelo, foram elaborados alguns testes à manipulação de certos objetos exemplo, limitados pela construção em plástico do protótipo. Foram também realizados testes a parte do sistema de monitorização (Raspberry Pi NoIR Camera) e à interface com o utilizador. Seguidamente, foram realizados alguns testes às comunicações, nomeadamente em termos de distâncias, de forma a cumprir os requisitos estipulados no capítulo 2 e em controlo de acessos. Por fim, foram simuladas falhas através da desconexão de partes do sistema e avaliada a recuperação deste.

6.1 Validação da construção e montagem do modelo impresso em plástico

Inicialmente, como apresentado no capítulo 4, foi projetado e montado o protótipo de um gripper e de um manipulador. Tendo como objetivo a construção de um modelo em metal, este foi primeiramente impresso em plástico para que fosse validado. Ainda que em plástico, é possível confirmar que a montagem é possível e que os mecanismos projetados funcionam.

Começou-se por testar os mecanismos de abertura e fecho, que recorrem a uma engrenagem, a duas rodas dentadas helicoidais e um fuso sem fim. Os testes apresentam-se na figura 6.1. Verificou-se também com estes testes que, como referido em 4.3, o uso deste tipo de mecanismo tem a vantagem de manter a posição da abertura/fecho do gripper quando o fuso está parado, exercendo a função de encravamento mecânico que permite assim maior segurança na manipulação. Seguidamente testou-se os movimentos permitidos pelo manipulador concebido. Os resultados ilustram-se na figura 6.2.

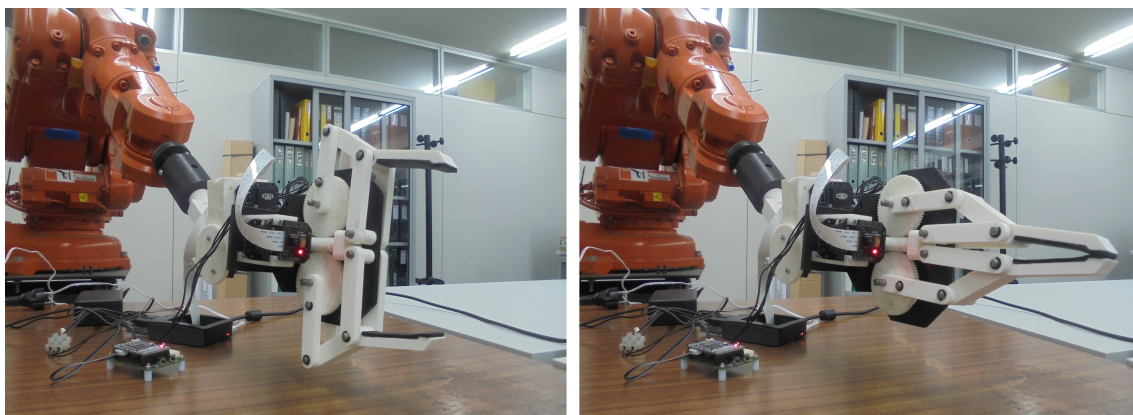


Figura 6.1: Testes efetuados ao mecanismo de abertura e fecho do gripper.



Figura 6.2: Testes efetuados aos mecanismos responsáveis pelos movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*.

6.2 Manipulação de Objetos

Como supracitado no capítulo 2, em 2.1, os engenhos explosivos a manipular foram descritos como simples e pequenas caixas, mochilas ou objetos cilíndricos. Para aumentar o atrito e permitir uma preensão mais cuidada foi inserida uma esponja na parte interna das pinças da garra mecânica. Na figura 6.3 apresentam-se a mesa de testes composta pelo protótipo do gripper e protótipo do manipulador montados no manipulador da ABB (simulação do braço extensível do robô), Raspberry Pi NoIR Camera Rev1.3, controlador CM-700, RPi onde é executada a gateway, PC onde é executada a aplicação e o gamepad sem fios Logitech F710. Na figura 6.7 apresentam-se testes à manipulação de um objeto retangular e na figura 6.4 à manipulação de um objeto cilíndrico. Na figura 6.5 ilustram-se testes à manipulação de uma mochila.

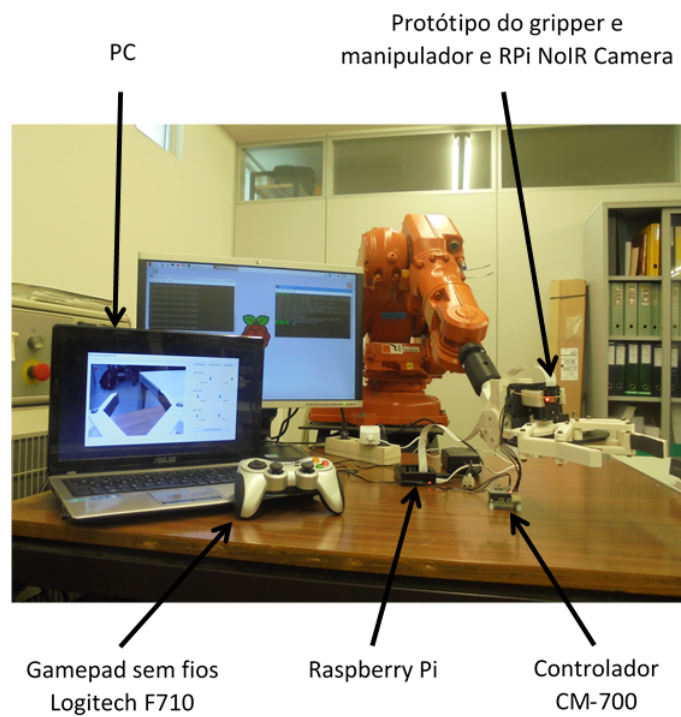


Figura 6.3: Mesa de testes composta pelo protótipo do gripper e protótipo do manipulador, Raspberry Pi NoIR Camera Rev1.3, controlador CM-700, RPi, PC e o gamepad sem fios Logitech F710.

