

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# **Projeto de um Gripper Sub-atuado com Aplicações em Locomoção Robótica**

Eduardo Miguel Lage Dixo de Sousa

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Major Automação

**Professor orientador:** Paulo José Cerqueira Gomes da Costa

**Professor co-orientador:** José Alexandre de Carvalho Gonçalves

Julho 2016



# Resumo

A área da manipulação, definida como a área da robótica em que múltiplos manipuladores ou dedos cooperam para agarrar e orientar objetos é identificada como uma das principais capacidades a desenvolver no futuro. Paralelamente, à recente luz dos estudos realizados em teoria de mecanismos, cinemática, dinâmica e mecatrónica, desenvolvem-se robots com locomoção baseada em pernas para conquistar terrenos difíceis. A seguinte dissertação pretende a criação de uma plataforma, passível de ser integrada como suporte de uma perna de um *robot* quadrúpede e de desempenhar tarefas de manipulação com elevada destreza, com sensorização para deteção e doseamento de força. Desta forma, a tarefa de manipulação que envolveria um acréscimo de um manipulador ao esqueleto do *robot*, aumentando o seu peso e diminuindo a eficiência energética, poderá ser feita com uma das pernas do *robot*, enquanto as restantes seriam utilizadas para o equilibrar. Neste trabalho, é usado um projeto CAD *open-source*, ao qual foram efetuadas alterações de modo a aumentar a configuração de apertos, integrar sensores tácteis e de força nas falanges distais, atuar cada dedo individualmente, e possibilitar que cada dedo possa rodar ficando acima da palma durante o contacto do sistema garra-chão. A dissertação acompanha a criação de uma garra com três dedos, quatro atuadores e sete articulações móveis através de um mecanismo de sub-atuação que recorre a uma mola que liga a falange proximal à distal. Todo o sistema é possível de imprimir em impressoras 3D, e composto por sensores facilmente acessíveis para que sirva de plataforma de investigação nas áreas de manipulação ou locomoção baseada em pernas.

# Abstract

The task of manipulation, in the field of robotics, defined as the area in which multiple manipulators or fingers cooperate to secure and orientate objects is identified as one of the main areas to explore in the future. Simultaneously, in the recent light of the studies conducted in mechanism theory, kinematics, dynamics and mechatronics, legged robots are being studied to conquer rough terrains. The following dissertation promotes the development of a platform, capable of being mounted on a leg of a four-legged robot and execute tasks of manipulation with high dexterity with sensors to detect and control the force exerted on the object. In this way, the function of manipulation that would involve the addition of a manipulator to the robot skeleton, increasing its weight and diminishing its global energy efficiency, could be done with one of its legs, while the others would be used to balance the robot. In this work, it is used an open-source CAD project which was modified in order to: increase the grasping configurations, integrate tactile and force sensors on the distal phalanxes, actuate individually each finger and making each finger capable of opening to such an extent, placing it above the palm, so that the system could be in contact with the terrain. The dissertation follows the creation of a 3-finger gripper with four actuators and seven articulations, thanks to the sub actuation mechanism that uses a spring, connecting the proximal phalanx to the distal phalanx. The entire system is projected in such a way that it is possible to print it in a 3D printer and uses off-the-shelf sensors so that it can serve as an investigation platform for future works in manipulation or legged locomotion.



# Agradecimentos

A presente dissertação, *Projeto de um Gripper sub-atuado com aplicações em locomoção robótica*, teve o contributo de diversas pessoas, e assim aproveito para agradecer a todos aqueles que ajudaram a superar algumas dificuldades de natureza institucional, científica e metodológica.

Aos Professores Paulo José Cerqueira Gomes da Costa e José Gonçalves, o meu primeiro agradecimento pela presente orientação temática. Agradeço a confiança que ambos depositaram no trabalho quando acederam à orientação científica e todos os momentos em que demonstraram uma enorme disponibilidade.

Aos técnicos da secção de laboratório de investigação do edifício de eletrotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fernando Guedes, pela disponibilidade, estímulo e amizade que sempre demonstraram em todos os momentos que precisei de imprimir com frequência peças para a montagem do projeto.

Aos colegas de mestrado que têm acompanhado este percurso, demonstrando apoio e amizade, os maiores agradecimentos.

A todos os familiares e amigos que apoiaram e acompanharam o trabalho, os mais sinceros reconhecimentos, particularmente quando se viram privados de tempos de convívio e lazer. Aos meus pais, irmão e primo o meu profundo agradecimento, pelo incentivo constante, contributo e apoio prestado.



# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Motivação.....	2
1.2.	Objetivos .....	3
1.3.	Arquitetura do Sistema.....	4
1.4.	Caraterização do problema.....	4
1.5.	Métricas.....	7
1.6.	Tipologia de projeto .....	9
1.7.	Diagrama de fluxo.....	9
1.8.	Cronograma do projeto.....	10
1.9.	Reuniões e interações com o orientador.....	10
2.	Estado de Arte.....	11
2.1.	Enquadramento atual e futuro do projeto .....	11
2.1.1.	Desempenho, avaliações e classificações .....	11
2.1.2.	Funcionais e tecnológicos.....	12
2.2.	Impressão 3D.....	13
2.3.	Software .....	15
2.4.	Matemática.....	16
2.5.	Representação de circuitos .....	17
2.6.	Análises de casos: Garras com sub-atuação .....	17
2.6.1.	MARS.....	17
2.6.2.	SARAH.....	18
2.6.3.	IAMT.....	19
3.	Fundamentos teóricos .....	20
3.1.	Caraterísticas das garras e classificação .....	20
3.2.	Requisitos .....	21
3.3.	Influência do número de dedos.....	22
3.4.	<i>Drives</i> de atuação .....	23
3.4.1.	Pneumático .....	23

3.4.2.	Hidráulico .....	24
3.4.3.	Elétrico .....	24
3.4.3.1.	Motores DC com comutador .....	24
3.4.3.2.	Motores Elétricos passo a passo .....	25
3.4.3.3.	Controlo de posição e velocidade no servo .....	27
3.5.	Sensores .....	28
3.5.1.	Capacitivos .....	28
3.5.2.	Piezoresistivos .....	28
3.5.2.1.	Células de carga .....	28
3.5.2.2.	Extensómetro de folha .....	29
3.5.2.3.	Ponte Wheatstone .....	30
3.5.2.4.	Princípio de funcionamento .....	31
3.5.2.5.	Compensação térmica circuito meia ponte .....	32
3.5.3.	Magnéticos .....	32
3.5.4.	Óticos .....	32
3.5.5.	Binários .....	33
3.5.6.	Piezoelétricos .....	33
3.6.	Conversão de forças .....	34
3.6.1.	Engrenagens .....	36
3.6.1.1.	Relações .....	38
3.6.1.2.	Perfil Evolvente .....	40
3.6.1.3.	Parâmetros dentes .....	43
3.7.	Graus de liberdade .....	44
4.	Projeto .....	45
4.1.	Número de dedos da garra .....	45
4.2.	Modelo Base .....	45
4.3.	Bio-inspiração .....	47
4.4.	Sensorização .....	49
4.5.	Sub-Atuação .....	51
4.6.	Orientação dos dedos .....	53
4.6.1.	Engrenagem .....	55
4.7.	CAD .....	59
4.7.1.	Palma .....	59
4.7.2.	Base .....	61
4.7.3.	Falange proximal .....	62
4.7.4.	Falange Distal .....	63
4.7.5.	Suporte Dedos rotativos .....	65
4.7.6.	Atuação .....	66
4.7.6.1.	Rotativos .....	66
4.7.6.2.	Fixo .....	69

4.7.7.	Ligação dos motores.....	71
4.7.8.	Arduino.....	72
4.8.	Sensores.....	73
4.8.1.	Força.....	73
4.8.1.1.	Montagem do sensor na garra .....	74
4.8.1.2.	Ligações elétricas .....	75
4.8.1.3.	Calibração dos sensores .....	76
4.8.2.	Táctil.....	77
4.8.2.1.	Ligações elétricas .....	79
4.9.	Motores .....	83
4.9.1.	Montagem.....	84
4.9.2.	Calibração.....	85
5.	Resultados .....	87
5.1.	Exportação dos dados.....	87
5.2.	Programa genérico preensão .....	88
5.3.	Aperto com 2 dedos: .....	90
6.	Conclusão.....	94
7.	Glossário .....	97
7.1.	Terminologia células carga .....	97
7.2.	Nomenclatura engrenagens .....	98
7.2.1.	Eixos de rotação.....	98
7.2.2.	Engrenagens .....	99
7.3.	Movimentos.....	99
7.3.1.	Rotativos.....	99
7.3.2.	Translação.....	100
7.4.	Terminologia Apertos.....	100
Referências	.....	103



# Lista de Figuras

Figura 1.1 Product Breakdown System.....	4
Figura 1.2 Diagrama de fluxo sistemas complexos .....	9
Figura 2.1 Boas práticas para impressão.....	14
Figura 2.2 Análise mercado produtos CAD.....	15
Figura 2.3 Análise software para análise dados .....	16
Figura 2.4 Garra MARS.....	17
Figura 2.5 Exemplo de engrenagem orientação .....	18
Figura 2.6 Garra SARAH .....	18
Figura 2.7 Diferencial usado em IAMT .....	19
Figura 3.1 Exemplo garra 2 dedos tipo impacto .....	21
Figura 3.2 Exemplo garra tipo astritivo .....	21
Figura 3.3 Flexibilidade vs. desempenho conforme número de dedos .....	23
Figura 3.4 Vantagens dos vários tipos de atuação .....	27
Figura 3.5 Variação da resistência do extensômetro por ação de tensão e compressão.....	29
Figura 3.6 Exemplo extensômetro de folha. Disposição em zig-zag.....	29
Figura 3.7 Exemplo ponte Wheatstone .....	30
Figura 3.8 Circuito Wheatstone quarto de ponte .....	30
Figura 3.9 Circuito Wheatstone meia ponte.....	30
Figura 3.10 Circuito Wheatstone ponte completa.....	31
Figura 3.11 Junta rotativa (esquerda) e junta prismática (direita).....	35
Figura 3.12 Came (esquerda) e engrenagens (direita) .....	35
Figura 3.13 Representação cinemática.....	36
Figura 3.14 Exemplo engrenagem 2 rodas.....	37
Figura 3.15 Círculos primitivos de duas rodas a engrenar .....	37
Figura 3.16 Evolução largura dos dentes com a variação do módulo .....	39
Figura 3.17 Tangência ponto de contacto .....	40
Figura 3.18 Curva evolvente .....	41
Figura 3.19 Reta normal à evolvente tangente ao círculo base .....	41
Figura 3.20 Ângulo de pressão e incidência .....	42
Figura 3.21 Terminologia Dentes .....	43
Figura 4.1 Modelo-base da garra concêntrica de 3 dedos.....	46
Figura 4.2 Vista atuação para um dedo do modelo base.....	46
Figura 4.3 Preensão para dedo de duas falanges com sub-atuação .....	47
Figura 4.4 Retração das garras nos felinos .....	48
Figura 4.5 Extensão e flexão do pulso humano .....	48
Figura 4.6 Posicionamento durante o funcionamento como suporte. ....	49
Figura 4.7 Exemplo da almofada do metacarpo da pata de um cão .....	49
Figura 4.8 Exemplo de um dedo da garra projetada .....	50
Figura 4.9 Área ativa do potenciômetro na falange distal (laranja) .....	51
Figura 4.10 Gráfico da força aplicada na mola vs. distensão.....	52

Figura 4.11 Representação esquemática da cinemática do dedo.....	52
Figura 4.12 Exemplificação da mola no dedo (reta a cinzento).....	53
Figura 4.13 Reta sob o qual os 2 dedos giram simetricamente.....	54
Figura 4.14 Segmentos de rodas dentadas das extremidades.....	54
Figura 4.15 Vista de secção das rodas dentadas para orientação.....	55
Figura 4.16 Exemplo da velocidade angular numa engrenagem de 4 rodas.....	56
Figura 4.17 Espaço disponível para o mecanismo de orientação.....	56
Figura 4.18 Pinhão cónico.....	57
Figura 4.19 Vista da roda dentada e dos furos para fixação aos veios.....	57
Figura 4.20 Vista suporte rotativo com furo para introdução do pinhão.....	57
Figura 4.21 Peça de ligação ao atuador e ao veio.....	58
Figura 4.22 Apertos possíveis para a garra projetada.....	58
Figura 4.23 Círculos primitivos de 20mm de diâmetro para furos dos veios.....	59
Figura 4.24 Corte da palma para a rotação de 90° do dedo.....	60
Figura 4.25 Posição do motor em relação ao veio de suporte, na rotação máxima do dedo (90°).....	60
Figura 4.26 Palma do modelo base original.....	61
Figura 4.27 Palma final do projeto.....	61
Figura 4.28 Base do modelo base original.....	62
Figura 4.29 Base final do projeto.....	62
Figura 4.30 Corte falange proximal.....	62
Figura 4.31 Falange proximal do modelo base.....	63
Figura 4.32 Falange proximal final.....	63
Figura 4.33 Falange distal do modelo base.....	64
Figura 4.34 Vista lateral falange distal.....	64
Figura 4.35 Representação falange proximal com sensor táctil e de força.....	65
Figura 4.36 Montagem motor ao suporte de um dedo rotativo.....	65
Figura 4.37 Suporte dedo rotativo.....	66
Figura 4.38 Simetria dos suportes dos dedos rotativos 1 e 2.....	66
Figura 4.39 Roda dentada motora (esquerda), roda movida (direita).....	67
Figura 4.40 Roda dentada motora com o suporte de ligação ao motor.....	68
Figura 4.41 Vista secção sistema de extensão/flexão dedo rotativo.....	68
Figura 4.42 Diferença entre suporte rotativo e suporte de dedo fixo.....	69
Figura 4.43 Engrenagem de 4 rodas para extensão/flexão dedo fixo.....	69
Figura 4.44 Vista do motor e da engrenagem de 4 rodas para o dedo fixo.....	71
Figura 4.45 Necessidade de baixar o atuador do dedo fixo por causa da rotação dos outros 2.....	71
Figura 4.46 Ligação aos motores simétricos.....	72
Figura 4.47 Suporte dedo fixo, Dynamixel AX-12A e Arduino.....	72
Figura 4.48 Ligação do Arduino ao suporte do dedo fixo.....	72
Figura 4.49 Célula de carga YZC-161B.....	73
Figura 4.50 Exemplo aperto precisão objeto oval.....	74
Figura 4.51 Ângulo máximo da falange distal com a proximal.....	74
Figura 4.52 Esquema célula de carga YZC-161B.....	75
Figura 4.53 Ligações das células de carga.....	75
Figura 4.54 Aumentar taxa de amostragem do HX711.....	76
Figura 4.55 Amostra de 10 valores medidos após calibração com peso.....	77
Figura 4.56 Esquema potenciómetro linear.....	78
Figura 4.57 Variação da resistência do potenciómetro.....	78
Figura 4.58 Esquema interno do potenciómetro membranar.....	78
Figura 4.59 Esquema de montagem do sensor táctil.....	79
Figura 4.60 Esquema individual da célula de carga com resistências $R_1$ e $R_2$ .....	80
Figura 4.61 Gráfico da tensão do coletor em função da posição do toque.....	81
Figura 4.62 Linearidade da saída em função da resistência de pull-up.....	81
Figura 4.63 Erro em função da posição de toque.....	82
Figura 4.64 Pins do Dynamixel AX-12A.....	84
Figura 4.65 Esquema de montagem dos atuadores.....	84
Figura 4.66 Ligações ao tri-state buffer.....	85

Figura 5.1 Conversor USB-porta série.....	87
Figura 5.2 Fase inicialização.....	88
Figura 5.3 Fase configuração de aperto .....	88
Figura 5.4 Fase de preensão.....	89
Figura 5.5 Fase de verificação do aperto .....	90
Figura 5.6 Gráfico de força aperto 2 dedos.....	91
Figura 5.7 Gráfico sensor tátil aperto 2 dedos.....	91
Figura 5.8 Fase 2 da preensão.....	92
Figura 5.9 Fase 3 da preensão.....	92
Figura 5.10 Fase 4 da preensão.....	93
Figura 7.1 Rodas dentadas eixo paralelo .....	98
Figura 7.2 Rodas dentadas cónicas .....	99
Figura 7.3 Roda dentada eixos cruzados.....	99
Figura 7.4 Movimento rotativo da garra .....	100
Figura 7.5 Movimento translação garra .....	100
Figura 7.6 Apertos cilíndricos, esféricos e de gancho na mão humana .....	101
Figura 7.7 Exemplo apertos de precisão e potência mão humana.....	102



# Lista de Quadros

Quadro 1.1 Mission Statement do produto .....	3
Quadro 1.2 Requisitos Desejados .....	5
Quadro 1.3 Lista de métricas do projeto .....	7
Quadro 1.4 Cronograma projeto .....	10
Quadro 3.1 Vantagens e Desvantagens tecnologias sensitivas .....	34
Quadro 4.1 Força aplicada à mola e deslocamento da mola .....	51
Quadro 4.2 Especificações rodas dentadas orientação .....	55
Quadro 4.3 Especificações roda motora dedo rotativo .....	67
Quadro 4.4 Especificação roda movida dedo rotativo .....	67
Quadro 4.5 Especificações roda motora .....	69
Quadro 4.6 Especificações primeira roda livre da engrenagem .....	70
Quadro 4.7 Especificações segunda roda livre da engrenagem .....	70
Quadro 4.8 Especificações roda movida (fim da engrenagem) .....	70
Quadro 4.9 Especificações célula de carga YZC-161B .....	73
Quadro 4.10 Erros máximos em função do valor da resistência de pull-up.....	82
Quadro 4.11 Valores de calibração do Dynamixel Ax-12A .....	86
Quadro 7.1 Nomenclatura de apertos de acordo com a forma do objeto a apreender .....	101
Quadro 7.2 Nomenclatura aperto de acordo com o propósito (Neumann, 2002).....	101



# 1. Introdução

O sucesso de um projeto deve-se a um ciclo iterativo onde questões, métodos e dados são analisados e avaliados, culminando em novas ideias, revisões e aperfeiçoamentos. Os resultados da pesquisa devem ser partilhados, e facilmente examinados por terceiros, para que a mesma metodologia possa ser replicada e servir de elemento de apoio para trabalhos futuros. A primeira secção do trabalho tem como objetivo apresentar o problema, identificar um plano de trabalho e conduzir de forma estruturada o desenvolvimento da dissertação.

Seguidamente, os resultados de pesquisa na área da manipulação são apresentados na secção dois *Estado de Arte*. Isto permite que na fase de projeto se possam discernir ideias competitivas para realização da mesma função, e contribui para um maior aprofundamento da temática.

A secção *Fundamentos teóricos* inclui alguns dos conhecimentos necessários para a realização do projeto, quer na implementação, quer na escolha das tecnologias a utilizar. Menciona-se alguma terminologia, do domínio da mecânica, sensorização e apertos, que é depois referida nas secções posteriores.

O capítulo *Projeto* apresenta o trabalho realizado, justifica as escolhas e direções tomadas, o material utilizado e o esquema das ligações elétricas.

A secção *Resultados* demonstra o funcionamento do conjunto final, integrando a componente mecânica, eletrónica e computação do trabalho.

Por fim, a *Conclusão* integra e sintetiza os tópicos apresentados durante a dissertação, refletindo sobre o problema inicial e os objetivos definidos. Também são efetuadas recomendações, prevendo avanços futuros na área, e elementos para pesquisa futura.