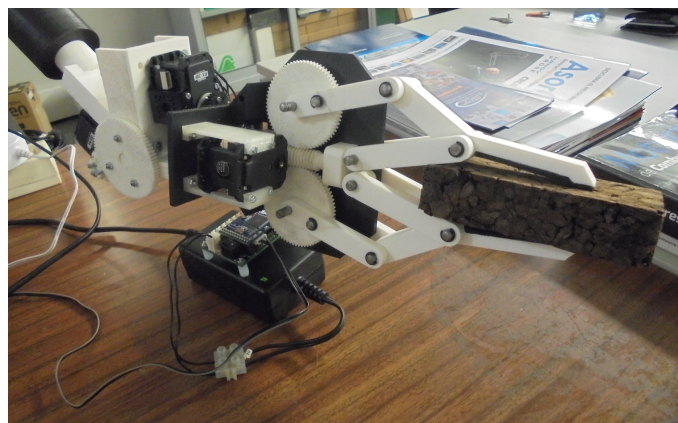


Figura 6.4: Testes à manipulação de um objeto retangular.

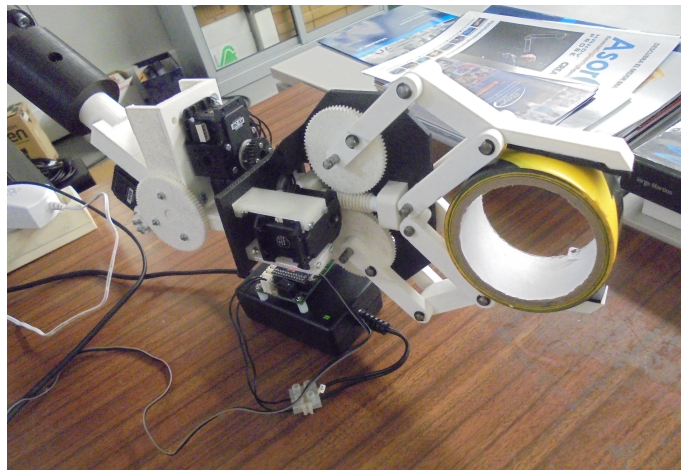


Figura 6.5: Testes à manipulação de um objeto cilíndrico.



Figura 6.6: Testes à manipulação de uma mochila.

6.3 Sistema de monitorização

Na câmara Raspberry Pi NoIR Rev1.3 foram efetuados testes ao nível de qualidade de imagem em função do frame rate, com o objetivo de verificar se para uma dada resolução e formato de compressão de imagem escolhido, com uma qualidade de imagem aceitável, teríamos um frame rate elevado que permitisse uma transmissão de imagem fluída e sem grandes atrasos (latência).

O formato escolhido e permitido pelo servidor UV4L para streaming de vídeo foi o *MJPEG Video*, com uma resolução de 640x480. Ainda que requerido um frame rate elevado (60fps) ao servidor UV4L, foi notório que este não era cumprido. No entanto, a imagem apresentava uma baixa latência visualmente (não quantificada). Tentou-se também verificar o uso de recursos por parte do Raspberry Pi durante o streaming, através dos programas para Linux *top* (table of processes) e *htop* (interactive system-monitor for Linux). Foram inconclusivos, pois a percentagem de processador e memória reservada para o servidor era baixa, pelo que se crê que a sua utilização fosse ao nível do GPU (unidade de processamento gráfico).

Na figura 6.7 apresenta-se uma imagem obtida na aplicação apartir do streaming da câmara Raspicam, conectada ao Raspberry Pi.