## 1.1. Motivação

Os robots com locomoção baseada em pernas apresentam diversas vantagens quando são comparados aos robots com tração de rodas. A locomoção baseada em pernas, seja em robots bípedes, quadrúpedes ou *hexapods* permite uma maior interação do robot com os ambientes físicos genéricos, sejam estes compostos por irregularidades no terreno ou por coeficientes de fricção diversos (superfície do gelo, etc). Para além disto, quando o problema da estabilidade, que é mais exigente do ponto de vista computacional do que em robots com rodas, é resolvido, estes robots apresentam uma maior agilidade e possuem a vantagem de se poder levantar e adaptar a sua posição (*gait*) para correção de falhas e conciliação ao meio (De Santos, Garcia, & Estremera, 2006).

Alguns dos problemas dos robots com pernas são o seu peso total e a tarefa de manipulação de objetos envolver um acréscimo de manipuladores ao esqueleto do mesmo, contribuindo para o aumento de peso, exigência que condiciona a capacidade de processamento e a diminuição da autonomia energética. Contudo, estes robots apresentam a possibilidade de usar momentaneamente uma das pernas como manipulador, enquanto as restantes seriam utilizadas para o equilibrar. Isto implicaria um suporte capaz de exercer tarefas de manipulação genéricas e de sustentar o peso do robot. O propósito da corrente tese é desenvolver um sistema integrado capaz de suportar o peso do robot e ao mesmo tempo, manipular diferentes objetos com elevada precisão.

## 1.2. Objetivos

São capturadas certas definições, restrições e suposições tomadas. Este documento, sob a forma do Quadro 1.1, sumariza a direção seguida no desenvolvimento de um sistema de acordo com o modelo apresentado em (Ulrich & Eppinger, 2012) para o *Mission Statement* de um produto.

*Quadro 1.1 Mission Statement do produto*

<b>Plataforma integrada de locomoção robótica e de manipulação para robots terrestres</b>	
<b>Descrição do produto</b>	Plataforma integrada de locomoção terrestre, capaz de suportar o peso do robot, ser robusta contra os impactos e de manipular objetos com diferentes configurações e orientações, com sensorização para deteção e doseamento de força.
<b>Proposição de Benefícios</b>	Múltiplas funções numa única plataforma. Não há necessidade de transportar um manipulador extra. Diminuição do peso total e aumento da autonomia energética do robot.
<b>Objectivos-chave do trabalho</b>	Servir como plataforma para futuros trabalhos da FEUP em robots com locomoção com pernas. Contribuir para a valorização e transferência de conhecimento e produtos para a sociedade.
<b>Mercado/ Aplicações</b>	Busca e salvamento. Veículos autónomos guiados. Plataformas de pesquisa e desenvolvimento. Aplicações em terreno irregular.
<b>Suposições e Restrições</b>	Parte mecânica impressa em 3D. Interface compatível com PC's

### 1.3. Arquitetura do Sistema

Uma arquitetura é uma decomposição de alto nível de um sistema, nos seus componentes fundamentais, acompanhada da caracterização da interação desses componentes (van Vliet & Tang, 2008). O *product breakdown structure*, apresentado na Figura 1.1, permite uma maior clareza na definição do que é o produto e na relação do mesmo com as suas partes constituintes.

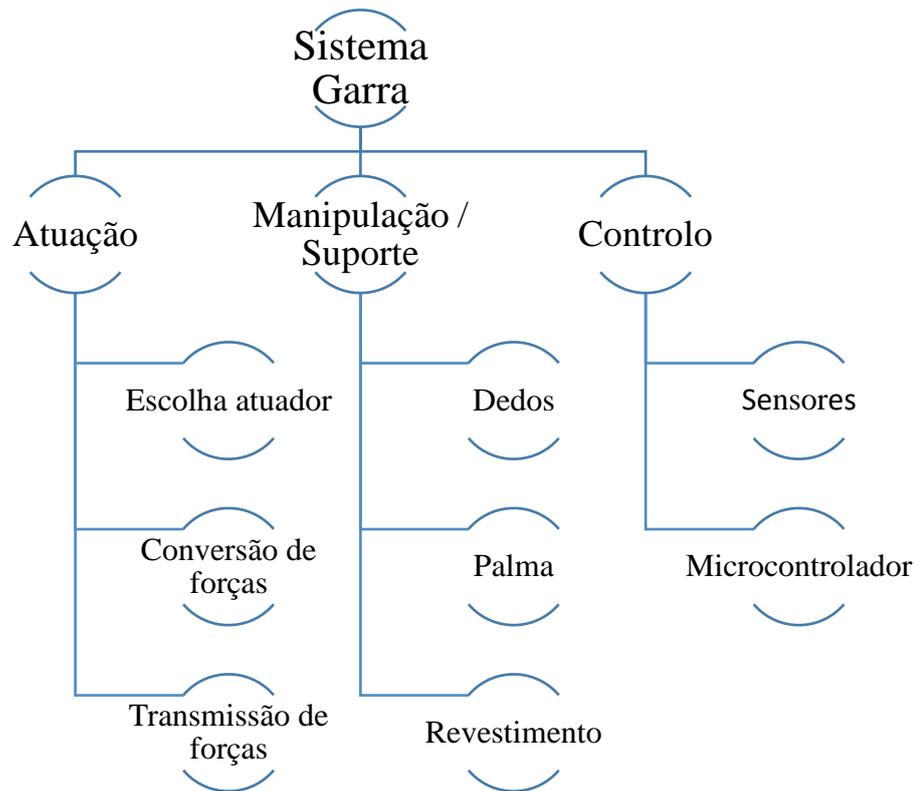


Figura 1.1 Product Breakdown System

### 1.4. Caracterização do problema

Nesta secção pretende-se estabelecer um conjunto de características desejadas que definam em elevado detalhe as capacidades que o produto poderá ter, como visualizado no Quadro 1.2. É importante frisar que estas características são construídas do ponto de vista da função e não da implementação (*what-not-how*), a qual é estudada em detalhe nas fases posteriores do projeto.

Quadro 1.2 Requisitos Desejados

Número	Nível	Requisito	Importância
1	Sistema	Ser seguro	4
2	Sistema	Robusto a impactos	3
3	Sistema	Suportar o peso do robot	5
4	Garra	Suporte estável durante o contacto da perna robótica ao chão.	5
5	Perna	Reduzir vibrações dos terrenos e pisos.	1
6	Sistema	Dispor de paragem de emergência.	4
7	Sistema	Poder ser usado na proximidade de pessoas.	2
8	Sistema	Ser energeticamente eficiente.	4
9	Sistema	Continuar em operação após várias horas consecutivas.	2
10	Sistema	Ser leve.	4
11	Sistema	Ser fácil de transportar.	1
12	Sistema	Fácil de instalar/montar.	1
13	Garra	Dispor de interface comunicação com PC	4
14	Garra	Dispor de interface mecânica com robots industriais.	3
15	Garra	Manipular diferentes objetos.	5
16	Garra	Aperto ótimo no objeto	2
17	Garra	Adaptação em tempo-real às caraterísticas do objeto.	4
18	Sistema	Adaptação em tempo-real às caraterísticas do movimento	3
19	Sistema	Corrigir offsets resultantes dos sensores	4
20	Garra	Detetar deslizamento do objeto.	3
21	Garra	Detetar perda do objeto durante a manipulação.	4
22	Garra	Detetar deformações do objeto.	3
23	Garra	Corrigir orientação e posição do objeto durante a manipulação.	2
24	Sistema	Medir o desempenho das tarefas pretendidas	2

25	Sistema	Exportar dados para análise num pc.	4
26	Sistema	Acesso fácil aos dados medidos (saídas do sistema).	2
27	Sistema	Velocidade rápida em terreno irregular	1
28	Sistema	Ajuste sensibilidade ao piso	2

## 1.5. Métricas

Foi necessário produzir uma lista das métricas inerentes ao projeto (Quadro 1.3). Estas, consideram as características definidas anteriormente e pretendem definir atributos mensuráveis e precisos do produto, que refletem o grau de satisfação do cumprimento dos requisitos.

Quadro 1.3 Lista de métricas do projeto

Número	Especificações	Métrica	Importância	Unidades SI
1	1	DIN EN ISO 13849	4	Binário (pass/fail)
2	2,3	Tensão mecânica sistema	3	Pa
3	2	Velocidade crítica em queda livre (ASTM D3332)	3	m/s
4	4,5,26	Análise estabilidade estática	2	Abst.
5	6,29	Atenuação garra-perna em 10Hz	1	dB
6	30	Gama de ajuste do coeficiente de amortecimento	1	N*s/m
7	1,7	Tempo paragem do sistema	3	s
8	1,8,9,26	Máximo tempo de resposta deteção colisão	2	s
9	8,9	Distância máxima de deteção colisão	2	m
10	8,9	Ângulo abertura de deteção colisão	2	rad
11	10,11,26	Velocidade ótima de trabalho	4	m/s
12	10,11,26	Aceleração ótima de trabalho	2	m/s <sup>2</sup>
13	8,9,10,11,26	Trajectoria ótima de trabalho	2	Lista
14	12,13	Massa total	3	Kg
15	14	Tempo Instalação	1	s
16	14,15	Quantidade canais de comunicação	2	Lista
17	15	Compatibilidade comunicação	4	Lista
18	16	<i>Backlash</i> <sup>1</sup> horizontal	2	m
19	16	<i>Backlash</i> radial	2	rad
20	2,4,17	Método de prensão	5	Lista
21	1,17,18,19,20,25	Gama ajuste doseamento força	4	N
22	18,19,20,25	Orientação forças	4	Lista [rad]

<sup>1</sup> Máxima distância ou ângulo que uma peça se desloca, sem aplicação de uma força no próximo elemento mecânico da sequência. Considerada “zona morta” em mecânica.

23	17,18,19,20,25	Posição de exerceção das forças	4	Lista [m]
24	20	Aceleração do sistema	3	m/s <sup>2</sup>
25	17,19,20,25	Binário garra	4	N*m
26	20,25	Orientação do sistema	2	Lista [rad]
27	21,22,23,24	<i>Soft-Sensors</i>	2	Abst.
28	22	Sensibilidade de deslizamento	3	m
29	17,23,25	Massa do objeto	3	Kg
30	27	Formato dados exportação	1	Lista
31	28	Acesso fácil aos dados medidos	2	Abst.

## 1.6. Tipologia de projeto

Existem quatro tipologias de projetos de desenvolvimento de produto podendo-se categorizar nas seguintes (Ulrich & Eppinger, 2012):

1. Plataformas para novos produtos;
2. Derivados de plataformas de produtos já existentes;
3. Melhoria incremental de produtos existentes;
4. Produtos fundamentalmente novos.

Como o objetivo da corrente tese é desenvolver um produto, neste caso, uma plataforma que desempenhe ambas as funções de locomoção e de garra num robot, poder-se-ia enquadrar na junção de tipo 2 e 4 de projetos de desenvolvimento. Assim, este projeto irá compreender as funcionalidades de plataformas de produtos já existentes e estudados no mercado, como é o caso dos manipuladores (tipo 2). Contudo, não é dirigido a mercados familiares já que envolve conceitos de aplicação inovadores, como a função simultânea de “pé” e garra (tipo 4).

## 1.7. Diagrama de fluxo

O processo de desenvolvimento de um produto segue uma estrutura contínua de atividade e informação, em que cada fase de desenvolvimento do produto é seguida de uma revisão para confirmar que a fase foi completada com sucesso, e assim, determinar se o projeto pode prosseguir. O esquema escolhido é o “processo de desenvolvimento de sistemas complexos”, representado na Figura 1.2. Isto, pois o produto final é formado por muitos subsistemas e componentes que interagem uns com os outros. Na fase de desenvolvimento conceptual foi considerada a arquitetura do sistema global juntamente com alguns conceitos competitivos para o sistema. Após seleção de um conceito, o sistema foi decomposto em vários subsistemas, e destes em vários componentes que foram trabalhados em paralelo. Cada um dos subsistemas encontra-se descrito no *product breakdown structure* (Figura 1.1). O teste e melhoramento final inclui a integração do sistema após extensivo teste e validação individual de cada um dos seus níveis.

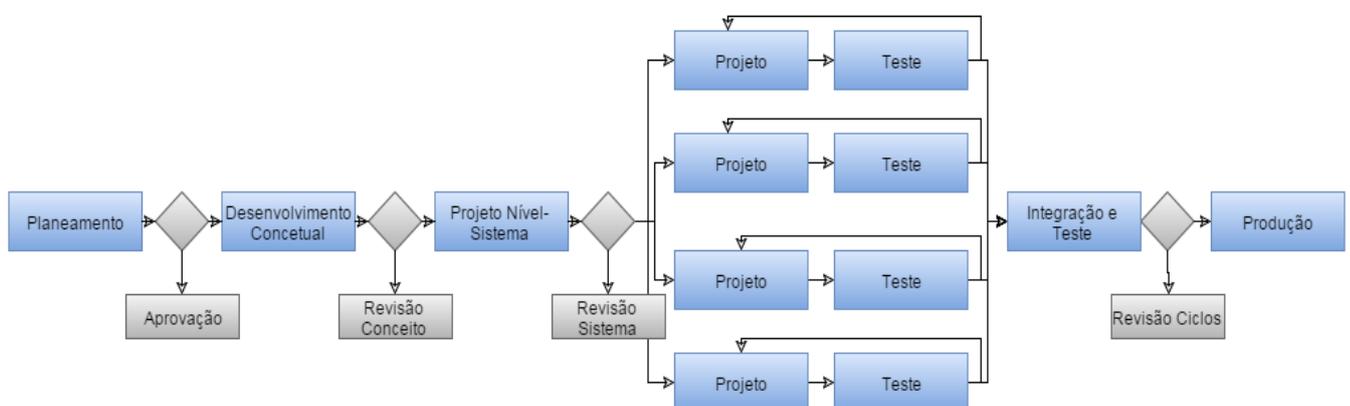
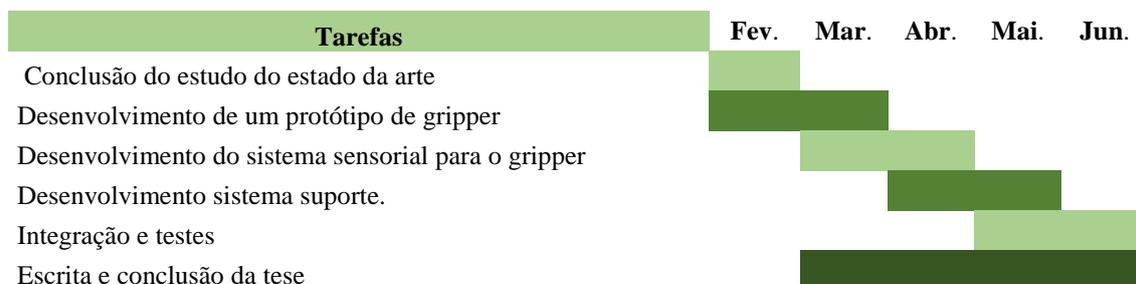


Figura 1.2 Diagrama de fluxo sistemas complexos

## 1.8. Cronograma do projeto

É apresentado o cronograma do projeto sob a forma do Quadro 1.4.

*Quadro 1.4 Cronograma projeto*



## 1.9. Reuniões e interações com o orientador

O projeto foi acompanhado com frequência com reuniões pelo professor orientador Paulo José Cerqueira Gomes da Costa, havendo um contacto constante igualmente desenvolvido pela prontidão de esclarecimentos e orientação através dos meios informáticos. O professor José Gonçalves igualmente disponibilizou-se no projeto dos sensores e acompanhou parte da montagem. O maior condicionalismo no desenvolvimento do projeto foram os aspetos técnicos, a impressão e montagem, na integração dos vários componentes, e a fase final de testes.

## 2. Estado de Arte

### 2.1. Enquadramento atual e futuro do projeto

Como o projeto apresenta uma componente forte de desenvolvimento tecnológico, optou-se por utilizar a técnica de *technology roadmap*. Esta técnica permite coordenar o desenvolvimento tecnológico com o planeamento do produto (Ulrich & Eppinger, 2012). Assim, serão apresentados os *roadmaps* do desempenho, e os funcionais e tecnológicos, para facilitar a determinação de potenciais progressos da ciência a curto e longo prazo na área da manipulação robótica. Isto conduz a um entendimento mais profundo do produto a desenvolver e foi utilizado como uma das entradas na etapa de desenvolvimento conceptual.

#### 2.1.1. Desempenho, avaliações e classificações

A área de manipulação, definida atualmente como a área da robótica em que múltiplos manipuladores ou dedos cooperam para agarrar e manipular objetos, foi identificada como uma das capacidades críticas a explorar no futuro. Contudo, esta definição não nos permite qualificar ou quantificar a “capacidade de manipulação” do robot, nem explicita as vantagens ou desvantagens do aumento desta capacidade em sistemas robóticos. Assim, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST), define até 2020 a necessidade da criação de um conjunto de artefactos, métricas e testes para avançar o desenvolvimento de componentes, passíveis de serem utilizados em mãos e garras robóticas. As medições do desempenho da “capacidade de manipulação” deverão ser dependentes do sistema integrado em questão e dos cenários da aplicação do produto, definidas em cooperação próxima com a indústria. Ainda, a presença de mecanismos que permitam a transferência dos resultados de instituições académicas para aplicações industriais, como métodos normalizados de testes, permite a validação de soluções inovadoras que consigam corresponder aos requisitos do mercado.

De modo a normalizar a capacidade manipulativa, poder-se-iam utilizar métodos similares ao SHAP (*Southampton Hand Assessment Procedure*), desenvolvido como forma de medir o desempenho de membros superiores protésicos (Kyberd, 2011). Este teste define 26 tarefas com 8 objetos abstratos. Devem ser realizadas 14 atividades pelo sujeito-teste e analisadas medidas de sucesso e velocidade que serão depois

usadas para calcular o desempenho geral. Outro aspeto importante seria a definição de vocabulário técnico normalizado pertencente à taxonomia da manipulação robótica, que atualmente não é normalizado.

As métricas de avaliação de desempenho deverão ter em atenção os seguintes aspetos:

#### **Mecânicos**

- Controlo posição;
- Controlo de binário dos dedos;
- Capacidade do aperto (tamanho e massa do objeto);
- Tipos de apertos;
- Exatidão;
- Repetibilidade.

#### **Sensorização**

- Forças normais e pressão;
- Sensibilidade ao impacto;
- Localização do toque.

#### **Tarefas funcionais**

- Efeitos dinâmicos/estáticos da estabilidade do aperto;
- Manipulação do objeto durante o aperto (reconfiguração da posição);
- Utilização da leitura dos sensores para controlar as posições e forças dos dedos.

As métricas de avaliação da capacidade manipulativa das garras robóticas deverão ter em atenção os seguintes aspetos:

#### **Mecânicos**

- Volume alcançável (posições e orientações que atinge dentro do espaço de trabalho);
- Espaço de operação (posições e orientações em que a garra consegue efetuar a operação requerida eficazmente).

#### **Funcionais**

- Espaço de acesso confinado;
- Manipulação de objetos em movimento;
- Manipulação cooperativa multi-garras.

Estes testes deverão ser realizados em ambientes estruturados (luz controlada e outras condições ambientais estáticas) e com operações industriais padrão.

### **2.1.2. Funcionais e tecnológicos**

A evolução desta tecnologia é feita no sentido do aumento da capacidade manipulativa das garras robóticas e da reatividade a condições e forças externas, reduzindo a massa do sistema e aumentando a sua

eficiência energética. Em sistemas multi-garras, o objetivo é permitir a execução de tarefas colaborativas através da integração de sensores e percepção 3D, aumentando a coordenação da garra com recurso a sistemas visuais autónomos.

Definem-se como objetivos a cumprir para a próxima década:

- Projeto de ferramentas de modelação para atuadores avançados;

Desafios para os atuadores incluem a falta de ferramentas tecnológicas de modelação e o melhoramento da leitura da posição absoluta do robot.

- Desenvolvimento de materiais de ligas simultaneamente fortes e leves;

Desafios para o desenvolvimento de estruturas leves e robustas incluem a evolução de técnicas de fabrico de materiais compósitos e ligas metálicas mais leves e robustas.

- Alcançar elevada resolução da força exercida, compatível com operações na proximidade de humanos;

Desafios tecnológicos que envolvem o controlo de um elevado número de graus de liberdade (*DOF*), a computação em tempo-real para reação a forças externas (conformação a forças) e requisitos energéticos.

- Alcançar elevada resolução nos sistemas sensoriais.

O desenvolvimento de matrizes de sensores de alta resolução nas mãos e dedos das garras robóticas, capazes de sentir o contacto em qualquer posição da mão, é uma necessidade na corrida ao aumento da capacidade manipulativa dos robots. Ainda, à semelhança humana, os sensores tácteis deverão possuir capacidades avançadas tais como a leitura das forças de cisalhamento e normais, temperatura e vibrações (Vallbo & Johansson, 1984).

## **2.2. Impressão 3D**

Para a construção da garra, que foi adaptada de acordo com o material disponível e os objetivos pretendidos, foi utilizada a impressão 3D. Este processo de fabrico, apresenta inúmeras vantagens tais como:

- Diminuição do tempo de desenvolvimento. As ideias dos protótipos podem ser mais rapidamente integradas e testadas;
- A impressão é um processo aditivo de material em camadas, diminuindo o custo quando comparado com outras técnicas de fabrico tradicionais;
- Permite a customização das peças com as especificações desejadas.

A impressora 3D disponibilizada na FEUP, na sala I-108 do laboratório de investigação do edifício de eletrotécnica (I) é uma *Flashforge Creator Pro* de dupla extrusão. Utiliza o método de modelagem por fusão e deposição (*FDM*), que é um dos processos para imprimir em materiais termoplásticos como o ABS, elastómeros e poliéster. O material que formará a peça é aquecido a uma temperatura de 200°C e extrudado através do bico extrusor da impressora para uma plataforma. O filamento é depositado em camadas de acordo com o desenho efetuado no sistema CAD, que gera as coordenadas linha a linha da peça. A *Flashforge Creator Pro* admite filamentos de 1.75mm de diâmetro, uma velocidade de impressão variável de 40 a 100 mm/s e uma precisão de coordenadas (x,y) de 11 micrón. Pode-se definir o espaçamento entre camadas, para aumentar ou diminuir a densidade da peça, entre 100 e 500 micrón.

Após especificação da peça num programa CAD, utilizou-se o ficheiro .stl em conjugação com o software *3DSimplify* para imprimir segundo a orientação (x,y,z) mais conveniente. A extensão .stl corresponde a uma aproximação do sólido por triângulos. Quanto maior a complexidade da peça, maior o número de triângulos necessários para a descrever. Um conjunto de boas práticas seguidas para a impressão são:

- Escolher a orientação de impressão que minimize a quantidade de suporte necessária;
- Evitar curvas de concordância, fazendo, sempre que possível, uma inclinação de 45° na impressão como se demonstra na Figura 2.1;

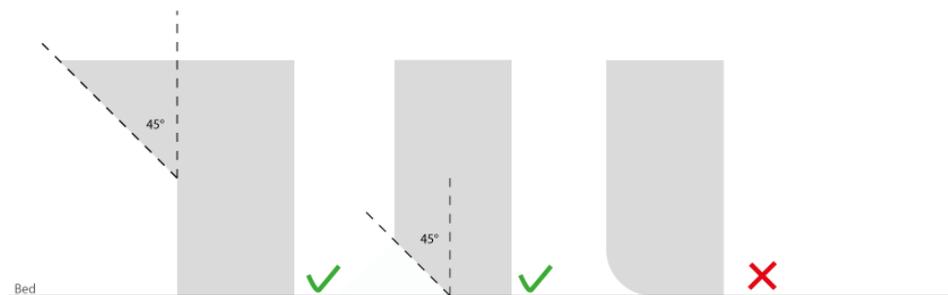


Figura 2.1 Boas práticas para impressão (retirado de <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-tips/>)

Isto evita o uso desnecessário de suporte, e como tal, consegue-se cortar o custo total de material e diminuir o tempo da impressão.

- Sempre que duas peças fossem projetadas para encaixar uma na outra (*mate* coincidente) deverá ser deixada uma tolerância de 0.25mm em cada uma das peças.

## 2.3. Software

Alguns dos softwares disponíveis para desenho CAD são:

- Geomagic Design;
- AutoCAD;
- Inventor;
- IronCAD;
- CadKey;
- ProE;
- Rhino;
- Siemens Nx;
- SolidWorks.

A escolha do software CAD utilizado no projeto deve-se à licença do SolidWorks Student Edition 2015 ser disponibilizada gratuitamente aos estudantes da FEUP. Também por ser um dos programas mais amplamente utilizado pela indústria, como se exemplifica pela Figura 2.2.

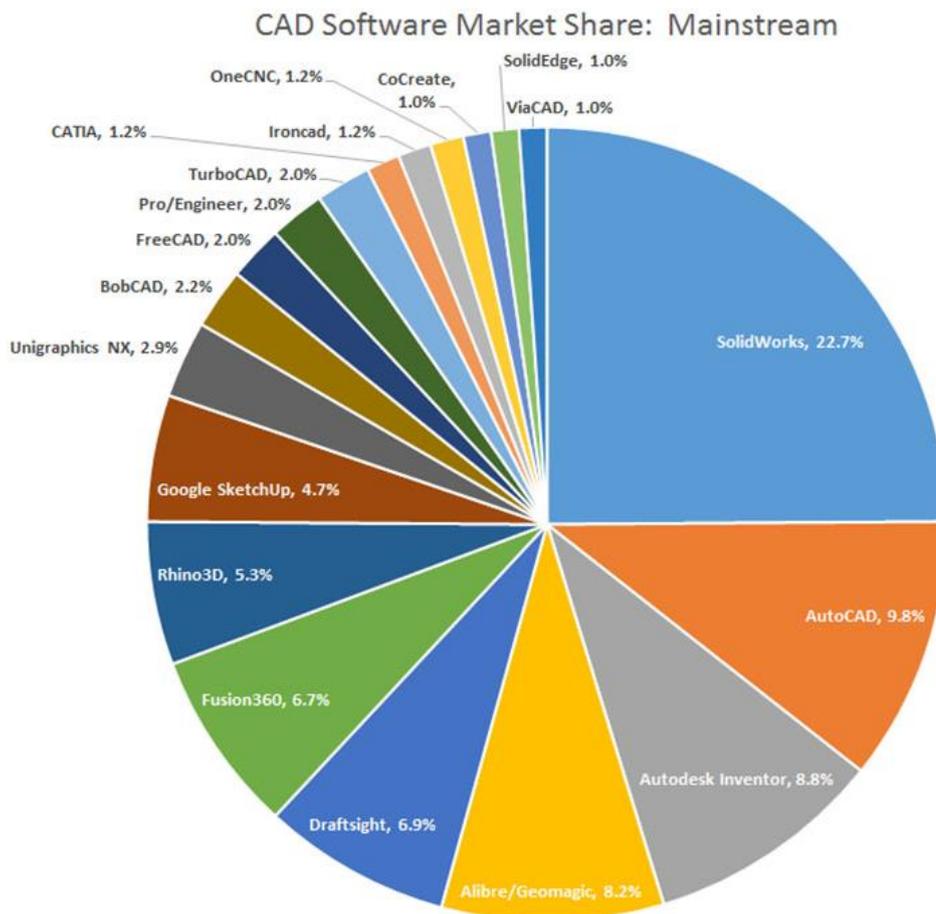


Figura 2.2 Análise mercado produtos CAD (retirado de <http://blog.cnccookbook.com/2015/01/20/results-2015-cad-survey/>)

## 2.4. Matemática

Alguns dos softwares disponíveis para tratamento matemático, representação gráfica e simulação são:

- Mathematica;
- Sage;
- GNU Octave;
- SciPy;
- SciLab;
- Matlab.

Neste projeto foi escolhido o programa Matlab dado o encorajamento no seu uso no plano curricular do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na FEUP. É um programa completo que permite o desenvolvimento de algoritmos, a realização de computação numérica e simbólica, análise e exportação gráfica dos dados e modelamento e simulação. É das ferramentas computacionais mais utilizadas, para análise de dados em contexto académico, como pode ser inferido pela Figura 2.3.

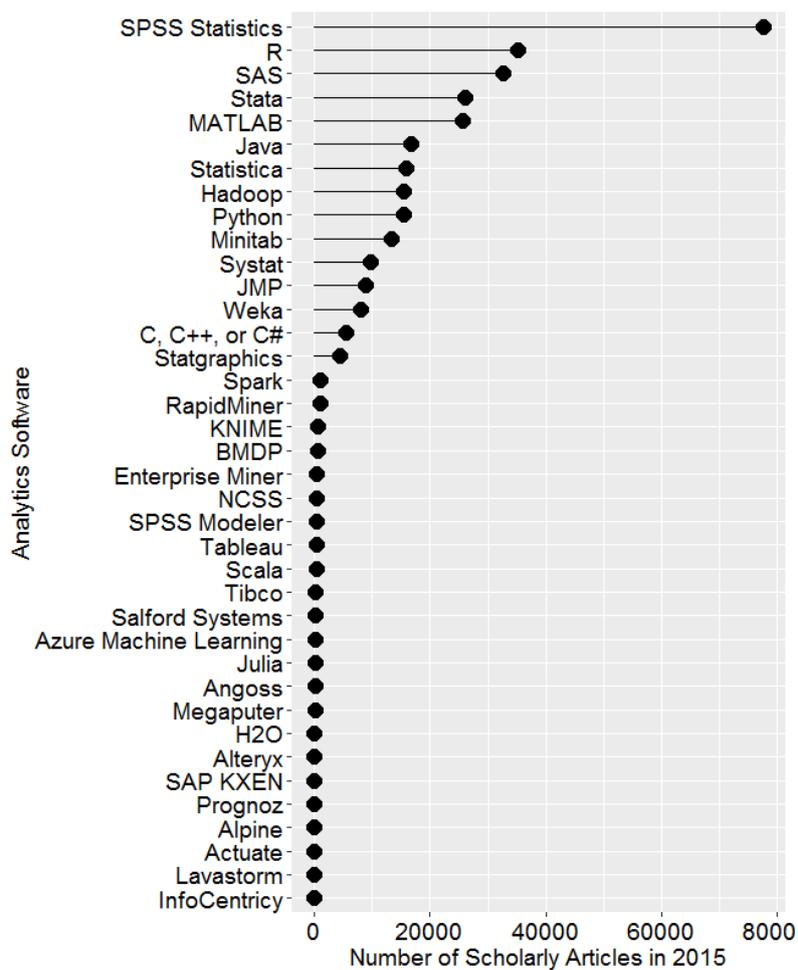


Figura 2.3 Análise software para análise dados (retirado de <http://r4stats.com/articles/popularity/>)

## 2.5. Representação de circuitos

Algumas das hipóteses disponíveis seriam:

- KiCAD;
- Ni Circuit Design;
- Fritzing;
- TinyCAD.

Para a representação dos esquemas de montagem foi utilizado o software TinyCAD pela biblioteca de componentes presentes (Arduino Uno R3) e por ser *open-source*.

## 2.6. Análises de casos: Garras com sub-atuação

### 2.6.1. MARS

A garra MARS (*Minimally Actuated Robotic System*) representada na Figura 2.4 foi construída para testes aos mecanismos de sub-atuação dos dedos. Os dedos são lisos tornando-se mais fácil de fabricar e facilitando o aperto de talas de objetos pequenos. Uma particularidade interessante é a capacidade de os três dedos da mão rodarem  $60^\circ$  na palma. O atuador é um motor DC sem escovas (*BLDC*) responsável pela abertura e fecho dos dedos. O mecanismo projetado consiste num fuso de esfera recirculante para obter um maior binário e uma correia, sendo possível modificar a relação de transmissão. Cada dedo é um bloco modular e existe um pequeno motor responsável pela orientação desse dedo. A transmissão de força é feita por meio de engrenagens. Cada módulo tem dois atuadores, um para fecho e outro para configurar a orientação, perfazendo um total de seis atuadores na garra. Os dedos têm três graus de liberdade para o aperto e um grau de liberdade para a orientação, resultando em doze graus de liberdade para a garra. A sua construção é em alumínio e o peso final de nove kg.



Figura 2.4 Garra MARS (retirada de <http://robot.gmc.ulaval.ca/en/research/research-thrusts/mains-et-prehenseurs/the-mars-hand-robust-underactuated-robotic-hand/>)

## 2.6.2. SARAH

A mão SARAH (*Self-Adaptive Robotic Auxiliary Hand*), apresentada na Figura 2.6, tem a capacidade de rodar dois dos três dedos na palma segundo um ângulo de 90°. Apresenta dois atuadores e dez graus de liberdade. Para conseguir este número reduzido de motores sem comprometer os graus de liberdade, o mecanismo de orientação dos dedos foi acoplado, fazendo com que os dedos rodem simultaneamente e simetricamente com apenas um atuador e uma engrenagem. As duas rodas dentadas da engrenagem são fixas aos dedos rotativos fazendo com que eles rodem em sentidos contrários. O segundo atuador é utilizado para a abertura e fecho dos três dedos. A orientação é controlada de forma mecânica pela introdução de uma peça de bloqueio que para a rotação da engrenagem ao encostar no diferencial da roda motora (Figura 2.5).

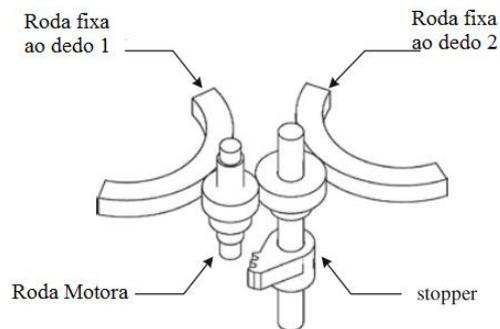


Figura 2.5 Exemplo de engrenagem orientação (Hugo, 2013)



Figura 2.6 Garra SARAH (Hugo, 2013)

### 2.6.3. IAMT

A IAMT é uma garra de três dedos com nove graus de liberdade, para a abertura e fecho, e um grau de liberdade para a orientação dos dedos. Em relação a SARAH, o número de atuadores aumenta para que cada dedo tenha a capacidade de agir independentemente dos outros, com três atuadores para os dedos e um motor de passo para a orientação. A construção é muito mais delicada, com diferenciais de dois níveis (Figura 2.7), exigindo maior precisão e calibração no processo de montagem. Os dedos devem estar na mesma posição inicial para que a prensão se efetue no centro da palma.

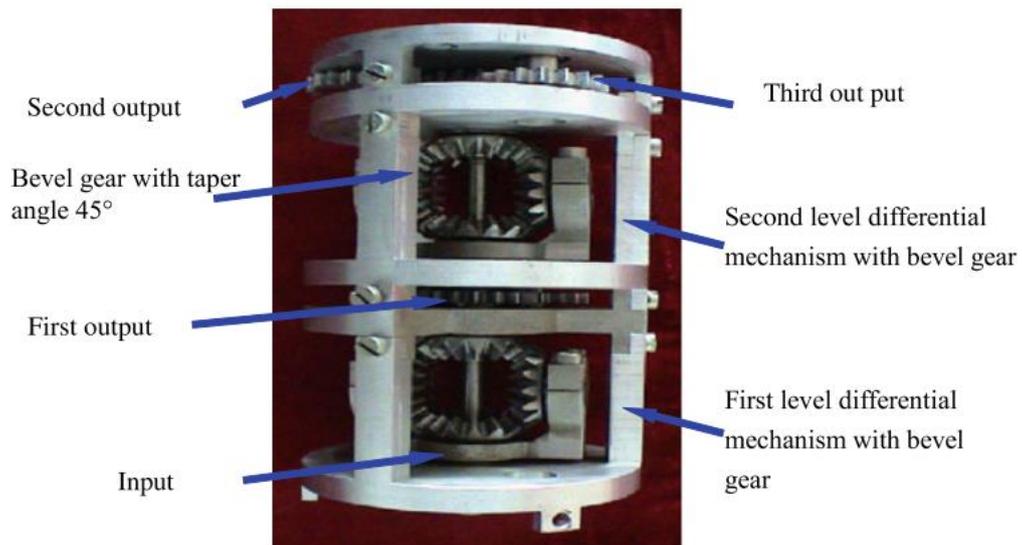


Figura 2.7 Diferencial usado em IAMT (Hugo, 2013)

## 3. Fundamentos teóricos

### 3.1. Características das garras e classificação

O ato de segurar objetos pode ser definido como um conjunto de contactos na superfície do objeto, cujo propósito é limitar potenciais movimentos na presença de perturbações externas (León, Morales, & Sancho-Bru, 2014). A preensão humana representa um dos mecanismos de manipulação mais inteligentes encontrados na natureza (Rovetta & Tanie, 1988), tendo servido como elemento de estudo para o desenvolvimento de novos manipuladores antropomórficos (Dario et al., 2005; Iberall, 1987). Contudo, estes manipuladores com elevada destreza e cinco dedos, não se encontram preparados para ambientes industriais onde devem lidar com tarefas repetitivas em condições perigosas com potencial sujidade (Monkman, Hesse, Steinmann, & Schunk, 2007).

Uma garra robótica pode ser definida como um subsistema de mecanismos que permitem o contacto temporário com o objeto a ser agarrado. Garantem a posição e orientação correta do objeto através de mecanismos de produção de força ou de elementos de ajuste de forma. Também se utiliza o termo garra em casos onde não se agarra o objeto, mas em vez disso este é segurado, como no exemplo da sucção ou forças de retenção eletromagnéticas (Monkman et al., 2007). As garras podem ser classificadas em quatro tipos, de acordo com o seu princípio de funcionamento, ou método de preensão:

- Impacto;
- Ingressivo;
- Continuidade;
- Astritivo.

As garras do tipo impacto necessitam do movimento dos dedos da garra de forma a produzir a força necessária, como representado na Figura 3.1. Aqui é possível distinguir forças de preensão de forças de retenção. A força de preensão é aplicada no início do processo de agarrar o objeto enquanto a força de retenção é mantida, até libertação do mesmo, e é geralmente inferior em magnitude à força de preensão.



Figura 3.1 Exemplo garra 2 dedos tipo impacto (retirada de <http://robotiq.com/products/adaptive-robot-gripper/>)

As garras do tipo Ingressivo resultam na deformação ou penetração da superfície do objeto até uma dada profundidade. É feita à custa de ganchos, pins e agulhas. A preensão de continuidade implica um contacto direto entre o sistema garra-objeto, utilizando adesão térmica ou química. Finalmente, as garras do tipo astritivo (Figura 3.2) são baseadas em forças de ligação entre superfícies sendo normalmente associadas a fenómenos de adesão magnética e electrostática e sucção de vácuo.