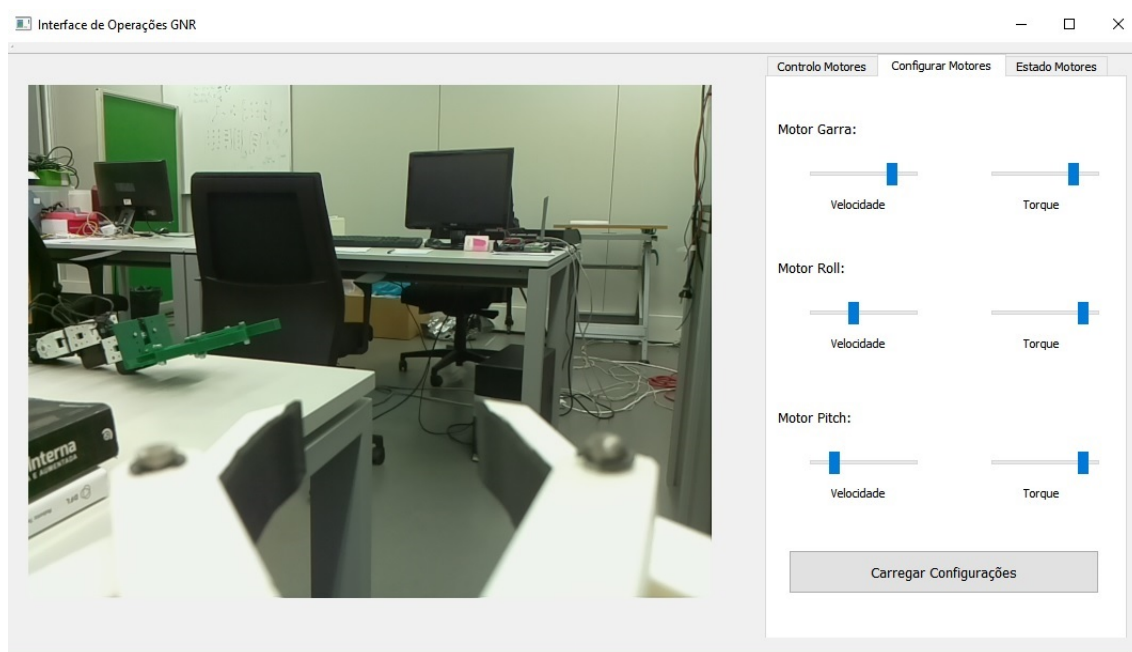


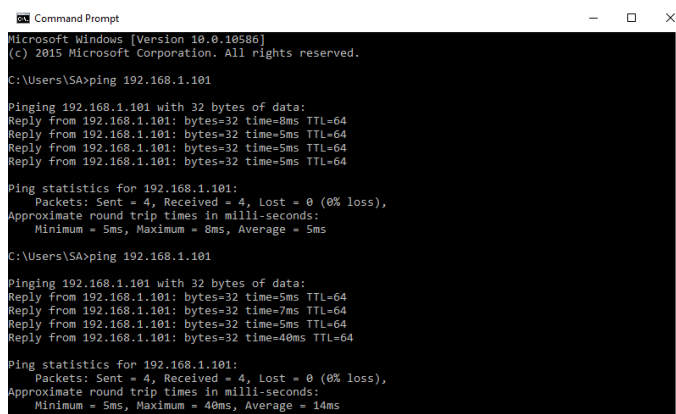
Figura 6.7: Streaming da câmara Raspberry Pi NoIR Rev1.3 na GUI da aplicação desenvolvida.

6.4 Comunicações

Em relação às comunicações foram feitos testes ao nível do alcance, latência e segurança da rede sem fios implementada no router TP-LINK AC1200 Archer C50.

Verificou-se que a céu aberto era conseguida a distância pretendida. A nível de latência foi efetuado o comando/ferramenta *ping* entre o PC e o Raspberry Pi e ainda que os pacotes transmitidos sejam pequenos (32 bytes) comparativamente a pacotes de streaming de vídeo, não existiram problemas de latência nem de perda de pacotes como se previa com o uso do protocolo TCP/IP. Os resultados apresentam-se na figura 6.8 e foram realizados durante o streaming da Raspicam.

O controlo de acessos foi testado e comprovado. Não foi possível o acesso à rede sem o PC com o endereço MAC pré-definido no router, bem como sem o conhecimento do SSID da rede sem fios e respetiva palavra-passe.



```
Microsoft Windows [Version 10.0.10586]
(c) 2015 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\SA>ping 192.168.1.101

Pinging 192.168.1.101 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=8ms TTL=64
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=5ms TTL=64
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=5ms TTL=64
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=5ms TTL=64

Ping statistics for 192.168.1.101:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 5ms, Maximum = 8ms, Average = 5ms

C:\Users\SA>ping 192.168.1.101

Pinging 192.168.1.101 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=5ms TTL=64
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=7ms TTL=64
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=5ms TTL=64
Reply from 192.168.1.101: bytes=32 time=40ms TTL=64

Ping statistics for 192.168.1.101:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 5ms, Maximum = 40ms, Average = 14ms
```

Figura 6.8: Resultado dos testes à latência e perda de pacotes entre o PC e o Raspberry Pi.

6.5 Recuperação do sistema a falhas

Por fim, foram realizados alguns testes à robustez e recuperação do sistema a falhas. Para isso, com o sistema em funcionamento, desconectou-se o controlador CM-700 e voltou-se a conectá-lo. Verificou-se que o sistema, como previsto, se mantém funcional. De seguida foi efetuado o mesmo teste à aplicação. Dado que a gateway verifica se o cliente (aplicação) está ligado e caso não esteja aceita novas ligações, quando a aplicação é desligada e novamente ligada, a gateway aceita a nova ligação e o sistema mantém-se operacional.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

De uma forma geral e sob o ponto de vista funcional, os requisitos propostos pela brigada especial de minas e armadilhas da GNR para este projeto, considerando o sistema criado como um protótipo, foram na sua grande maioria cumpridos.

No sistema de manipulação, o protótipo do gripper e manipulador desenvolvidos compreendem como movimentos expectáveis e necessários para a garra mecânica movimentos nas direções de rotação de *ROLL* de 180° e de *PITCH* de 180° cujo referencial de base se apresenta na figura ???. A garra e respetivo manipulador são, como expectado, facilmente removíveis, podendo ser alterada a sua utilização com a utilização dos canhões de água. O sistema de manipulação encontra-se projetado para, numa versão final em metal, ser capaz de manipular diferentes engenhos explosivos (de construção caseira e militar) que não excedam os 5kg de peso nem as dimensões especificadas, sendo eles cilíndricos, retangulares (pequenas caixas) ou mochilas. A força de preensão (torque) exercido pelo gripper, bem como a velocidade na manipulação e na abertura e fecho da garra é configurável, permitindo uma manipulação segura e eficiente.

No sistema de monitorização, o sistema desenvolvido compreende uma câmara de vídeo (MAKO) colocada sobre o braço, que permite uma visão ampla do manipulador e da garra e uma câmara de vídeo (RPi NoIR Camera) colocada sobre o gripper, que permite uma visão macro das pinças deste. O sistema é capaz de efetuar streaming em tempo-real das imagens obtidas pelas câmaras, sendo as imagens apresentadas numa interface com o utilizador.

No sistema de comunicações, o sistema desenvolvido compreende comunicações sem fios e encriptadas entre a interface com o utilizador e a plataforma robótica. Este sistema encontra-se dotado de um controlo de acessos ao meio, traduzindo-se em segurança e robustez do sistema a acessos não autorizados. O sistema compreende também uma distância mínima entre a interface com o utilizador e o robô, em "campo aberto", de 100m.

Na interface com o utilizador, o sistema concebido permite a manipulação de forma remota do gripper (abertura e fecho) e exercer os movimentos expectáveis do manipulador segundo as direções de rotação de *ROLL* e *PITCH* já definidas, através de um gamepad sem fios. O sistema encontra-se capaz de exercer movimentos em simultâneo a motores diferentes. A aplicação desenvolvida neste sistema, compreende uma interface gráfica, que como já referido, permite visualizar

as imagens captadas e fornecidas pelo sistema de monitorização (RPi NoIR Camera), em tempo-real. Esta, permite também através da GUI a configuração da velocidade e do torque de cada motor (dentro das limitações destes), bem como efetuar leituras do estado (temperatura e tensão de alimentação) de cada um dos motores.

Desenvolveu-se, testou-se e validou-se um protótipo de um gripper de dois dedos com uma articulação para manipulação de objetos de diferentes tamanhos e formas. Desenvolveu-se, testou-se e validou-se um manipulador com dois graus de liberdade que permite exercer os movimentos segundo as direções de rotação de *ROLL* e de *PITCH*. Desenvolveu-se, testou-se e validou-se um sistema de monitorização com recurso a uma câmara low-cost RPi NoIR Camera, efetuando o streaming de vídeo a partir de um servidor que é executado no Raspberry Pi. Criou-se uma interface gráfica que permitisse ao utilizador tirar partido de forma remota do sistema de monitorização, do gripper e do manipulador desenvolvido.

Sob o ponto de vista dos motores utilizados, apesar de terem enumeras vantagens como simplicidade de programação, grande precisão, grande faixa de velocidade e torque a ser exercido, bem como baixo peso e relação força-tamanho alta, do ponto de vista comercial não são a melhor solução. Como desvantagens temos o alto custo destes, sensores e modos de funcionamento que não são utilizados.

No seguimento de todo o trabalho desenvolvido sugere-se, como trabalho futuro, a continuidade da maquinaria do gripper e do manipulador concebidos, bem como das rodas dentadas que o constituem. Este foi projetado inteiramente à escala e totalmente normalizado no que diz respeito a rodas dentadas, fusos sem fim, rolamentos, casquilhos e veios.

Propõe-se também como trabalho futuro a resolução dos problemas mencionados em 5.2.6. O primeiro problema encontrado é resultado da dificuldade de se conceber um controlo de segurança eficiente e robusto em relação aos limites máximos de abertura e fecho do gripper, recorrendo apenas a leituras dos sensores do servo-motor responsável por este movimento. A melhor solução é possivelmente utilizar-se sensores externos como um fim de curso na abertura e um sensor de força/pressão que permitam medir a força exercida no fechar do gripper. O segundo e último problema prende-se em que quando os servo-motores não estão em movimento, ainda que em carga, estes tendem a perder força e girar livremente. Uma das soluções mais indicadas seria talvez usar-se um encravamento mecânico através de um eletroímã que, assim que os motores deixassem de ser utilizados, bloqueava na posição em que se encontrava. Outra solução seria implementar o mecanismo utilizado na abertura e fecho do gripper, referido em 4.3, recorrendo a um fuso sem fim e rodas dentadas helicoidais. Este mecanismo garante que a posição é sempre mantida quando o fuso está parado, não sendo necessário alimentar continuamente o servo-motor. Esta necessidade é grande no servo-motor responsável pelo movimento segundo a direção de rotação de *PITCH*, fazendo com que este não bloqueie quando não está a ser utilizado e por sua vez não mantenha a posição pretendida.

Por fim, sugere-se como trabalho futuro, o desenvolvimento de um sistema de cablagens, de um conversor DC/DC que permita alimentar todo o sistema recorrendo aos 24V já disponíveis no robô e para finalizar, a implementação de todo sistema desenvolvido na plataforma robótica.

Anexo A

Soluções do mercado - ROBOTIQ

Tabela A.1: Especificações mecânicas grippers 2-FINGER 85 e 2-FINGER 140 ROBOTIQ [11].

Especificações mecânicas	2-FINGER 85	2-FINGER 140
Abertura do gripper	0 a 85 mm	0 a 140 mm
Força do gripper	20 a 235 N $\pm 15\%$	10 a 125 N
Carga máxima recomendada	5 kg	2.5 kg
Velocidade de fecho do gripper	20 a 150 mm/s	30 a 250 mm/s
Peso do gripper	850 g	1000 g

Tabela A.2: Especificações elétricas grippers 2-FINGER 85 e 2-FINGER 140 ROBOTIQ [11].

Tensão de alimentação nominal	24V DC $\pm 10\%$
Tensão de alimentação máxima absoluta	28V DC
Consumo de potência mínimo	<1 W
Corrente de pico	1 A

Tabela A.3: Especificações de controlo grippers 2-FINGER 85 e 2-FINGER 140 ROBOTIQ [11].

Protocolos de Comunicação	Modbus RTU (RS-485, Half-duplex).
Opções de protocolos de comunicação com o controlador	Ethernet/IP, Modbus TCP, PROFINET, DeviceNet, CANopen, EtherCAT.
Parâmetros de programação da preensão	Posição, velocidade e controlo, de força.
LED de estados	Alimentação, comunicação e erro.
Feedback (sensores)	Deteção do fecho do gripper, posição do gripper e corrente do motor.

Tabela A.4: Especificações mecânicas gripper 3-FINGER ROBOTIQ [13].