Figura 3.2 Exemplo garra tipo astritivo (retirado de <http://blog.robotiq.com/bid/65794/Magnetic-Robot-End-Effector-Top-5-Pros-and-Cons>)

O método de preensão é escolhido conforme as características do objeto a apreender, sendo que propriedades como a massa, volume e coeficiente de fricção irão determinar o dimensionamento da garra em termos de forças a exercer, métodos de preensão, topologia e volume e áreas de trabalho. Os métodos de preensão do tipo impacto são recomendados para objetos rígidos com superfícies de contorno regular. A preensão ingressiva utiliza-se em objetos flexíveis como a indumentária. A astritiva pode ser utilizada para materiais ferrosos, com recurso à adesão magnética, em micro-componentes e materiais leves com recurso à adesão elétrica e em materiais rígidos não porosos com o uso da sucção a vácuo. Finalmente, as garras do tipo continuidade são usadas para preensão de micro-componentes, utilizando técnicas de tensão superficial ou processos térmicos para objetos flexíveis têxteis, carbono e fibra de vidro.

### 3.2. Requisitos

Como anteriormente mencionado, a escolha da garra robótica depende do ambiente específico em que se enquadra e dos objetos com que deve interagir. No entanto, transversalmente a todos os sistemas definem-se fatores e requisitos que se podem classificar em:

- Requisitos tecnológicos;

Incluem força de prensão [N], diagrama de força de prensão, Dimensões [mm], trajetória de agarramento, tempo de prensão.

- Requisitos impostos pelos objetos;

Incluem massa, dimensões, volume, posição do centro de gravidade, superfície e resistência do material. Existe uma correlação entre a forma da garra (assume-se do tipo impacto) e as características do objeto. A massa do objeto impõe a força exercida pela garra, a posição espacial do objeto impõe a escolha dos pontos de contacto na fase de prensão, a forma impõe a superfície necessária para o agarrar e o tamanho da peça estabelece o alcance da prensão.

- Requisitos de qualidade;

Abarcam a precisão espacial, repetibilidade, dimensionamento das forças e estabilidade da prensão.

- Fatores externos.

Fazem parte as condições de armazenamento da garra, contaminações, humidade, temperatura, forças externas e vibrações.

Neste projeto serão aprofundados os conceitos das garras do tipo impacto já que os objetos a manipular serão primeiramente poliedros rígidos, não deformáveis. Futuramente, com o controlo de força torna-se possível manipular utensílios comuns como fruta, caixas, ovos e copos.

### **3.3. Influência do número de dedos**

Existem garras robóticas utilizadas em meio industrial com dois dedos, podendo chegar aos três ou aos cinco, à semelhança da mão humana. Contudo, as garras com cinco dedos devido às dificuldades de controlo não são largamente utilizadas à escala industrial, sendo exploradas e desenvolvidas nas áreas médicas e académicas. A razão que torna a mão humana tão atrativa é a presença de um mecanismo de rotação interno do polegar. Isto permite que o polegar se oponha aos restantes dedos e é utilizado na maioria dos apertos que usamos no nosso dia-a-dia (Orlando et al., 2013). Quando se utilizam vários dedos sob uma palma na construção da garra é comum que os dedos estejam localizados de forma a opor-se uns aos outros para rentabilizar a eficiência no aperto. A escolha do número de dedos de um manipulador é uma das escolhas mais fundamentais no início do projeto. Garras com quatro dedos podem manipular 99% dos objetos manipuláveis por garras com cinco dedos; garras com três dedos 90% de todos os objetos e finalmente, garras com dois dedos apenas 40% dos objetos (Lenarčič, Bajd, & Stanišić, 2013). Estas considerações devem ser tomadas em conta bem como a finalidade da aplicação para o correto dimensionamento da garra. A relação entre a flexibilidade no número de tarefas executadas e o desempenho atingido é exibido na Figura 3.3.

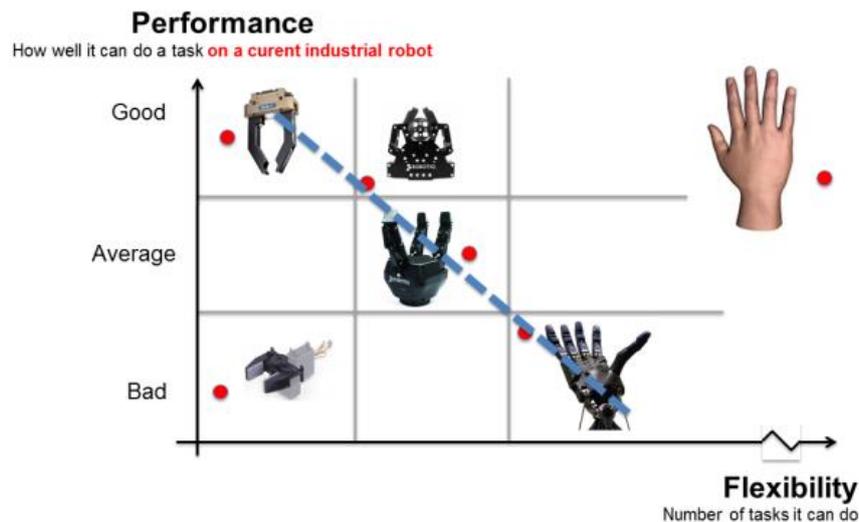


Figura 3.3 Flexibilidade vs. desempenho conforme número de dedos (retirada de <http://blog.robotiq.com/how-many-fingers-do-you-really-need-for-a-robot>)

### 3.4. Drives de atuação

Relativamente aos drives de atuação existentes estes podem ser:

- Pneumático;
- Hidráulico;
- Elétrico;
- Eletromagnético;
- Adesivo.

Será efetuado um tratamento dos primeiros três tipos segundo os modelos apresentados em (Hughes., 2006; Monkman et al., 2007; Morecki & Knapczyk, 1999).

#### 3.4.1. Pneumático

A atuação pneumática faz uso de fluidos compressíveis, usualmente o ar, para obtenção de energia. A pressão de trabalho, quando comparado com *drives* hidráulicos, faz que esta solução seja a mais segura e fácil de trabalhar. Ao contrário de outros líquidos, as propriedades dinâmicas do ar tais como a viscosidade nula e rigidez baixa tornam esta atuação mais atrativa. Algumas desvantagens são o potencial ruído causado pelo sistema e a facilidade de fugas do ar pressurizado com consequentes perdas de energia. Para cargas pesadas que exijam forças consideráveis com trajetória de movimento pré-definidas será melhor a utilização de outros modos de atuação, tais como atuação hidráulica. Podem-se categorizar os atuadores pneumáticos existentes em atuadores pneumáticos lineares, multi-posição e angulares.

### 3.4.2. Hidráulico

Os atuadores hidráulicos são adequados a aplicações que exijam elevada força mecânica já que conseguem produzir forças vinte e cinco vezes superiores às atingidas com cilindros pneumáticos de igual tamanho. Algumas das vantagens são o elevado rácio de potência/peso e a capacidade de manter força e binário constante sem fornecer mais fluido ou pressão (devido à incompressibilidade dos fluidos). As desvantagens são potenciais fugas como no caso dos atuadores pneumáticos, com consequente perdas energéticas e o agravamento da poluição ambiental que não existe no caso pneumático. Outra desvantagem é a necessidade de um elevado número de diferentes componentes como motores, válvulas, bombas hidráulicas, equipamento de redução de ruído, tornando o sistema final maior e mais difícil de acomodar. Esta atuação é ainda uma das mais utilizadas especialmente quando são precisos movimentos rápidos com grande capacidade de carga. Podem-se categorizar em atuadores hidráulicos lineares, rotativos, existindo também soluções híbridas eletro-hidráulicas.

### 3.4.3. Elétrico

Atualmente, cerca de 50% dos *robots* utilizam *drives* elétricos. As vantagens do uso destes são a facilidade de compra dos motores e o movimento preciso e seguro para sistemas de controlo sofisticados. Ainda, é mais fácil de instalar quando comparado com sistemas pneumáticos e hidráulicos, ocupam um menor volume e não necessitam de elevada manutenção pois não existe perigo de fugas. Apresentam menores perdas e reduzidos efeitos negativos no ambiente devido à poluição. No entanto, apresentam desvantagens tais como o rácio de potência/peso ou binário/peso que é pior nos motores elétricos no que nas soluções hidráulicas. Existem vários tipos de motores elétricos e nesta secção apenas serão discutidos os seguintes: motores DC com comutador, passo a passo e servo.

#### 3.4.3.1. Motores DC com comutador

Estes motores permitem o ajuste da velocidade e do binário, sendo por isso usados largamente na indústria e a sua arquitetura de controlo é conhecida e estudada. Para aumentar a aceleração  $\varepsilon_{max}$  num dado motor elétrico, é necessário aumentar o binário desenvolvido pelo motor ou diminuir o seu momento de inércia. Isto é demonstrado pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{max} = \frac{M_{Dap}}{I_s + I_{red}} \quad ( 3.1 )$$

Em que a aceleração ( $\varepsilon_{max}$ ) depende de:

$M_{Dap}$  – Binário máximo desenvolvido pelo motor.

$I_s$  – Momento de inércia do rotor.

$I_{red}$  - O momento de inércia reduzido do mecanismo do *drive*.

A equação de movimento deste motor quando a corrente flui pelo enrolamento de excitação é dada por:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Kw(t) \quad ( 3.2 )$$

U(t) – A tensão na armadura.

R – A resistência do enrolamento da armadura.

L – A auto-indutância do enrolamento da armadura.

I(t) – A corrente no enrolamento da armadura.

K – A força contra-eletromotriz.

W(t) – A velocidade angular.

Quando a corrente flui através do enrolamento da armadura a equação do movimento é descrita por:

$$M_m = J \frac{dw}{dt} + fw + M_t + M_r \quad ( 3.3 )$$

J – Momento de inércia das partes em rotação.

f – Coeficiente viscoso de fricção.

M<sub>r</sub> – Binário resultante da fricção em seco.

M<sub>t</sub> – Binário em carga.

W -Velocidade angular.

M<sub>m</sub> – Binário eletromagnético (proporcional à corrente da armadura).

Utilizando as duas equações descritas acima e aplicando a transformada de Laplace de ambos os lados pode-se chegar à função de transferência que relaciona a velocidade com a tensão.

$$G(s) = \frac{K}{I_s + (RJ + Lf)s + Rf + k^2} \quad ( 3.4 )$$

### 3.4.3.2. Motores Elétricos passo a passo

Os motores passo a passo permitem que se controle diretamente a posição do motor com recurso a um microcontrolador, sem necessidade de efetuar controlo em malha fechada. O veio deste tipo de motores roda numa série discreta de intervalos angulares bem definidos, sendo que cada um destes passos é dado conforme o impulso de entrada recebido. Se o número de impulsos for definido é fácil saber que o eixo rodou um certo ângulo e assim determinar a sua posição em malha aberta, desde que se saiba a posição inicial do eixo. Cada um dos passos dados é usualmente feito em menos de um milissegundo e é possível fornecer na entrada impulsos de elevada frequência, tornando o movimento do motor suave, aproximando-

se do funcionamento normal de um motor. Os ângulos do passo estão frequentemente entre 1.8 e 9 graus com binários que podem ir desde  $1\mu$  N.m para relógios de pulso até 40 N.m em motores de dimensão de 15 cm. Em malha-aberta, a saída é a posição angular do veio e a entrada um sinal digital de dois canais, um com os impulsos e outro que indica qual a direção para a qual o veio deve rodar (horário ou anti-horário). Os impulsos podem ser produzidos por um microcontrolador, oscilador ou controlador digital e são entrada do motor, que conta o número destes e roda esse mesmo número de vezes. Importa referir que enquanto o ângulo final é definido pelo número de impulsos recebidos, a velocidade média do eixo depende da frequência do sinal recebido, quanto maior a frequência maior será a velocidade. A ação do motor em cada passo não é perfeita já que o rotor demora um tempo finito a avançar de uma posição para a seguinte, ocorrendo um ligeiro *overshoot* seguida de uma oscilação antes da paragem na posição pretendida. Se o motor rodar a uma velocidade elevada, tal como 2000 passos/segundo, o tempo de paragem do veio entre passos sucessivos é nulo e o movimento do rotor torna-se suave e contínuo. Deve-se ter cuidado para que o aumento para esta velocidade do motor seja gradual e não repentino, e que caso seja necessário parar ou abrandar forneça-se um sinal com cada vez menor frequência para evitar erros no dispositivo incremental devido à sua energia cinética inicial que introduziria contagem de passos incorreta. Estes problemas podem ser resolvidos através de técnicas de controlo em malha fechada.

### 3.4.3.3. Controlo de posição e velocidade no servo

Os motores servos são frequentemente utilizados para aplicações de controlo em malha fechada. A posição angular do veio deve seguir uma tensão aplicada de referência. Um potenciômetro é normalmente montado no veio e permite a realimentação em tensão, proporcional à posição atual do veio. Deve-se ter em atenção para que a tensão do potenciômetro siga uma relação linear com a posição do veio e não altere com valores próximos da temperatura para não acumular erros no sistema. A tensão de realimentação é subtraída à tensão de referência e usada para gerar o sinal de controlo. Este sinal é nulo quando o veio está na posição de referência, fazendo com que a tensão aplicada no motor seja também esta nula, ficando o motor estacionário. Nesta circunstância, o motor oferece um binário restaurador caso saia da posição desejada. A resposta dinâmica do motor apresenta oscilações na resposta transitória que podem-se tornar inaceitáveis, requerendo o uso de realimentação da velocidade, conseguido com a introdução de um tacogerador. Este não altera as propriedades do regime estacionário, melhorando as propriedades do regime transitório.

Atualmente, o controlo é cada vez mais digital, em que um trem de impulsos gerado pelo *encoder* do veio do motor é comparado com um trem de impulsos de referência cuja frequência corresponde à velocidade desejada. Isto é conseguido através da malha de captura de fase (*phase-locked loop*). Este modo de controlo oferece mais flexibilidade no controlo de velocidades, *datalogging* e interfaces de comunicação com equipamento industrial.

As vantagens dos vários tipos de atuação discutidos são explicitadas na Figura 3.4.

drive system evaluation criteria					
	mechanical	pneumatic	hydraulic	magnetic	electric motor
high gripping force	◐	○	●	◐	○
controllability	○	○	◐	●	●
energy transmission	●	◐	○	●	●
insensitivity to dirt	●	◐	●	○	◐
maintenance	●	◐	◐	○	◐
emergency stop behaviour	●	◐	◐	○	○
constructional size	○	○	●	◐	◐
environmental influences	●	◐	○	●	●
costs	●	●	◐	◐	○

Figura 3.4 Vantagens dos vários tipos de atuação (Monkman et al., 2007)

## 3.5. Sensores

Os humanos são capazes de sentir com elevada precisão e rigor, o que lhes permite interagir, explorar, manipular e extrair características dos objetos com que entram em contacto. Propriedades como a forma, temperatura, textura, tornam-se assim rapidamente acessíveis. Esta informação é transmitida por vários recetores mecânicos, que fornecem informações de pressão e vibração, por termorecetores que fornecem informações relativamente à temperatura e nocirecetores que estão relacionados com a sensação de dor no nosso corpo. Para além da precisão de cada um destes pequenos recetores, a sua densidade é elevada sendo que as mãos são das zonas com maior densidade de recetores mecânicos tornando-as uma das zonas mais sensíveis para realimentação táctil. Os sensores tácteis usados em robótica são projetados também para sentir diversas propriedades dos objetos através do contacto físico com os mesmos.

As tecnologias tácteis são classificadas de acordo com o seu transdutor e serão apresentados algumas das principais como: capacitivos, piezoresistivos, magnéticos, óticos, binários e piezoelétricos (Martinez-Hernandez, 2016).

### 3.5.1. Capacitivos

Os sensores tácteis capacitivos baseiam-se na medida da variação da capacidade de uma carga ao longo de um condensador de placas paralelas. A capacidade depende da separação e área das placas. Esta tecnologia é bastante comum em robótica devido ao seu tamanho reduzido com consequente construção e integração em matrizes de elevada densidade.

### 3.5.2. Piezoresistivos

Este tipo de sensores mede variações de resistência resultantes de um contacto quando lhes é aplicada força. O valor máximo da resistência é obtido quando não há contacto ou pressão aplicado ao sensor. Quando ocorre um contacto a resistência decresce com o aumento da força de contacto.

#### 3.5.2.1. Células de carga

Composto por sensores piezoresistivos, são aprofundados os conceitos das células de carga. Uma célula de carga é um transdutor composto por vários elementos denominados extensómetros montados em posições precisas da estrutura. Este transdutor é utilizado para medir força ou pressão aplicada, convertendo essa grandeza num sinal elétrico relacionado com a força exercida. Existem vários tipos de células de carga tais como pneumáticas, hidráulicas e de extensómetros em folha. Para o projeto a desenvolver as últimas são de particular interesse.

### 3.5.2.2. Extensómetro de folha

Os extensómetros de folha são cada vez mais utilizados devido ao seu baixo custo e alta precisão. Funcionam segundo o princípio de variação de resistência por aplicação de força num material condutor normalmente metálico, dentro do seu limite elástico. Quando um metal é esticado, torna-se mais longo e fino, o que resulta no aumento da sua resistência entre extremidades opostas. Por sua vez, o inverso pode ocorrer se o material for sujeito a uma força de compressão tornando-se mais largo e pequeno como visualizado na Figura 3.5.

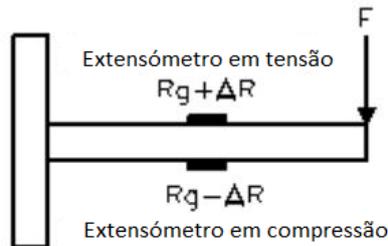


Figura 3.5 Variação da resistência do extensómetro por ação de tensão e compressão

Se a força exercida for maior que o limite elástico do condutor, irá deformá-lo permanentemente, resultando em desvios, perda de linearidade e, em último caso, na impossibilidade de utilização. As camadas de material condutor que formam o extensómetro distribuem-se sob finas camadas, num padrão de linha em zig-zag (Figura 3.6) para maior sensibilidade à pressão na direção de orientação paralela às linhas.

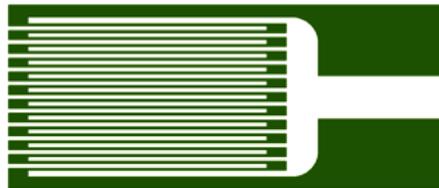


Figura 3.6 Exemplo extensómetro de folha. Disposição em zig-zag.

A resistência dos extensómetros, que em condições de livre carga varia entre  $30\Omega$  e  $3000\Omega$ , altera uma pequena percentagem ínfima da aplicação de força da escala total do transdutor (na ordem dos  $10e^{-3}$ ) e, portanto, utilizam-se amplificadores de instrumentação antes de ligar a um conversor analógico-digital e a um microcontrolador. Para medir as pequenas variações de resistência dos extensómetros utiliza-se um circuito em ponte de Wheatstone.

### 3.5.2.3. Ponte Wheatstone

A ponte de Wheatstone (Figura 3.7) é um circuito elétrico que consiste em dois divisores de tensão paralelos compostos pelas resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ,  $R_4$ . A tensão medida é tomada no meio dos nós dos divisores de tensão, entre os nós um e quatro ( $V_o$ ). A tensão  $U_B$  corresponde à tensão de alimentação do sistema entre os nós dois e três

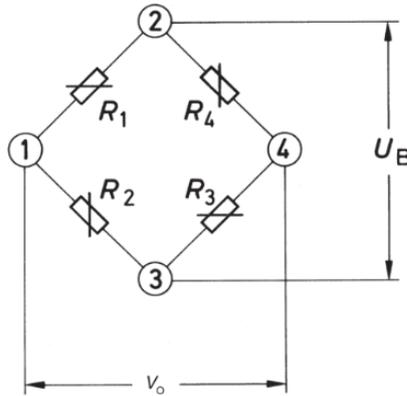


Figura 3.7 Exemplo ponte Wheatstone (Hoffmann, 1989)

Podem-se classificar as pontes de Wheatstone de acordo com o número de elementos sensíveis (transdutores) presentes na sua configuração:

Substituindo apenas uma das resistências por um extensômetro obtém-se **um quarto de ponte de Wheatstone** (Figura 3.8).