Abertura do gripper	0 a 155 mm
Força do gripper	15 a 60 N $\pm 15\%$
Carga máxima recomendada	10 kg
Velocidade de fecho do gripper	22 a 110 mm/s
Peso do gripper	2.3 kg

Tabela A.5: Especificações elétricas gripper 3-FINGER ROBOTIQ [13].

Tensão de alimentação nominal	24V DC $\pm 10\%$
Tensão de alimentação máxima absoluta	28 V DC
Consumo de potência mínimo	<4.1 W
Potência de pico (máxima força do gripper)	36 W

Tabela A.6: Especificações de controlo gripper 3-FINGER ROBOTIQ [13].

Protocolos de Comunicação	Modbus RTU (RS-485, Half-duplex).
Opções de protocolos de comunicação com o controlador	Ethernet/IP, Modbus TCP, PROFINET, DeviceNet, CANopen, EtherCAT.
Parâmetros de programação da prensão	Posição, velocidade e controlo, de força de cada dedo. Controlo da posição do dedo lateral.
LED de estados	Alimentação, comunicação e erro.
Feedback (sensores)	Deteção do fecho do gripper, posição do gripper e corrente do motor.

Anexo B

Maquinagem das rodas dentadas e fuso sem fim HPC

B.1 Roda dentada helicoidal HPC M0.8-70

Maquinagem de duas rodas dentadas helicoidais HPC M0.8-70 com:

- Um furo de 13mm com profundidade de 5mm no centro.
- Um furo de 6mm a 20mm do centro.

Na figura [B.1](#) temos umas das rodas helicoidais HPC M0.8-70 originais adquiridas. Na figura [B.2](#) temos uma roda helicoidal HPC M0.8-70 pós-maquinagem em SolidWorks.

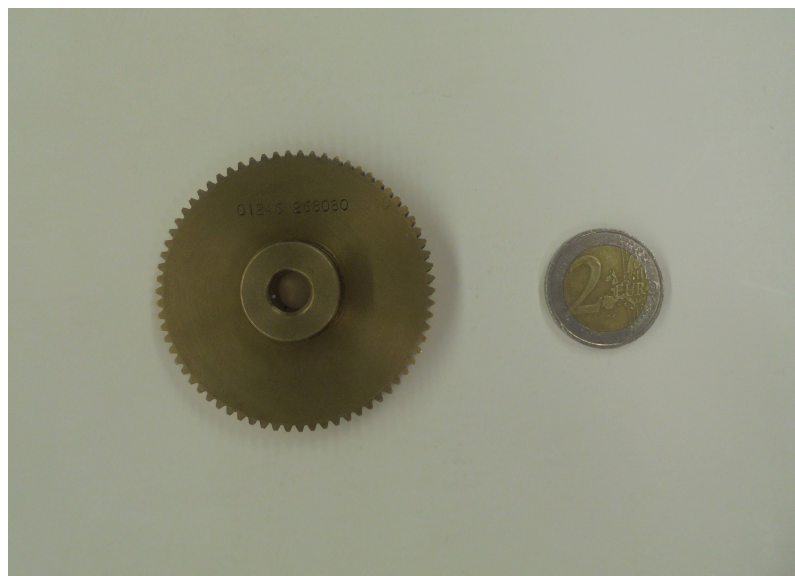


Figura B.1: Roda dentada helicoidal HPC M0.8-70 original.

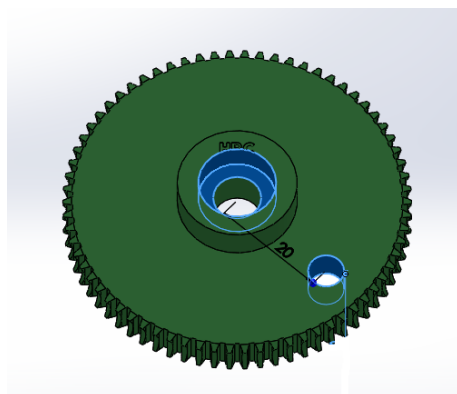


Figura B.2: Roda dentada helicoidal HPC M0.8-70 pós-maquinagem em SolidWorks.

B.2 Fuso sem fim HPC SW0.8-1

Maquinagem de um fuso sem fim HPC SW0.8-1 com:

- Corte de 8mm do veio numa das extremidades.
- Maquinagem dessa mesma extremidade para uma secção de 8mm uma distância de 13.10mm desde a face da extremidade.
- Maquinagem da outra extremidade para uma secção de 8mm uma distância de 21.10mm desde a face da extremidade.
- Maquinagem para uma chaveta de 2mm de altura e 5mm por 2mm, a uma distância de 1.60mm da face da última extremidade maquinada.

Na figura B.3 temos o fuso sem fim HPC SW0.8-1 original adquirido. Na figura B.4 temos o fuso sem fim HPC SW0.8-1 pós-maquinagem em SolidWorks.



Figura B.3: Fuso sem fim HPC SW0.8-1 original.

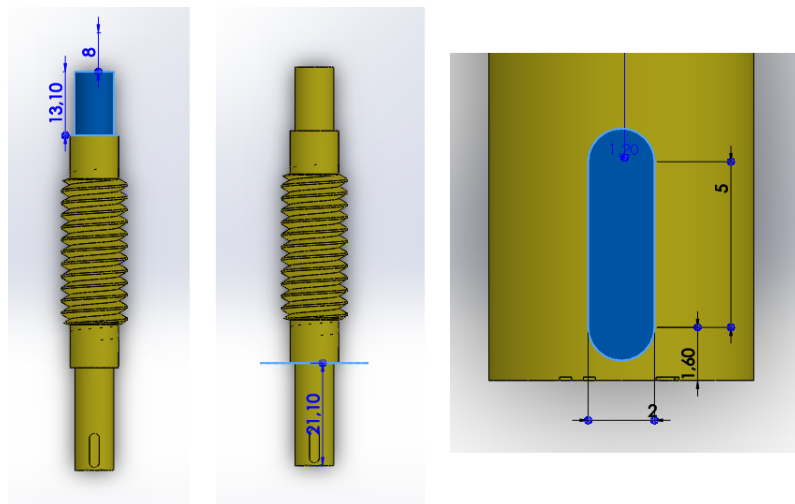


Figura B.4: Fuso sem fim HPC SW0.8-1 pós-maquinagem em SolidWorks.

B.3 Roda dentada HPC G0.8-30

Quatro rodas dentadas HPC G0.8-30 necessitam de ser maquinadas.

Maquinagem da primeira roda dentada, atribuída com a nomenclatura HPC G0.8-30(1) com:

- O corte do aumento.
- Um furo de 8.1mm no centro.
- Um rasgo para chaveta, largura de 2mm a uma distância de 9mm de uma das extremidades.

Na figura B.5 temos uma roda dentada HPC G0.8-30 original adquirida. Na figura B.6 a roda dentada HPC G0.8-30(1) pós-maquinagem em SolidWorks.



Figura B.5: Roda dentada HPC G0.8-30 original.

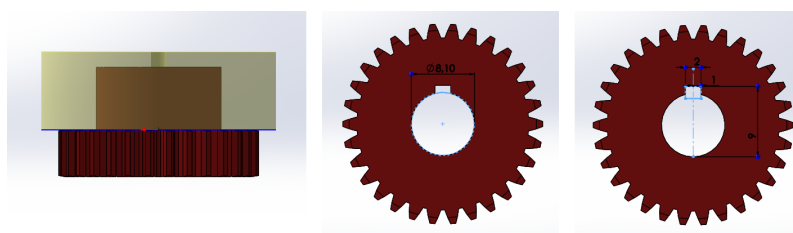


Figura B.6: Roda dentada HPC G0.8-30(1) pós-maquinagem em SolidWorks.

Maquinagem de duas rodas dentadas atribuídas com a nomenclatura HPC G0.8-30(2) com:

- Oito furos de 2mm a 8mm do centro.
- Um furo de 8mm no centro.
- Corte do aumento até ficar com 5mm.

Na figura B.7 ilustra-se uma das rodas dentadas HPC G0.8-30(2) pós-maquinagem em SolidWorks.

Maquinagem de uma roda dentada atribuída com a nomenclatura HPC G0.8-30(3) com:

- Oito furos de 3mm a 8mm do centro.
- Um furo de 10mm no centro.

Na figura B.8 apresenta-se uma das rodas dentadas HPC G0.8-30(3) pós-maquinagem em SolidWorks.

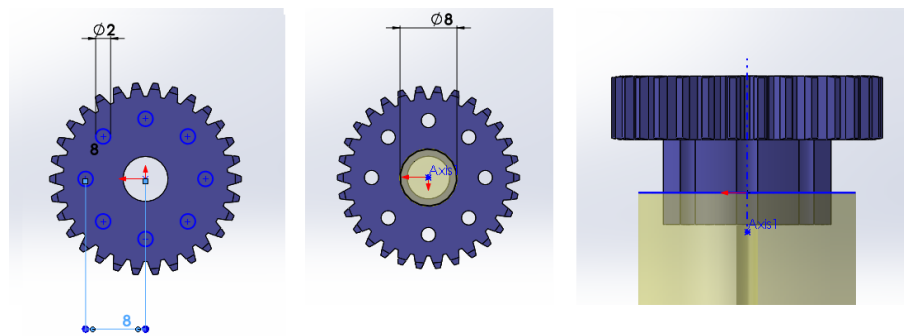


Figura B.7: Roda dentada HPC G0.8-30(2) pós-maquinagem em SolidWorks.

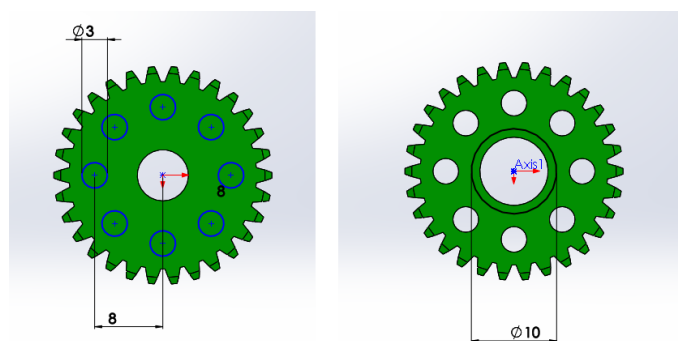


Figura B.8: Roda dentada HPC G0.8-30(3) pós-maquinagem em SolidWorks.

B.4 Roda dentada HPC G0.8-20

Maquinagem de uma roda dentada HPC G0.8-20 com:

- Quatro furos de 2mm a uma distância de 4.75mm do centro.
- Corte do aumento em 6.5mm.

Na figura [B.9](#) temos uma roda dentada HPC G0.8-20 original adquirida. Na figura [B.10](#) temos uma roda dentada HPC G0.8-20 pós-maquinagem em SolidWorks.



Figura B.9: Roda dentada HPC G0.8-20 original.

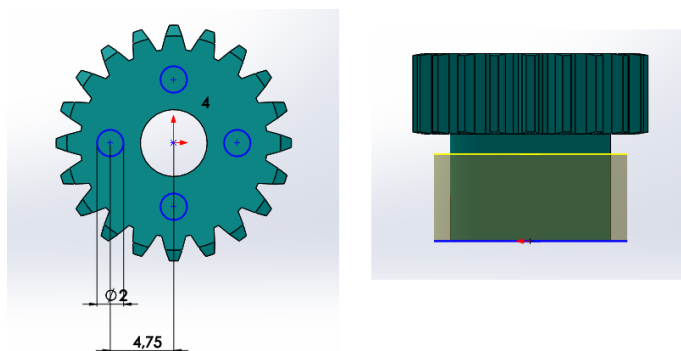


Figura B.10: Roda dentada HPC G0.8-20 pós-maquinagem em SolidWorks.