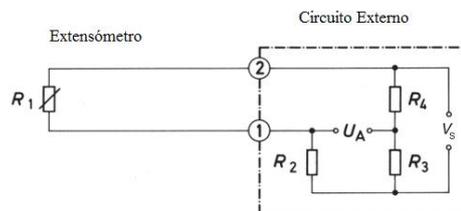


Figura 3.8 Circuito Wheatstone quarto de ponte (Hoffmann, 1989)

Substituindo duas das resistências obtém-se **meia ponte** (Figura 3.9).

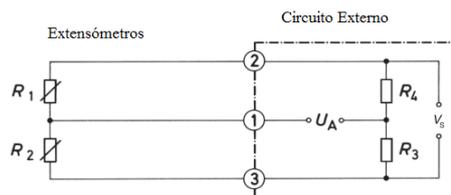


Figura 3.9 Circuito Wheatstone meia ponte (Hoffmann, 1989)

E se as quatro resistências forem todas substituídas diz-se que a configuração é de **ponte completa** (Figura 3.10).

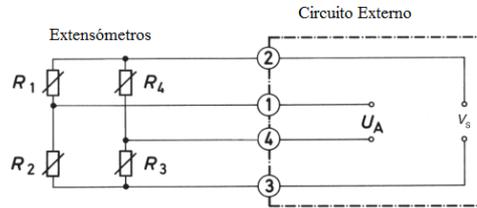


Figura 3.10 Circuito Wheatstone ponte completa (Hoffmann, 1989)

Este circuito pode ser usado para medir resistências elétricas determinando o valor absoluto de uma resistência por comparação com outras resistências de valor conhecido, ou, para determinação de variações relativas nos valores das resistências. Os extensómetros fazem uso da última propriedade para medir variações na ordem dos  $10^{-4} \sim 10^{-2} \Omega/\Omega$  com elevada precisão.

#### 3.5.2.4. Princípio de funcionamento

Para efeitos de cálculos assume-se que a resistência interna da fonte de alimentação é desprezável ( $R_f \approx 0$ ) e que a resistência do instrumento de medida é muito elevada ( $R_m \rightarrow \infty$ ).

Para valores desconhecidos das resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  a tensão medida  $U_A$  será dada pela expressão:

$$U_A = U_B \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.5)$$

Através desta expressão é fácil verificar que se as resistências forem equilibradas, ou seja:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Então a tensão  $U_A = 0$ .

Se os valores das resistências variarem por aplicação de uma força numa proporção  $\Delta R_x$ ,  $x \in \{1,2,3,4\}$ . A expressão torna-se:

$$U_A = U_B \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) \quad (3.6)$$

Note-se, no entanto, que na aplicação da ponte de Wheatstone para medições com extensómetros as resistências  $R_1$  e  $R_2$  serão iguais, tal como as resistências  $R_3$  e  $R_4$ .

$$R_1 = R_2 = R_1$$

$$R_3 = R_4 = R_3$$

Resultando na equação ( 3.7):

$$U_A = U_B \left( \frac{(R_1 + \Delta R_1)(2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R_3 + \Delta R_4)(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right) \quad ( 3.7 )$$

Sabe-se que as variações  $\Delta R_x$ ,  $x \in \{1,2,3,4\}$  serão pequenas comparadas com os valores das resistências  $R_{1..4}$ . Expandindo a equação anterior e desprezando os termos  $\Delta R_{x1} * \Delta R_{x2}$  obtém-se:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad ( 3.8 )$$

E  $\frac{\Delta R}{R} = G_f * \varepsilon$  com  $G_f$  o fator de medida do extensómetro (*Gauge Factor*) que é aproximadamente 2 para extensómetros de folha metálicos e  $\varepsilon$  a deformação geométrica sentida pelo material. Substituindo os resultados acima na equação chega-se à equação final ( 3.9):

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad ( 3.9 )$$

### 3.5.2.5. Compensação térmica circuito meia ponte

O circuito em meia-ponte efetua compensação térmica automaticamente e, por conseguinte, não é necessário acrescentar extensómetros extras montados em zonas sem carga para esse efeito. Contudo, as tensões  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  deverão ser proporcionais e contribuir da mesma forma aquando de aplicação de força (flexão ou força normal puras).

$$\varepsilon_t = (\varepsilon_{mec1} + \varepsilon_{term1}) - (\varepsilon_{mec2} + \varepsilon_{term2}) \quad ( 3.10 )$$

### 3.5.3. Magnéticos

Este tipo de sensores deteta variações do fluxo magnético induzidas pela aplicação de uma força, segundo o efeito de Hall. Nestes sensores, a medida da variação da tensão é devida a uma corrente elétrica que passa num material condutor imerso num campo magnético.

### 3.5.4. Óticos

Este tipo de sensores necessita de emissores e detetores de luz. Funciona através da conversão de energia mecânica, seja por contacto mecânico ou pressão, em variações na intensidade luminosa ou índice de refração.

### 3.5.5. Binários

Permite a deteção de estados discretos (*on/off*) através de interruptores mecânicos. É possível projetar contactos multiestados, isto é, que traduzam as variações de pressão em mais do que dois estados.

### 3.5.6. Piezoelétricos

Estes sensores produzem uma carga elétrica proporcional à força, pressão ou deformação aplicada.

No Quadro 3.1 é feita uma síntese das vantagens e desvantagens de cada um dos tipos de sensores discutidos na secção 3.5 *Sensores*.

Quadro 3.1 Vantagens e Desvantagens tecnologias sensitivas

Tecnologias	Vantagens	Desvantagens
<b>Capacitivos</b>	Tamanho. Grande integração. Sensibilidade. Baixa deriva. Baixa sensibilidade à temperatura. Baixo consumo. Sensível a forças normais e tangenciais.	Suscetível a campos externos. Histerese.
<b>Piezoresistivos</b>	Gama dinâmica. Custo. Tamanho. Tolerância a sobrecargas.	Resolução espacial limitada. Deriva. Histerese.
<b>Magnéticos</b>	Sensibilidade. Gama dinâmica. Baixa histerese. Resposta linear. Robustez.	Tamanho. Interferência magnética. Necessitam de operar em ambientes não magnéticos.
<b>Óticos</b>	Resolução espacial. Robustos. Peso.	Tamanho.
<b>Binários</b>	Simples. Custo.	Baixa resolução.
<b>Piezoelétricos</b>	Sensibilidade. Custo. Sensível a vibrações.	Baixa gama dinâmica. Sensível à temperatura.

### 3.6. Conversão de forças

Esta secção serve para apresentar alguns mecanismos (Myszka, 2011). Um mecanismo é usado para produzir transformações mecânicas numa máquina tais como:

- Conversão de forças;
- Conversão de velocidades;
- Conversão de binários;
- Conversão de movimento angular em angular ou linear;
- Conversão de movimento linear em angular ou linear.

Se os mecanismos consistem em partes ligadas entre si para transferência de movimento ou força de uma fonte de potência para uma saída, importa definir alguma da terminologia utilizada. Uma cadeia

cinemática é um mecanismo cujas partes rígidas se encontram ligadas para formar uma cadeia fechada ou aberta. Usualmente, uma das partes está fixa e é escolhida como referencial para a análise cinemática. Os elos são as partes individuais do mecanismo que são considerados corpos rígidos, isto é, não mudam a sua forma durante o movimento deste. Neste contexto, partes elásticas não são consideradas elos e são ignoradas na análise cinemática do mecanismo, entrando apenas na análise das forças dinâmicas a que o corpo está sujeito. A junta é a conexão móvel entre os elos existindo dois tipos primários: juntas rotativas que permitem rotação entre os dois elos a que estão ligadas e juntas prismáticas que permitem o movimento linear entre os dois elos (Figura 3.11).

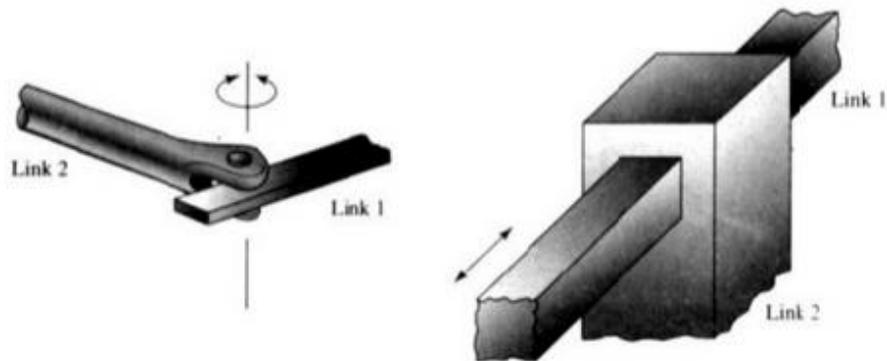


Figura 3.11 Junta rotativa (esquerda) e junta prismática (direita) (retirada de <http://pt.slideshare.net/physics101/001-mechanisms-and-kinematics?smtNoRedir=1>)

Existem juntas de ordem superior como é o caso da junta came que admite tanto rotação como deslizamento entre os dois elos que liga. Outro exemplo são as engrenagens que comportam rotação e deslizamento entre duas rodas à medida que os seus dentes interagem (Figura 3.12).

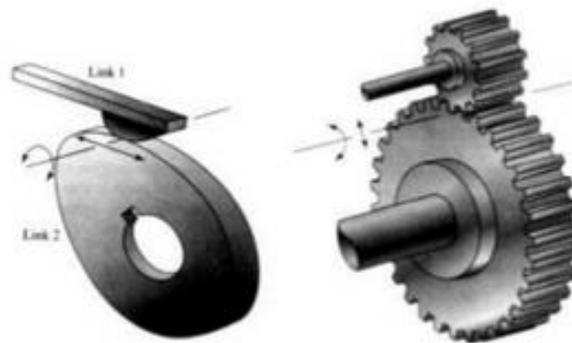


Figura 3.12 Came (esquerda) e engrenagens (direita) (retirada de <http://pt.slideshare.net/physics101/001-mechanisms-and-kinematics?smtNoRedir=1>)

Para visualizar o movimento dos componentes e apresentar a máquina esquematizada utilizam-se convenções para cada um dos elementos base sob a forma de um diagrama cinemático (Figura 3.13).

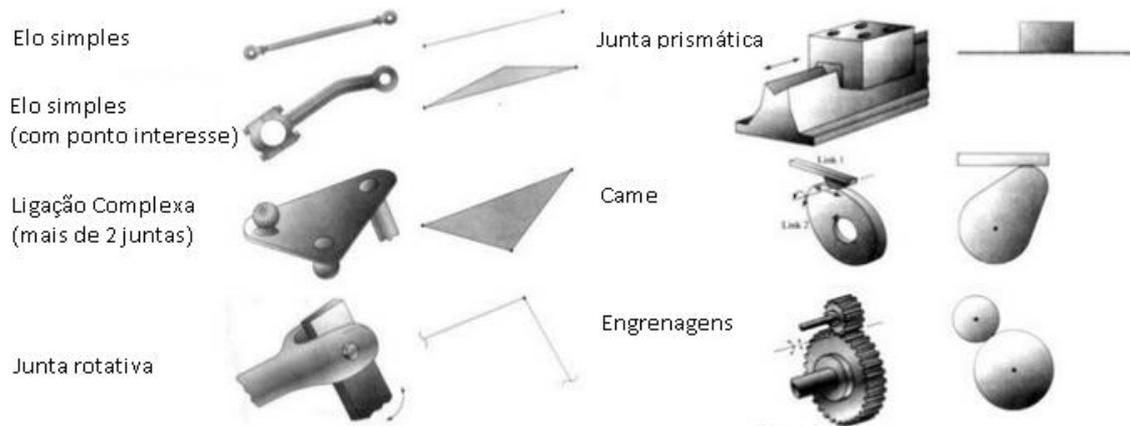


Figura 3.13 Representação cinemática (retirada de <http://pt.slideshare.net/physics101/001-mechanisms-and-kinematics?smtNoRedir=1>)

### 3.6.1. Engrenagens

A roda dentada é um mecanismo capaz de transmitir movimento rotativo a outro mecanismo semelhante, transformando velocidades angulares, binários e sentidos de rotação. Quando existem várias rodas dentadas ligadas entre si, dá-se o nome de engrenagem. Neste caso, desenvolve-se um ganho mecânico (razão de transformação de força) entre a força de entrada aplicada e a força no mecanismo de saída por troca das velocidades de rotação entre estes, devido à lei de conservação de energia. Esta lei afirma que num sistema fechado, ou seja, um sistema isolado do meio exterior, a quantidade de energia é fixa. Não se pode criar mais energia dentro do sistema ou destruir a energia já nele presente, apenas converter de um tipo para outro. Por isso, a energia de rotação na saída nunca poderá ser superior à energia de alimentação. Normalmente é menor devida à ação de perdas na transmissão de potência. Assumindo para efeitos de simplificação de cálculo que não existem perdas de transmissão tem-se:

$$P_{in} = P_{out}$$

Potência de entrada será a mesma que a potência de saída. Como a energia é transferida através do trabalho e estamos interessados no movimento de rotação obtêm-se as equações ( 3.11 ) e ( 3.12 )

$$W = \tau * \Delta q \tag{ 3.11 }$$

W - Trabalho [Joules].

$\tau$  - Binário [N.m].

$\Delta q$  - Variação de ângulo [rad].

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{W}{dt} = \tau \frac{dq}{dt} = \tau * w \tag{ 3.12 }$$

$$\tau_{in} * w_{in} = \tau_{out} * w_{out}$$

Com  $w$  a velocidade angular [rad/s]

Assume-se uma engrenagem com 2 rodas A e B (Figura 3.14), com número de dentes  $n_a$  e  $n_b$ , velocidades angulares  $w_a$  e  $w_b$  (em sentidos contrários), binário  $\tau_a$  e  $\tau_b$ , e círculos primitivos (*pitch circle*)  $p_a$  e  $p_b$ .

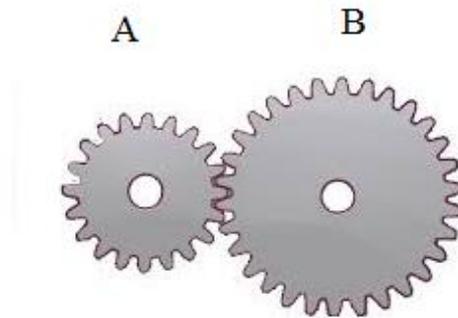


Figura 3.14 Exemplo engrenagem 2 rodas (retirada de <https://www.tu-eshop.com/index.php?route=pavblog/blog&id=36> )

O círculo primitivo (*pitch circle*) é o círculo teórico entre a altura total do dente sobre o qual os cálculos são normalmente efetuados. Os círculos primitivos numa engrenagem devem ser tangentes como se demonstra na Figura 3.15.

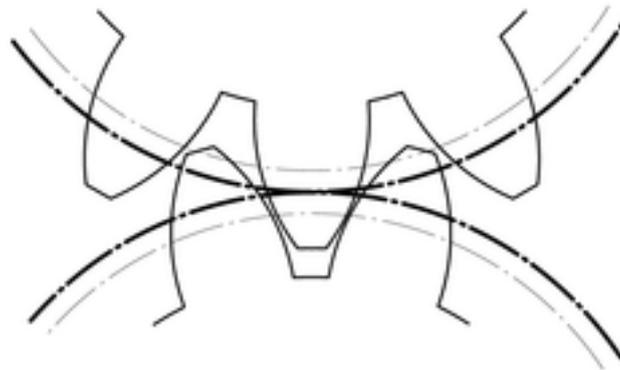


Figura 3.15 Círculos primitivos de duas rodas a engrenar

Se a distância entre as rodas dentadas for  $Pd$ , tem-se:

$$Pd * n_a = 2\pi r_a$$

$$Pd * n_b = 2\pi r_b$$

$$\frac{n_a}{n_b} = \frac{r_a}{r_b}$$

Com  $r_a$  e  $r_b$  o raio dos círculos primitivos das rodas dentadas A e B, respetivamente. As expressões gerais que relacionam o binário, velocidade e raios das rodas dentadas são dadas pelas equações ( 3.13 ) e ( 3.14 ), denominadas equações fundamentais das engrenagens:

$$\frac{\tau_{out}}{\tau_{in}} = \frac{W_{in}}{W_{out}} \quad ( 3.13 )$$

$$\frac{\tau_{out}}{\tau_{in}} = \frac{r_{out}}{r_{in}}$$

O que permite verificar que quando há um aumento do binário numa engrenagem, este é proporcional ao raio dos círculos primitivos e inversamente proporcional à velocidade angular experimentada pelas duas rodas (uma roda dentada menor tem de completar mais revoluções que uma maior, mas também apresenta um binário superior).

Relacionando as grandezas acima com o número de dentes obtém-se:

$$\frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{n_{in}}{n_{out}} \quad ( 3.14 )$$

$$\frac{\tau_{out}}{\tau_{in}} = \frac{n_{out}}{n_{in}}$$

### 3.6.1.1. Relações

**Relação da engrenagem:** quociente do número de dentes da roda pelo número de dentes do pinhão.

$$R = \frac{n_m}{n_p} \quad ( 3.15 )$$

$N_m$  - Número de dentes da roda movida.

$N_p$  - Número de dentes do pinhão.

**Relação de transmissão:** Quociente da velocidade angular da roda motora pela velocidade angular da última roda da engrenagem. Quando as rotações têm sentidos contrários deve-se adicionar um sinal de menos à relação de transmissão.

$$I = \frac{W_p}{W_g} = \frac{r_g}{r_p} \quad ( 3.16 )$$

$W_p$  – Velocidade angular da roda motora.

$W_g$  – Velocidade angular da roda movida.

$R_g$  – Raio círculo primitivo da roda movida.

$R_p$  – Raio círculo primitivo da roda motora.

Se  $I > 1$  diz-se que a relação de transmissão é redutora.

Se  $I < 1$  diz-se que a relação de transmissão é multiplicadora.

A relação entre o diâmetro primitivo e o número de dentes de uma engrenagem estabelece o módulo da engrenagem. Este parâmetro, usado pelo sistema internacional, é fundamental para o dimensionamento das engrenagens. Duas engrenagens acopladas possuem sempre o mesmo módulo.

$$m = \frac{d_p}{N_p} \quad ( 3.17 )$$

$D_p$  – Diâmetro primitivo da roda dentada.

$N_p$  – Número de dentes da roda dentada.

Para um mesmo diâmetro primitivo, com o aumento do módulo aumenta-se a largura dos dentes, conferindo maior resistência à roda dentada. Contudo, com o aumento do módulo o número total de dentes da roda diminui (Figura 3.16). Para o mesmo diâmetro primitivo, uma roda com módulo reduzido apresentará um elevado número de dentes com largura reduzida. A norma ISO 54-1997 fixa os valores dos módulos entre 1 e 50, excluindo a indústria automóvel.