B.5 Roda dentada HPC G0.8-80

Maquinagem de uma roda dentada HPC G0.8-80 com:

- Três furos de 3mm segundo o esquema da figura B.12.
- Corte do aumento.
- Um furo de 10mm no centro.

Na figura B.11 ilustra-se uma roda dentada HPC G0.8-80 original adquirida. Na figura B.12 apresenta-se uma roda dentada HPC G0.8-80 pós-maquinagem em SolidWorks.

Anexo C

Especificações mecânicas, elétricas e de controlo dos servo-motores Dynamixel

Tabela C.1: Especificações mecânicas, elétricas e de controlo do servo-motor Dynamixel RX-24F[22].

Peso	67g
Dimensão	35.6mm x 50.6mm x 35.5mm
Resolução	0.29°
Rácio da caixa redutora	193 : 1
Torque máximo	2.6N.m (a 12V, 2.4A)
Velocidade máxima sem carga	126rpm (a 12V)
Modos de funcionamento	Por graus (Joint mode): 0° ~ 300° Por rotação contínua (Wheel mode)
Temperatura de funcionamento	-5°C ~ +80°C
Tensão de alimentação	9V~12V (Tensão de alimentação recomendada 11.1V)
Sinais de comando	Pacotes Digitais
Protocolos de comunicação	RS485 Comunicação porta-série assíncrona (8bit, 1stop, sem paridade)
Ligação física cablada	RS485 Multi Drop Bus
ID	254 ID (0~253)
Velocidade de comunicação	7843bps ~ 1 Mbps
Sensores	Posição, Temperatura, Carga, tensão de alimentação, etc.
Material de construção	Engrenagens em metal, corpo em plástico.
Consumo de corrente em standby	50 mA

Tabela C.2: Especificações mecânicas, elétricas e de controlo do servo-motor Dynamixel RX-64[23].

Peso	125g
Dimensão	40.2mm x 61.1mm x 41mm
Resolução	0.29°
Rácio da caixa redutora	200 : 1
Torque máximo	5.3N.m (a 18.5V, 2.6A)
Velocidade máxima sem carga	64rpm (a 18.5V)
Modos de funcionamento	Por graus (Joint mode): 0° ~ 300° Por rotação contínua (Wheel mode)
Temperatura de funcionamento	-5°C ~ +80°C
Tensão de alimentação	12~18.5V (Tensão de alimentação recomendada 14.8V)
Sinais de comando	Pacotes Digitais
Protocolos de comunicação	RS485 Comunicação porta-série assíncrona (8bit, 1stop, sem paridade)
Ligação física cablada	RS485 Multi Drop Bus
ID	254 ID (0~253)
Velocidade de comunicação	7843bps ~ 1 Mbps
Sensores	Posição, Temperatura, Carga, tensão de alimentação, etc.
Material de construção	Engrenagens em metal, corpo em plástico.
Consumo de corrente em standby	50 mA

Anexo D

Comandos usados para configuração e conexão ao servidor de streaming de vídeo UV4L

Considerando que o endereço IP do Raspberry Pi é 192.168.1.101, e que a porta TCP escolhida é a 9090, começamos por configurar o servidor, ligá-lo e por fim fazer a conexão do cliente ao servidor através do endereço IP do Raspberry Pi e da porta TCP para a qual este transmite as imagens. A configuração e ligação do servidor é feita a partir da linha de comandos. A conexão de um cliente ao servidor pode ser feita a partir de um browser de qualquer máquina (inclusive o Raspberry Pi) desde que ligada na mesma rede de computadores que o Raspberry Pi em questão.

Para configurar o servidor, digitamos na linha de comandos do Raspberry Pi:

```
sudo uv4l -nopreview --auto-video_nr --driver raspicam --encoding mjpeg --width 640 --height 480 --framerate 20 --server-option '--port=9090' --server-option '--max-queued-connections=30' --server-option '--max-streams=25' --server-option '--max-threads=29'
```

Para ligar o servidor, digitamos na linha de comandos do Raspberry Pi:

```
sudo service motion start
```

Para desligar o servidor, digitamos na linha de comandos do Raspberry Pi:

```
sudo service motion stop
```

Conexão do cliente ao servidor, a partir do browser:

```
http://192.168.1.101:9090
```

Conexão do cliente ao servidor e respetivo serviço de streaming, a partir do browser:

```
http://192.168.1.101:9090/stream
```