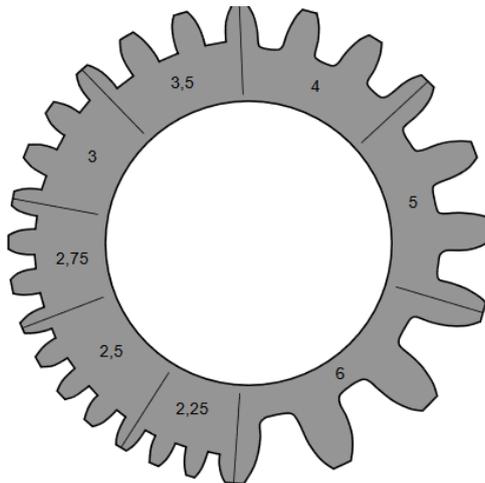


Figura 3.16 Evolução largura dos dentes com a variação do módulo (retirado de [http://todi.est.ips.pt/rmendes/resources/Apontamentos\\_EMII/CAP7\\_Engrenagens.pdf](http://todi.est.ips.pt/rmendes/resources/Apontamentos_EMII/CAP7_Engrenagens.pdf))

Note-se que engrenagens com maior número de dentes proporcionam transmissões mais suaves, oferecem menor resistência e menos interferência. Para o correto acoplamento das rodas, estas devem ser permanentemente tangentes no ponto de contacto durante toda a operação como exemplificado na Figura 3.17.

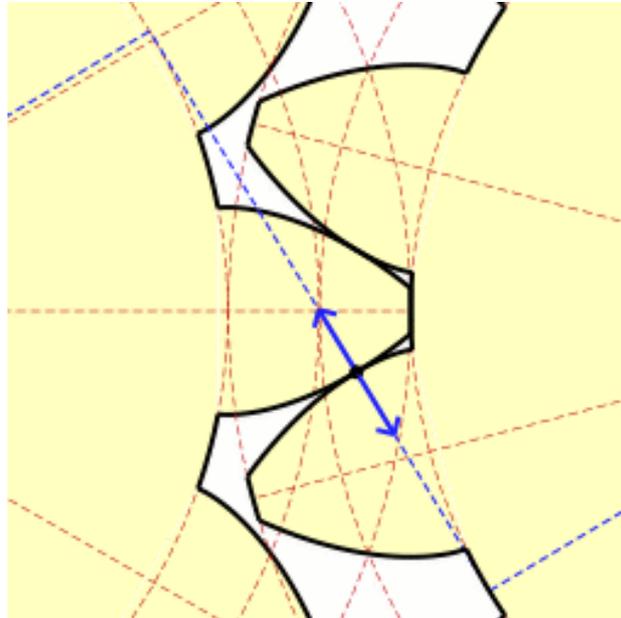


Figura 3.17 Tangência ponto de contacto (retirada de [https://en.wikipedia.org/wiki/Involute\\_gear](https://en.wikipedia.org/wiki/Involute_gear) )

Aos perfis de dentes que satisfaçam esse requisito dão-se o nome de perfis conjugados. Os perfis conjugados classificam-se em: cíclicos (engrenagens cicloidais) e evolventes (engrenagens evolventes). O perfil evolvente apresenta várias vantagens tais como maior facilidade de construção e maior tolerância a imperfeições resultantes da impressão 3D. De facto, dentro de certos limites poderá haver uma discrepância da localização dos eixos das rodas sem problemas graves para o acoplamento das rodas traduzindo-se numa maior flexibilidade na montagem. A superfície de contacto é sempre perpendicular ao plano de contacto o que diminui a variação de binário e resulta numa operação silenciosa do mecanismo. No entanto, também apresenta desvantagens como a necessidade de lubrificação para evitar tensão localizada, ocorrer mais facilmente interferência no acoplamento dos dentes e ser menos adequado para rodas dentadas com poucos dentes. A maior parte das rodas da indústria automóvel, robótica, máquinas e eletrodomésticos domésticos utilizam as rodas dentadas de perfil evolvente. Aplicações que necessitam de rodas de pequenas dimensões, como brinquedos, relógios e instrumentos eletrónicos recorrem a rodas de perfil cíclico.

### 3.6.1.2. Perfil Evolvente

Uma evolvente é uma curva obtida de uma outra curva, unindo uma corda inextensível imaginária e efetuando o traçado dum ponto da corda, ao enrolá-la ou desenrolá-la na curva, segundo o processo apresentado na Figura 3.18.

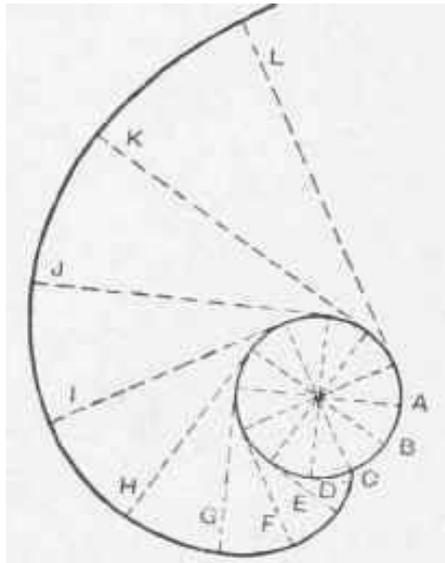


Figura 3.18 Curva evolvente (retirada de <http://chestofbooks.com/crafts/mechanics/Cyclopaedia/Marking-Out-Involute-Curves.html> )

O círculo sob o qual a reta rola sem escorregar designa-se círculo base. A reta (corda esticada e inextensível) é sempre tangente ao círculo base. Deixando a reta rolar no sentido dos ponteiros do relógio na circunferência do círculo base, o ponto da reta traça a evolvente AB, ABC, ABCD, e em diante. O ponto escolhido da corda para gerar a evolvente denomina-se ponto traçador.

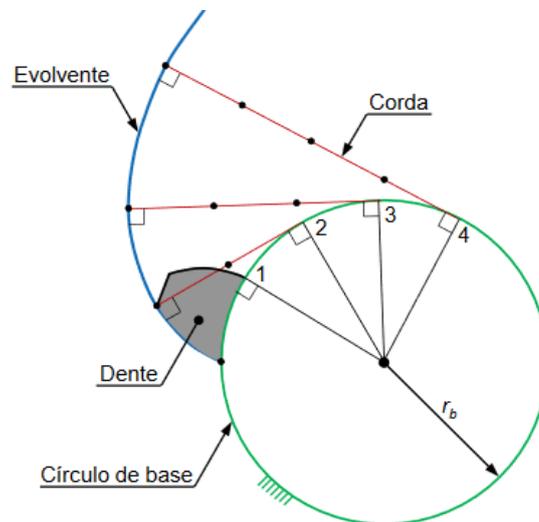


Figura 3.19 Reta normal à evolvente tangente ao círculo base (retirado de <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/32212/1/6.12.48%202014.pdf> )

Uma reta normal a qualquer ponto da evolvente é tangente ao círculo base e, a normal ao perfil do dente é tangente ao círculo base como demonstrado pela Figura 3.19. Estabelece-se uma relação entre o círculo primitivo da roda dentada e o círculo de base para efeitos de acoplamento das rodas. Para que não ocorra escorregamento:

$$i = \frac{r_{2p}}{r_{1p}} = \frac{r_{2b}}{r_{1b}} \quad ( 3.18 )$$

$R_{2p}$  – Raio círculo primitivo roda 2 de uma engrenagem.

$R_{1p}$  – Raio círculo primitivo roda 1 de uma engrenagem.

$R_{2b}$  – Raio círculo base roda 2 de uma engrenagem.

$R_{1b}$  – Raio círculo base roda 1 de uma engrenagem.

Isto é, a proporção entre o raio do círculo primitivo e o círculo de base das duas rodas deve ser a mesma.

Definem-se duas grandezas:  $\alpha$  e  $\theta$ . Com  $\alpha$  o ângulo de pressão que define a direção da força que a roda motora exerce sobre o pinhão. O ângulo de incidência  $\theta$  consiste no ângulo agudo formado por uma tangente a qualquer ponto do perfil do dente e pelo raio dessa roda. Uma representação gráfica destas duas grandezas é apresentada na Figura 3.20. Para que duas rodas dentadas cilíndricas de dentes diretos possam ser acopladas devem ter o mesmo módulo e o mesmo ângulo de pressão. A circunferência primitiva das duas rodas deverá ser tangente.

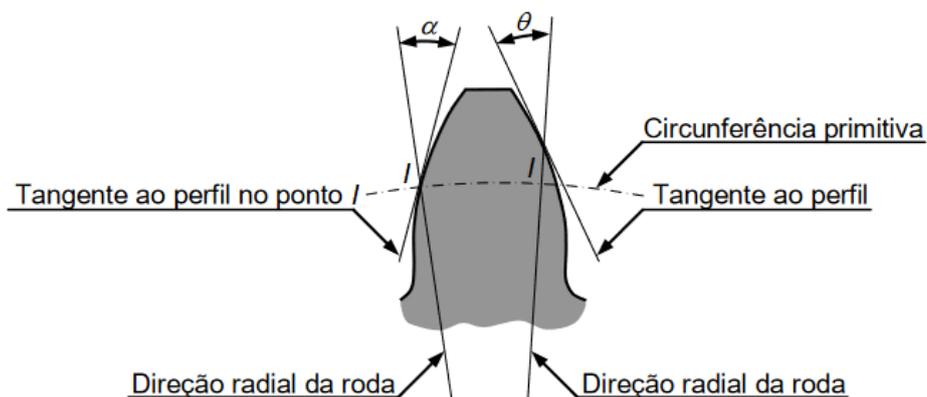


Figura 3.20 Ângulo de pressão e incidência (retirado de <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/32212/1/6.12.48%202014.pdf> )

### 3.6.1.3. Parâmetros dentes

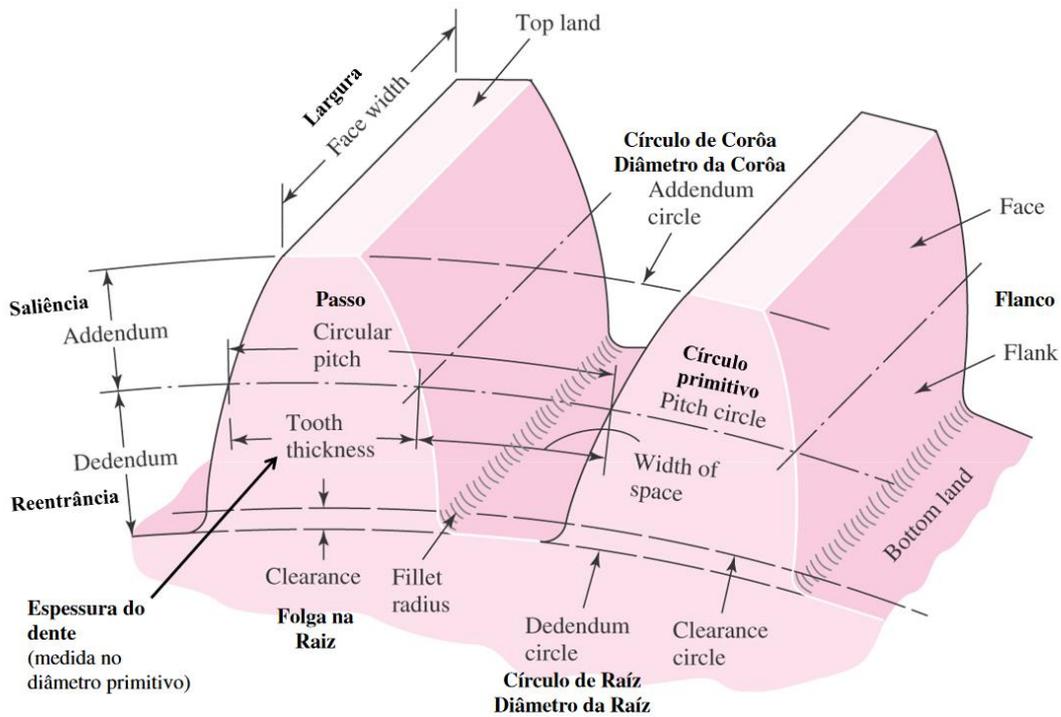


Figura 3.21 Terminologia Dentes

**a** [mm] – **Saliência** ou **altura da cabeça do dente** (*addendum*) – distância radial entre o círculo primitivo e o círculo de coroa.

**b** [mm] – **Reentrância** ou **altura do pé do dente** (*dedendum*) – distância radial entre o círculo de raiz e o círculo primitivo.

**Flanco** – Parte exterior do dente compreendida entre a coroa e a raiz. Distinguem-se 3 zonas: ativa onde ocorre contacto com os dentes de outra roda, útil à zona que pode ser usada como ativa e finalmente, concordância que corresponde à parte do flanco não utilizável.

**p** [mm] – **Passo primitivo** – Distância radial medida sob o círculo primitivo entre um ponto de um dente e o mesmo ponto do dente adjacente.

$$p = \frac{\pi d}{N} = \frac{\pi}{P} \quad (3.19)$$

N – Número de dentes

d – Diâmetro do círculo primitivo

P – Passo Diametral (inverso do módulo)

t [mm] – Espessura do dente – Medida no círculo primitivo e corresponde a metade do passo primitivo.

$$t = \frac{p}{2}$$

$H_t$  [mm] – Altura do dente – Soma da saliência com a reentrância.

$$H_t = a + b$$

### 3.7. Graus de liberdade

Os graus de liberdade, ou mobilidade ( $M$ ) de um mecanismo, correspondem ao número de entradas independentes que é necessário controlar para posicionar corretamente todos os elos do mecanismo na posição espacial desejada. Também pode ser definido como o número de atuadores necessários para operar o mecanismo. Os robots industriais podem ter mais de três graus de liberdade. Para calcular os graus de liberdade de um mecanismo utiliza-se a fórmula de Gruebler que é apresentada de seguida:

$$M = 3(n - 1) - 2j_p - j_s \quad ( 3.20 )$$

$n$  – Número total de elos do mecanismo.

$j_p$  - Número de juntas do tipo primário (rotativas ou prismáticas)

$j_s$  – Número de juntas de ordem superior (engrenagens, cames, etc)

Caso o mecanismo apresente uma mobilidade igual ou inferior a zero é denominado mecanismo preso, já que lhe é impossível mover-se, formando uma estrutura fixa. Esta análise é importante na escolha do número de atuadores pois mecanismos com vários graus de liberdade irão necessitar de mais de um atuador para os movimentar corretamente.

# 4. Projeto

## 4.1. Número de dedos da garra

A escolha do número de dedos da garra é uma das primeiras escolhas na realização do projeto, em paralelo com o princípio de prensão e o tipo de atuação (Monkman et al., 2007). Como neste projeto a garra servirá também como suporte físico de apoio ao solo, deverá ser de construção robusta e de peso reduzido (Marco & Andreas, 2015). Este fator eliminou a hipótese de a garra ter mais de quatro dedos à semelhança da mão humana, já que, apesar de ter maior flexibilidade na manipulação de objetos, a sua construção é mecanicamente mais frágil, diminuindo o peso suportado pela garra e acarretando custos de implementação a nível do controlo e eficiência energética (Mattar, 2013; Monkman et al., 2007). Optou-se por uma garra de três dedos pois não havia limitações impostas ao tipo de objetos a manipular, podendo ser esféricos, caso em que seria necessária uma maior força de prensão se fosse escolhida uma garra de dois dedos. Acrescente-se que o número mínimo de dedos para orientação de um objeto ou apertos de precisão em objetos esféricos é três, caso não se utilize o meio envolvente como ponto de contacto adicional (Chavan-Dafle & Rodriguez, 2015).

## 4.2. Modelo Base

Após a escrita do estado de arte e munido de ferramentas teóricas para a realização da tese, é importante decidir se o projeto será feito de raiz ou baseado numa plataforma já existente. O projeto de sistemas de engenharia é cada vez mais competitivo no mercado global. Uma das formas de redução do tempo de desenvolvimento, produção e custos envolvidos é reutilizar trabalho e conhecimento feito por terceiros. Estes blocos reutilizáveis permitem criar sistemas mais complexos, mas não são diretamente aplicáveis na tarefa devendo ser adaptados aos requisitos pretendidos. De facto, cerca de 20% do tempo de um engenheiro de projeto é despendido na pesquisa de informação e absorção da mesma (Baxter et al., 2007).

O modelo base escolhido (Figura 4.1) corresponde a um projeto *open source* de uma garra de três dedos concêntrica, ou radial, do tipo impacto (Telegenov, Tlegenov, & Shintemirov, 2015), capaz de efetuar apertos centrais simétricos.



Figura 4.1 Modelo-base da garra concêntrica de 3 dedos (Telegenov et al., 2015)

Isto significa que a garra é capaz de alinhar o objeto segundo o seu eixo. Os dedos podem ser classificados segundo a trajetória que descrevem como paralelos (trajetória linear de abertura/fecho) ou angulares (trajetória radial), sendo o último caso o retratado no modelo base. Os dedos estão dispostos na palma segundo um ângulo de  $120^\circ$ , o que é comum para rentabilizar a eficiência do aperto, e são atuados por um único motor. Este atuador está ligado a um fuso que converte movimento rotativo em linear (e vice-versa), que não gira sobre o eixo de carga (*backdriving*), evitando que os dedos abram sobre o seu próprio peso ou pela força aplicada. Os três dedos estão simultaneamente ligados ao fuso através de uma engrenagem com duas rodas dentadas cilíndricas de dentes diretos (*Spur Gears*) de relação 30:13 para cada dedo (relação multiplicadora) como se demonstra na Figura 4.2.



Figura 4.2 Vista atuação para um dedo do modelo base (Telegenov et al., 2015)

Os dedos possuem um mecanismo de sub-atuação, através da introdução de uma mola como componente passivo de ligação, entre a falange proximal (falange mais próxima da palma) e a falange distal (falange mais distante da palma). Este faz com que ocorram, durante a apreensão, as fases representadas na Figura 4.3:

- A falange distal e a falange proximal movem-se paralelamente;
- A falange proximal faz contacto com o objeto e a falange distal roda sobre um pivot;
- A falange distal faz contacto com o objeto parando o movimento do dedo.

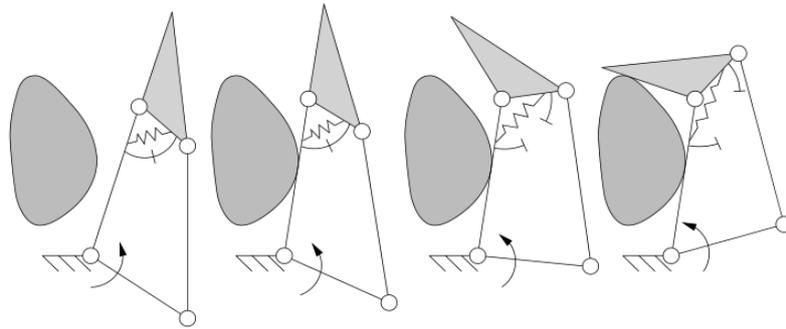


Figura 4.3 Prensão para dedo de duas falanges com sub-atuação (Birglen, Laliberté, & Gosselin, 2008)

As desvantagens da utilização da garra disponibilizada prendem-se com o facto de apenas utilizar um atuador para controlo dos três dedos. Isto implica uma menor flexibilidade para a prensão dos objetos porque não é possível controlar cada dedo independentemente (Telegenov et al., 2015). Outra desvantagem é a configuração fixa dos dedos na palma que limita as configurações de aperto da garra (Hugo, 2013). Também no modelo disponibilizado não está planificada a integração de sensores para controlo de posição e força no objeto. As alterações efetuadas ao modelo base, para combater estas desvantagens, serão detalhadas nas secções seguintes.

### 4.3. Bio-inspiração

A biomimética é a metodologia que se inspira na biologia com o intuito de aplicar os fenómenos biológicos e as suas ideias aos problemas de engenharia, nomeadamente à robótica. Tenta-se, com esta abordagem, tornar os robots mais autónomos através do controlo de movimento, sensorização/atuação e implementação de estruturas bio-inspiradas (Shi, Habib, Xiao, & Hu, 2015). O projeto da garra enfatiza o terceiro ponto, para que esta, possa servir como suporte (pé) de um robot de locomoção terrestre. Estando o sistema sujeito a forças elevadas aquando do funcionamento da garra como pé, os dedos não poderiam estabelecer os pontos de contacto com o solo pois são mecanicamente frágeis e possuem os sensores integrados nas suas falanges, devendo ser protegidos.

Para satisfazer a condição de suporte foi estudada a retração das garras dos felinos (Figura 4.4) e concluiu-se que envolveria o projeto de um mecanismo complexo para recolha dos dedos na palma (Gonyea & Ashworth, 1975; Nishimura, Kakogawa, & Ma, 2012).

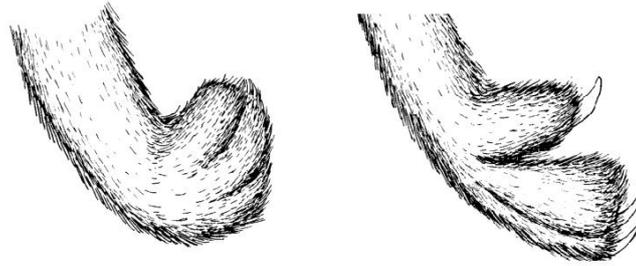


Figura 4.4 Retração das garras nos felinos (Gonyea & Ashworth, 1975)

Seguidamente, estudou-se o mecanismo de extensão e flexão do pulso humano (Figura 4.5), tendo-se optado por esta solução que seria mais simples de implementar ao exigir menos alterações ao modelo-base.

A extensão é o movimento, segundo uma articulação, que resulta no aumento do ângulo entre os dois corpos ligados a essa articulação. Por sua vez, a flexão é o movimento de uma articulação que diminui o ângulo entre os corpos que convergem nessa junta.



Figura 4.5 Extensão e flexão do pulso humano (retirado de <http://ukhealthcare.uky.edu/Ortho/for-patients/shoulder-exercises/>)

De acordo com estas definições, depreende-se que o ato de fecho dos dedos para segurar um objeto corresponde à flexão. Da mesma forma, imaginando o movimento contrário, isto é, a extensão, um ponto da falange distal descreverá um semi-arco centrado nessa articulação, que se situa acima da palma. Admitindo que não existem objetos acima da palma que bloqueiem o movimento, o dedo poderia ficar paralelo à palma, e acima desta, para não interferir com a locomoção como exemplificado na Figura 4.6.



Figura 4.6 Posicionamento durante o funcionamento como suporte.

O sistema de suporte, neste caso a palma, deverá ter tração ao piso para evitar deslizamentos. A tração irá afetar a eficiência e velocidade desenvolvida pelo robot durante a locomoção. A conformidade do sistema ao piso, ou seja, a deformação sentida pela palma quando o piso exerce forças nesta, é também um parâmetro importante pois permite adaptação do pé a terrenos irregulares (Sinha & Bajcsy, 1991). Um mecanismo utilizado pelos mamíferos para a locomoção é a presença de almofadas do metacarpo (*metacarpal pads*) que são estruturas cutâneas especializadas feitas para resistir e absorver ao choque de saltos ou caminhar (Figura 4.7), e serviu de inspiração para a possibilidade do uso de um revestimento na palma. Este revestimento tem de facilitar a tarefa de locomoção sem comprometer a manipulação.



Figura 4.7 Exemplo da almofada do metacarpo da pata de um cão (retirada de <http://revealingpaws.com/revealingpaws/uk%20pages/Content%20UK/Glossary/Individual%20Words/Metacarpal%20Pad.htm> )

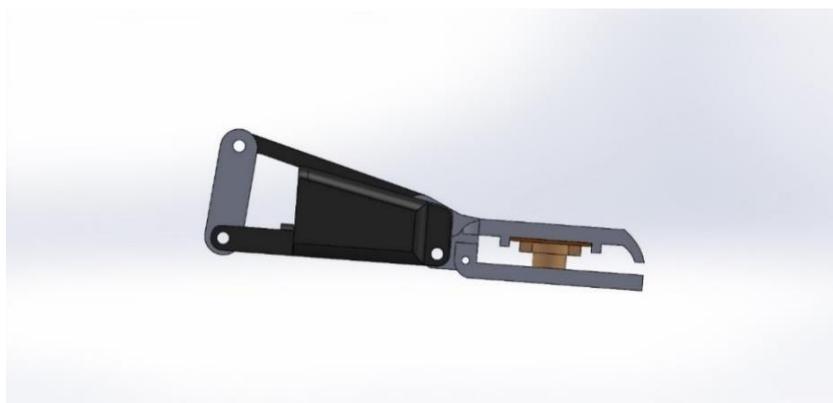
#### 4.4. Sensorização

Para manipulação de diferentes materiais podem-se utilizar sensores tácteis, força, visão e de som. Os sensores tácteis são usados para imitar as funções da pele humana, e como tal, permitem medir características como a distribuição de pressão aplicada, a temperatura, humidade e rigidez dos materiais. Os sensores de força são muitas vezes aplicados nos pulsos das mãos robóticas ou entre as juntas dos dedos e medem força e binário (6D), podendo também ser 12D se medirem acelerações (Hugo, 2013). A visão

desempenha um papel fundamental na fase do planeamento do aperto, permitindo extrair características espaciais dos objetos para cálculo das melhores configurações da mão e pontos de contacto dos dedos. Estes cálculos envolvem teoria de *force/form closure* e os algoritmos utilizados fornecem infinitas soluções que são depois escolhidas baseadas em métricas de qualidade de apertos (Roa & Suárez, 2014). Os sensores de som não são muito utilizados em mãos robóticas, mas permitem detetar a ocorrência de contacto entre o dedo e o objeto e obter uma estimativa da direção espacial onde esse contacto ocorreu.

O foco da tese é na última fase da manipulação “Execução do aperto” e não nas fases de planeamento ou aproximação da garra. Deste modo, optou-se por utilizar apenas sensores tácteis e de força em cada uma das falanges distais. No entanto, para além do controlo de força na aplicação, procura-se precisar qual a posição dos dedos durante o aperto. Com vista a este fim, utilizam-se atuadores que fornecem informação relativa à sua temperatura, posição angular, tensão e esforço de carga. Note-se que é difícil modelar o sistema porque é não linear, principalmente pela sub-atuação dos dedos, que, com apenas um atuador, dispõem de duas articulações móveis. A posição da falange distal não é totalmente caracterizada pela posição do veio do motor e existe algum atrito estático entre as peças, dependente da sua posição.

Como condicionantes, na escolha dos sensores a incluir nas falanges distais para controlo táctil e de força, teve de se ter em conta o espaço disponível e o número de ligações de entrada ao microcontrolador, uma vez que são limitados. A forma de contornar este problema, incorporando o menor número de sensores possível, foi projetar um batente que após contacto com um objeto exercesse força na célula de carga numa área ativa de 53mm por 26mm. A célula de carga desliza sobre um encaixe projetado para o valor da sua largura, sendo colada à parte anterior da falange distal. A falange não é totalmente fechada para que a força seja toda medida pela célula e não contrariada pelo material. A parte anterior da falange distal compreende um corte de 3mm de profundidade para que a célula de carga se deforme após ação de uma força. Este mecanismo é representado na Figura 4.8 com o sensor de força representado a laranja.



*Figura 4.8 Exemplo de um dedo da garra projetada*

O sensor táctil corresponde a um potenciómetro membranar linear, de área ativa de 50mm. Consegue-se medir a posição de contacto com as peças em toda a área do batente. Também se consegue determinar o tamanho da área de contacto. O potenciómetro é dobrado, sem afetar a área ativa, para que as ligações elétricas se efetuem por dentro das falanges, num corte retangular de 2mm por 2mm que a atravessa

para esse efeito. Demonstra-se o posicionamento e a área ocupada pelo sensor tátil na falange distal na Figura 4.9.

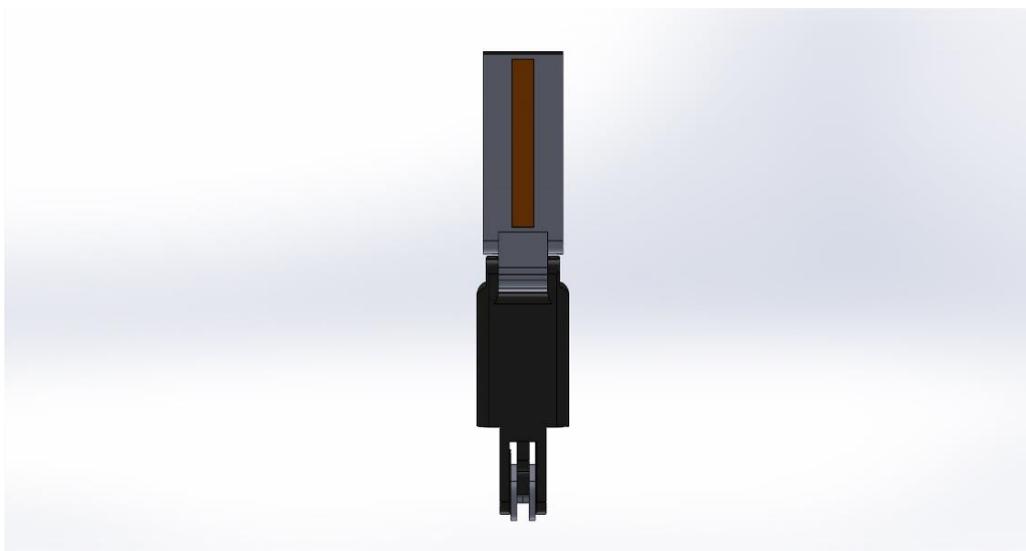


Figura 4.9 Área ativa do potenciômetro na falange distal (laranja)

#### 4.5. Sub-Atuação

O mecanismo de sub-atuação já foi descrito na secção *Modelo-base*. Apesar de não terem sido efetuadas mudanças à forma de sub-atuação, foi necessário escolher molas de compressão que fizessem as falanges moverem-se juntas e paralelamente em movimento livre, e fizessem dobrar a falange distal com relativa facilidade aquando da resistência da falange proximal por um objeto. Isto traduziu-se pela escolha do coeficiente de elasticidade da mola  $K$ . O procedimento do cálculo do coeficiente de elasticidade foi o seguinte:

- Pendurou-se a mola num clip suspenso numa superfície lisa e imóvel;
- A mola não sofreu nenhuma deformação desejável, mediu-se o seu comprimento na zona de espiras ativas, e foi registado;
- Adicionou-se um peso anteriormente medido com uma balança YHC1103 de precisão 0.1g à extremidade da mola;
- Mediu-se a sua distensão e o valor foi registado numa tabela (Quadro 4.1);
- Repetiu-se o passo até preencher toda a tabela (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 Força aplicada à mola e deslocamento da mola

Peso (g.f)	Deslocamento (mm)
133	18.42
205	19.80
410	30.12
587	37.54

Com estes dados e sabendo o comprimento inicial da mola sem deformação, é possível fazer uma regressão da linear da forma  $F = k * \Delta x$  com k o parâmetro a determinar. Pretendeu-se minimizar o erro quadrático.

Com:

$$X = [18.42, 19.80, 30.12, 37.54]^T$$

$$Y = [133, 205, 410, 587]^T$$

$$k = (X^T X)^{-1} X^T Y = 22.55 \quad (4.1)$$

A mola tem um comprimento de 14.66mm sem deformação e 24 espiras ativas, sendo que duas espiras nas extremidades servem para fixação da mola à falange distal e ao elo dessa falange, como de acordo com a Figura 4.12. Comparam-se graficamente os valores experimentais com a reta obtida, através da análise da Figura 4.10.

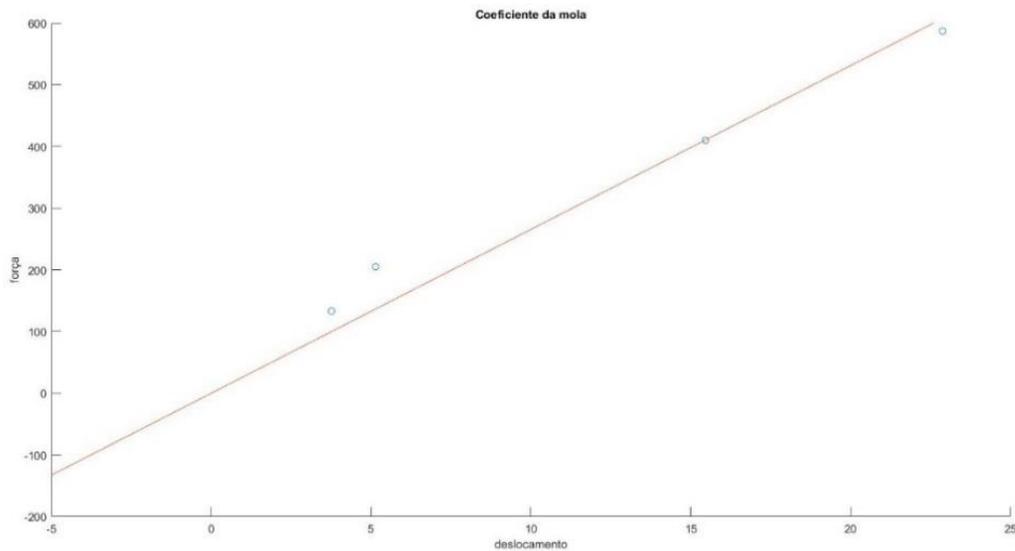


Figura 4.10 Gráfico da força aplicada na mola vs. distensão

Segue-se o esquema apresentado em (Telegenov et al., 2015) para relacionar o coeficiente de elasticidade da mola com outros parâmetros de interesse da cadeia cinemática do dedo (Figura 4.11).

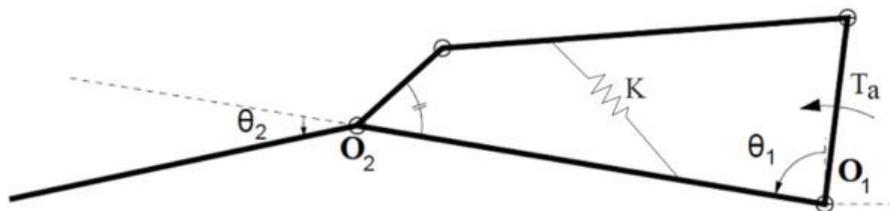


Figura 4.11 Representação esquemática da cinemática do dedo (Telegenov et al., 2015)

O coeficiente de elasticidade da mola pode ser escolhido de acordo com:

$$K = \frac{T_a \theta_1' - \zeta_1 o \xi_1 - \zeta_2 o \xi_2}{\Delta \theta_2'} \quad (4.2)$$

$T_a$  - vetor de força e binário do atuador (*wrench*).

$K$  - Coeficiente de elasticidade da mola.

$\theta_i'$  - Derivada do ângulo da junta  $i$ .

$\xi_i = [w_z \ v_i^x \ v_i^y]$  representa o *twist*. Isto é, o vetor formado pelas velocidades angulares e lineares em relação a um eixo.

$\zeta_i = [m_z \ f_i^x \ f_i^y]$  com  $m_z$  o momento da força segundo o eixo  $z$ .

Para um desenvolvimento mais detalhado aconselham-se as leituras (Birglen & Gosselin, 2004; Birglen et al., 2008; Myszka, 2011).

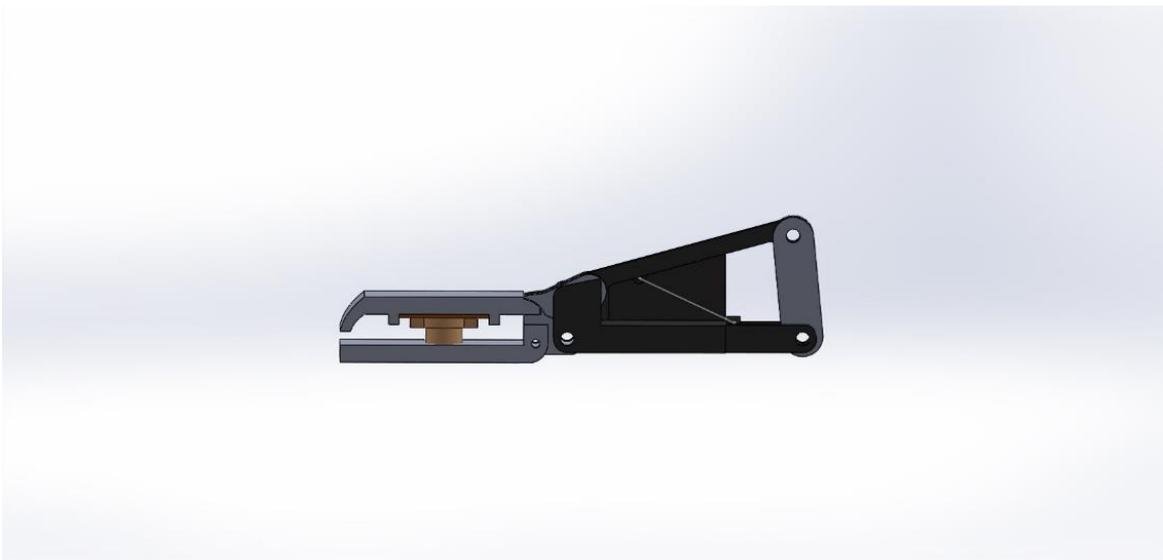
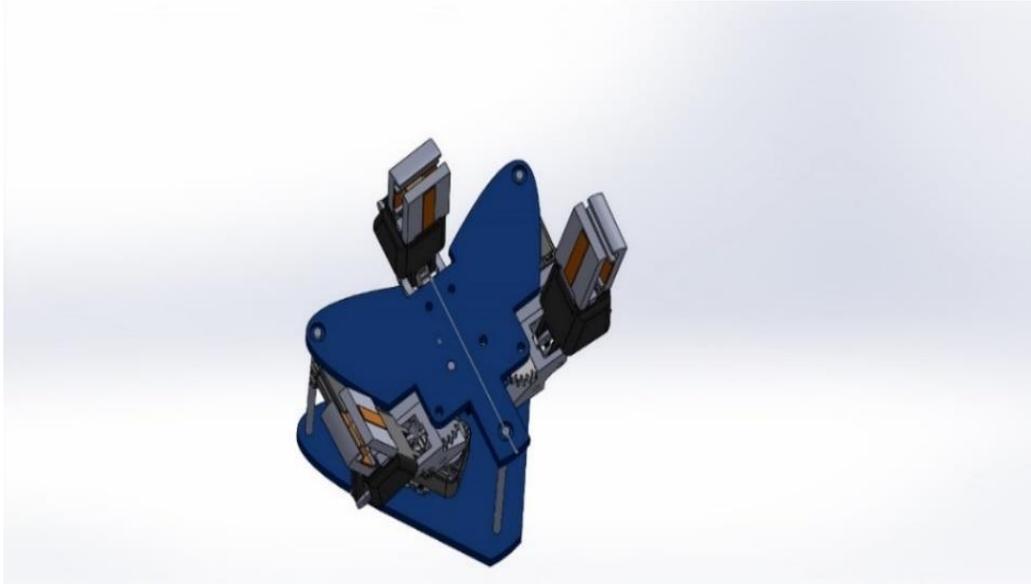


Figura 4.12 Exemplificação da mola no dedo (reta a cinzento)

## 4.6. Orientação dos dedos

Para construir uma garra com maior flexibilidade em operações multitarefas a posição dos dedos deve ser ajustável, isto é, os dedos devem possuir a capacidade de mover e rodar sobre a palma (Birglen et al., 2008; Hugo, 2013). Isto permite realizar diferentes tipos de apertos, o que não era permitido no modelo base. De facto, sendo o modelo-base concêntrico de fecho angular, é adequado à preensão de objetos cilíndricos e esféricos. Foi projetado um sistema de rotação de  $90^\circ$  para dois dos três dedos, semelhante à garra SARAH, que os fazem girar simetricamente em relação a uma reta que cruza o terceiro dedo da palma, como representado na Figura 4.13.