Referências

- [1] Vitor Ferreira Romano. *Robótica industrial*. Edgard Blucher, 2002. ISBN: 9788521203155.
- [2] João Maurício Rosário. *Princípios de mecatrônica*. Pearson Prentice Hall, 2005.
- [3] Kuat Telegenov, Yedige Tlegenov, e Almas Shintemirov. A low-cost open-source 3-d-printed three-finger gripper platform for research and educational purposes. *IEEE Access*, 3:638–647, 2015. doi:10.1109/access.2015.2433937.
- [4] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, e H. M. Jaeger. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(44):18809–18814, 2010. doi:10.1073/pnas.1003250107.
- [5] John R. Amend, Eric Brown, Nicholas Rodenberg, Heinrich M. Jaeger, e Hod Lipson. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE Trans. Robot.*, 28(2):341–350, 2012. doi:10.1109/tro.2011.2171093.
- [6] Robotpig.net. Universal robotic gripper by cornell csl. Acedido a 11/02/2016. URL: http://robotpig.net/robotics-news/universal-robotic-gripper-by-cornell-csl-_1965.
- [7] Catherine Bernier. Magnetic robot end effector: Top 5 pros and cons. Acedido a 11/02/2016. URL: <http://blog.robotiq.com/bid/65794/Magnetic-Robot-End-Effector-Top-5-Pros-and-Cons>.
- [8] Ima-magnets. Permanent magnet lifters. Acedido a 12/02/2016. URL: <http://www.ima-magnets.co.uk/permanent-magnet-lifters.html>.
- [9] J. Schmalz GmbH. Flexibility and power: The new vacuum area gripping system fmp/fxp. Acedido a 11/02/2016. URL: <https://www.schmalz.com/en/company/schmalz-news/press-releases/details/flexibility-and-power-the-new-vacuum-area-gripping-system-fmpfxp-1/>.
- [10] ROBOTIQ. 2-finger adaptive robot gripper instruction manual. Acedido a 15/02/2016. URL: <http://support.robotiq.com/display/2FIM/Home>.
- [11] ROBOTIQ. Flexible robot grippers designed for universal robots. Acedido a 15/02/2016. URL: <http://robotiq.com/wp-content/uploads/2015/12/specsheet-2finger85UR-14apr2016-V2-web.pdf>.
- [12] ROBOTIQ. 3-finger adaptive robot gripper instruction manual. Acedido a 15/02/2016. URL: http://support.robotiq.com/display/IMB/Home?_ga=1.245100677.1633371726.1468417906.

- [13] ROBOTIQ. Adaptive gripper 3-finger. Acedido a 15/02/2016. URL: <http://robotiq.com/wp-content/uploads/2014/08/Robotiq-3-Finger-Adaptive-Gripper-Specifications-ES.pdf>.
- [14] BOTNROLL. Rob-11524 - garra para robótica. Acedido a 16/02/2016. URL: <http://www.botnroll.com/pt/garras/217-rob-10332-garra-para-robotica.html>.
- [15] BOTNROLL. Garra bot'n roll c/ servo. Acedido a 16/02/2016. URL: <http://www.botnroll.com/pt/3-bot-n-roll-one-c/501-garra-bot-n-roll.html>.
- [16] QinetiQ. Explosive ordnance disposal: Talon. Acedido a 18/02/2016. URL: <https://www.qinetiq.com/services-products/land/UGV/bomb-disposal-eod/Pages/talon.aspx>.
- [17] FranceRobotique. Acedido a 16/05/2016. URL: <http://www.francerobotique.com/>.
- [18] ModMyPi. Raspberry pi noir infrared camera board (5mp, 1080p, v1.3). Acedido a 18/05/2016. URL: <https://www.modmypi.com/raspberry-pi/camera/raspberry-pi-noir-infrared-camera-board-5mp-1080p-v1.3>.
- [19] TP-Link. Ac1200 wireless dual band router. Acedido a 16/05/2016. URL: <http://www.tp-link.com/en/products/details/Archer-C50.html>.
- [20] Logitech. F710 wireless gamepad. Acedido a 01/06/2016. URL: <http://gaming.logitech.com/en-us/product/f710-wireless-gamepad>.
- [21] S. K. Arora A. K. Gupta. *Industrial automation and robotics*. Laxmi Publications, 2 edição, 2009. ISBN: 8131805921, 9788131805923.
- [22] ROBOTIS. Rx-24f. Acedido a 10/05/2016. URL: http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/rx_series/rx-24f.htm.
- [23] ROBOTIS. Rx-64. Acedido a 10/05/2016. URL: http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/rx_series/rx-64.htm.
- [24] J. J. Salisbury, J. K. Craig. Articulated hands: Force control and kinematic issues. *The International Journal of Robotics Research*, 1(1):4–17, 1982. doi:10.1177/027836498200100102.
- [25] Yoky Matsuoka. *Autonomous Robots*, 4(2):199–209, 1997. doi:10.1023/a:1008873918987.
- [26] Cornell University. Balloon filled with ground coffee makes ideal robotic gripper. Acedido a 10/02/2016. URL: <http://www.news.cornell.edu/stories/2010/10/researchers-develop-universal-robotic-gripper>.
- [27] António Paulo G. M. Moreira. Robótica industrial. Acedido a 14/02/2016.
- [28] QinetiQ. Talon. Acedido a 18/02/2016. URL: <https://www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/talon/>.
- [29] SolidWorks İpuçları. Solidworks oryantasyon yeni görünüm ekleme. Acedido a 01/03/2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=EkLXY0PSSDU>.

- [30] Bastien Bruyère. Worm gear. Acedido a 10/03/2016. URL: <https://grabcad.com/library/worm-gear-18>.
- [31] hpcgears. Worms wheels. Acedido a 17/03/2016. URL: http://www.hpcgears.com/pdf_c33/15.10-15.13.pdf.
- [32] hpc.partcommunity. Worms and wheels. Acedido a 28/03/2016. URL: <http://hpc.partcommunity.com/3d-cad-models/>.
- [33] ROBOTIS. Cm510/cm700. Acedido a 16/05/2016. URL: http://support.robotis.com/en/software/embedded_c/cm510_cm700.htm.
- [34] ROBOTIS. Roboplus. Acedido a 16/05/2016. URL: http://support.robotis.com/en/software/roboplus_main.htm.
- [35] Igus. iglidur k. Acedido a 04/04/2016. URL: http://www.igus.pt/iPro/iPro_02_1004_0000_PTpt.htm?c=PT&l=pt.
- [36] ROBOTIS. Cm-700. Acedido a 12/05/2016. URL: http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/controller/cm700_manual.htm.