*Figura 4.13 Reta sob o qual os 2 dedos giram simetricamente*

O mecanismo projetado para este fim consiste numa engrenagem de quatro rodas dentadas. As rodas dentadas das extremidades correspondem a segmentos de rodas dentadas em que os dentes apenas preenchem ângulos de  $234^\circ$  e  $216^\circ$ , pois só necessitam de rodar  $90^\circ$  para posicionamento dos dedos e fazem parte integral do suporte onde assentam as falanges. Projetou-se desta forma, acoplando a rotação dos dois dedos, para poupar espaço na montagem e custos de controlo. As duas rodas dentadas que fazem parte do suporte não foram cortadas da mesma forma, havendo um incremento de um dente no corte de uma em relação à outra para que os dedos fiquem efetivamente simétricos (Figura 4.14).



*Figura 4.14 Segmentos de rodas dentadas das extremidades.*

A roda dentada a vermelho, na Figura 4.15, corresponde à roda motora, e a roda dentada à sua direita é uma roda dentada livre da cadeia.

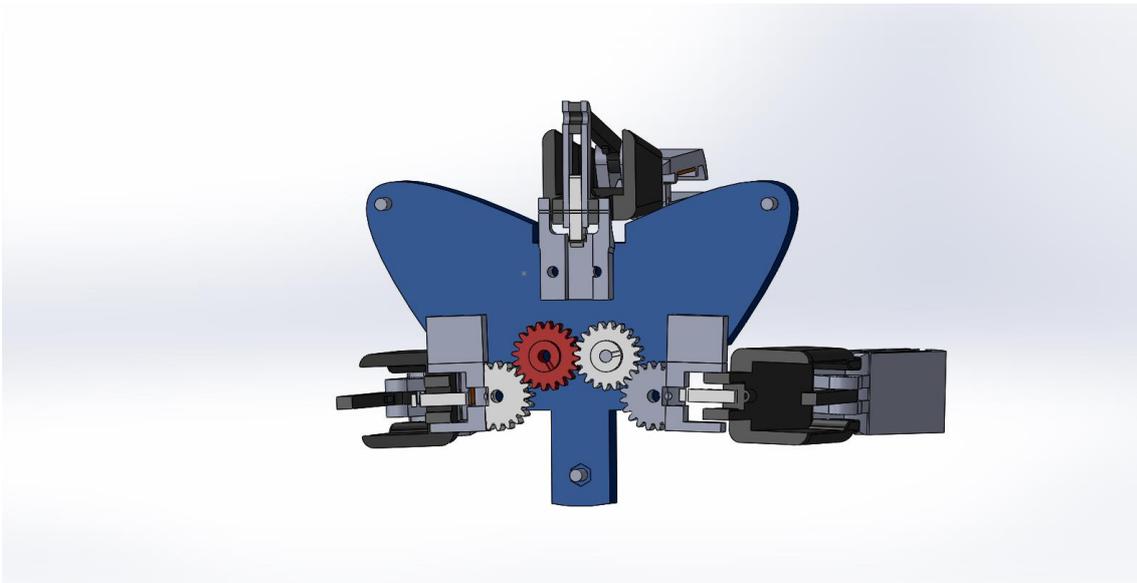


Figura 4.15 Vista de secção das rodas dentadas para orientação.

As especificações técnicas das rodas dentadas são apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 Especificações rodas dentadas orientação

Grandeza	Valor	Unidade
<b>Módulo (m)</b>	1	Adimensional
<b>Número de dentes (N)</b>	20	Adimensional
<b>Diâmetro primitivo (d)</b>	20	mm
<b>Saliência (a)</b>	1	mm
<b>Reentrância (b)</b>	1.25	mm
<b>Raio Concordância</b>	0.38	mm
<b>Ângulo de pressão (<math>\alpha</math>)</b>	0.349	rad
<b>Raio círculo base</b>	9.397	mm

As rodas dentadas das extremidades apresentam as mesmas especificações, à exceção de terem sido cortadas segundo ângulos de 234° e 216°, tornando-se em segmentos de rodas dentadas.

#### 4.6.1. Engrenagem

Atuando a roda motora, as rodas dentadas das extremidades, onde assentam os dedos, descrevem o mesmo movimento simétrico de rotação, de acordo com a conversão de velocidades angulares em engrenagens exibida na Figura 4.16.

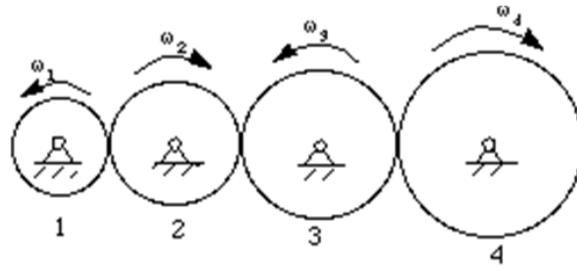


Figura 4.16 Exemplo da velocidade angular numa engrenagem de 4 rodas

A relação de transmissão do mecanismo projetado é constante e igual a um, tal como a relação de engrenagem. Foi projetado desta forma, com diâmetros de círculos primitivos de 20mm para ocupar o menor espaço possível na palma sem comprometer a eficiência do mecanismo ao projetar rodas dentadas de perfil evolvente com baixo número de dentes. O espaço disponível para o mecanismo de orientação corresponde a um retângulo de 80mm de largura por 40mm de altura, como disposto na Figura 4.17.

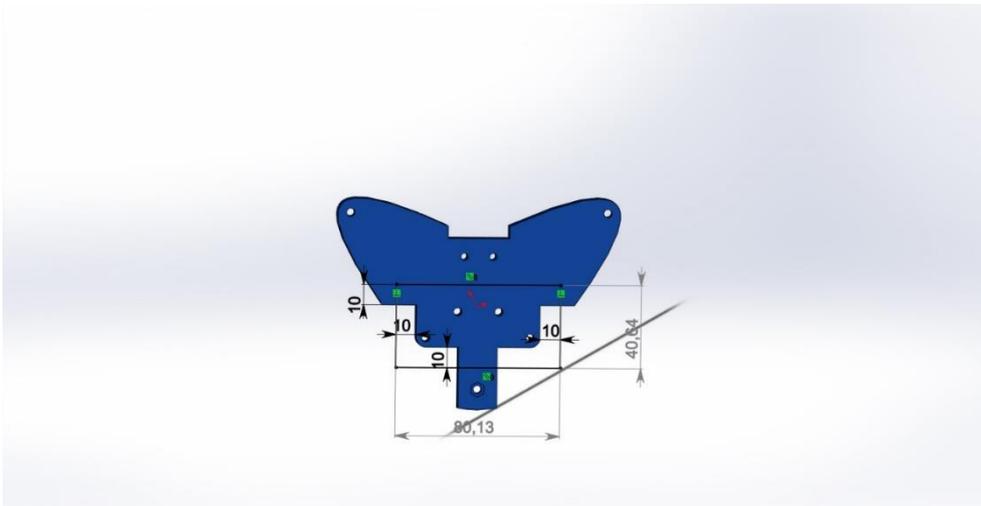


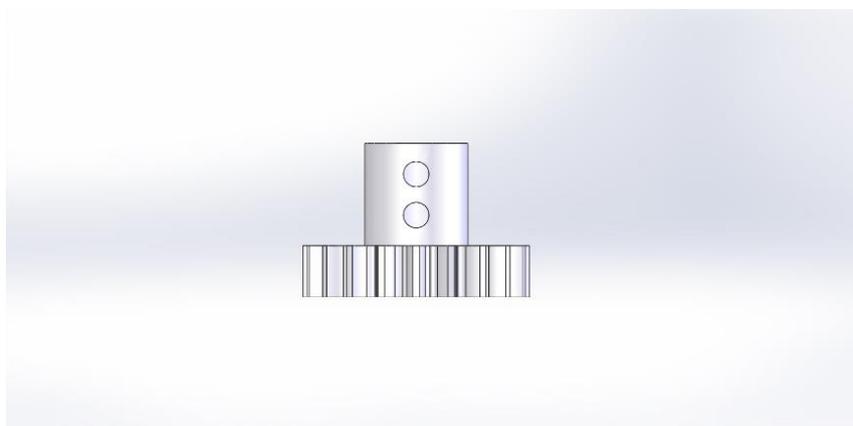
Figura 4.17 Espaço disponível para o mecanismo de orientação

Deste modo, conseguem-se orientar dois dedos para realizar as configurações de apertos necessárias com apenas um atuador. Os comprimentos dos veios das rodas das extremidades são de 18mm, o da roda dentada motora de 116mm e o da roda dentada livre da cadeia de 25mm. Os veios são de aço inoxidável e de 4mm de diâmetro. Existem várias formas de fixação aos veios desde chavetas, cavaletes, veios estriados e fixações poligonais, denominados fixação por forma. Também aperto por cone, interferência por aplicação de forma e interferência por aquecimento/arrefecimento dos componentes, denominados por fixação de atrito são uma alternativa. Optou-se por fixação de atrito e de forma por meio de pinhões cónicos (Figura 4.18).



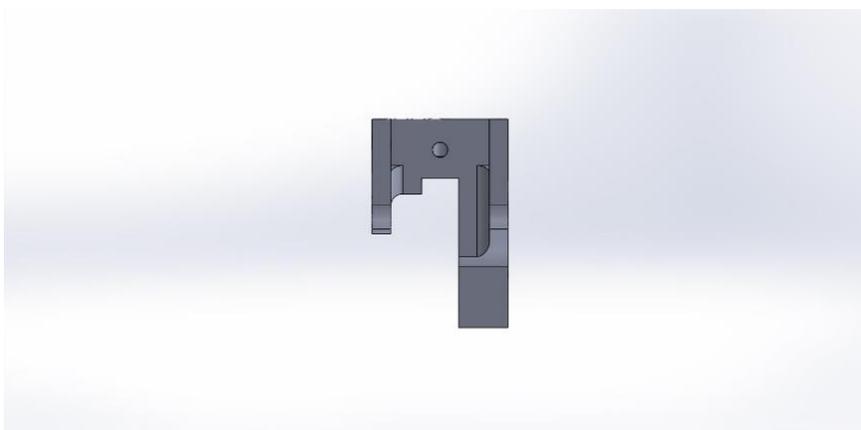
*Figura 4.18 Pinhão cónico*

Estes pinhões cónicos M3 de 3mm de comprimento encostam ao veio, que foi laminado, para que o pinhão se apoie nele e a roda dentada fique fixa. O veio foi laminado apenas na zona onde o pinhão deve encostar. A rodas dentada do mecanismo de orientação e os furos para inserção dos pinhões são possíveis de visualizar na Figura 4.19.



*Figura 4.19 Vista da roda dentada e dos furos para fixação aos veios*

A fixação das rodas das extremidades é feita pelo mesmo mecanismo, mas com a introdução de apenas um pinhão (Figura 4.20) por motivos de espaço disponível.



*Figura 4.20 Vista suporte rotativo com furo para introdução do pinhão.*

A roda dentada motora roda com o veio, por fixação de atrito através dos dois pinhões cónicos. A peça que roda o veio é representada na Figura 4.21 e é presa ao motor por 4 parafusos M2 de 7mm de comprimento.

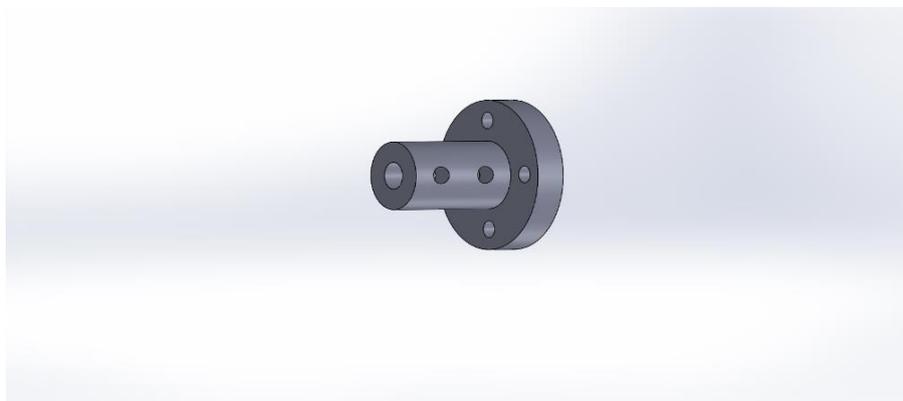


Figura 4.21 Peça de ligação ao atuador e ao veio

Os quatro veios foram roscados com passo 0.7 para introdução de quatro porcas M4 que foram fixas às extremidades. Os quatro veios estão solidários com as rodas dentadas e rodam na palma com atrito desprezável. Os dentes das rodas dentadas e as faces em contacto com a palma foram lubrificadas manualmente por meio de um sistema tubular de lubrificação. A lubrificação deverá ser reabastecida periodicamente após utilizações sucessivas da garra. Como o requisito temporal para posicionamento dos dedos é flexível (*Soft Deadline*), as rodas não rodarão a velocidades muito elevadas e despreza-se a expulsão do óleo por ação da força centrífuga e o aquecimento do sistema.

O binário do motor é 1.62N.m com uma alimentação de 10V. Como a relação de engrenagem é um, esse será o binário de bloqueio aplicado ao sistema de rotação, suficiente para impedir que os dedos rodem livremente sob o efeito de carga durante a manipulação de objetos.

As configurações de apertos possíveis graças ao mecanismo de orientação descrito acima, e à sub-atuação das falanges, são representadas na Figura 4.22.

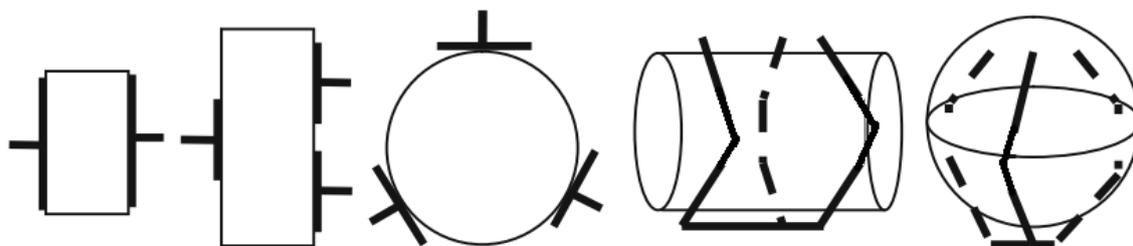


Figura 4.22 Apertos possíveis para a garra projetada.

## 4.7. CAD

Serve a presente secção para documentar as alterações efetuadas ao modelo-base e especificar as peças projetadas. As peças são disponibilizadas abertamente em <https://github.com/Edixo/RobotGripper>.

### 4.7.1. Palma

A palma original (Figura 4.26) contém um sulco em arco de 1.97mm de profundidade no centro da palma. Também contém os suportes dos três dedos integrados. Como apenas um dos dedos será fixo no projeto final poder-se-ia aproveitar a palma com apenas um dos suportes. No entanto, o suporte do dedo fixo necessitou de modificações. As várias alterações que a palma sofreu resultando no produto final da Figura 4.27 foram:

- Eliminação da concavidade da palma;
- Quatro furos de 4mm diâmetro espaçadas de 20mm (círculo primitivo) para as rodas dentadas do sistema de orientação dos dedos (Figura 4.23);

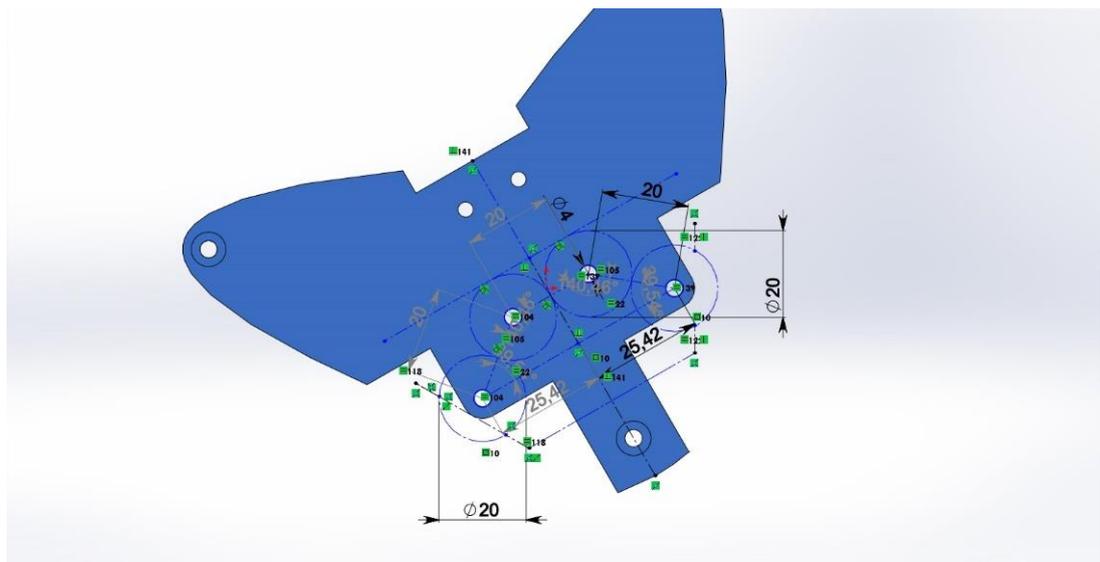
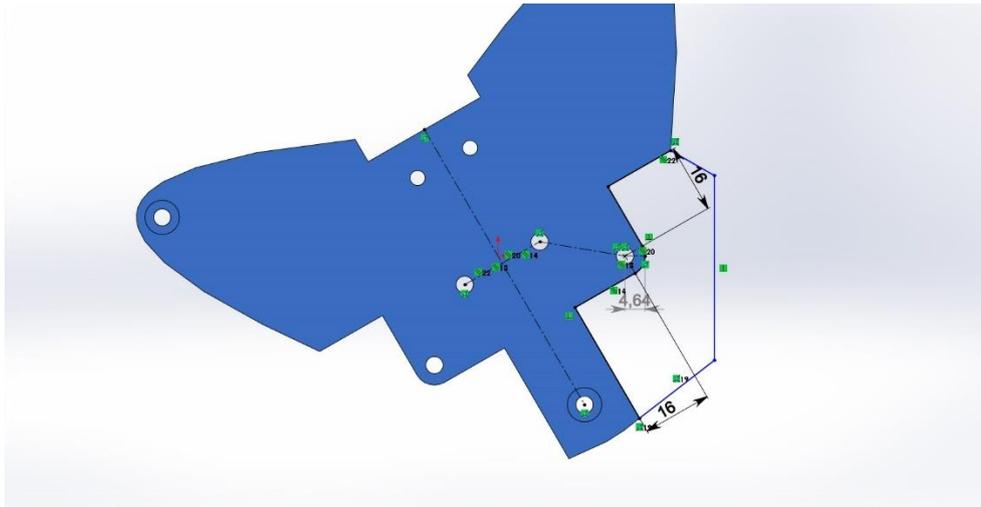


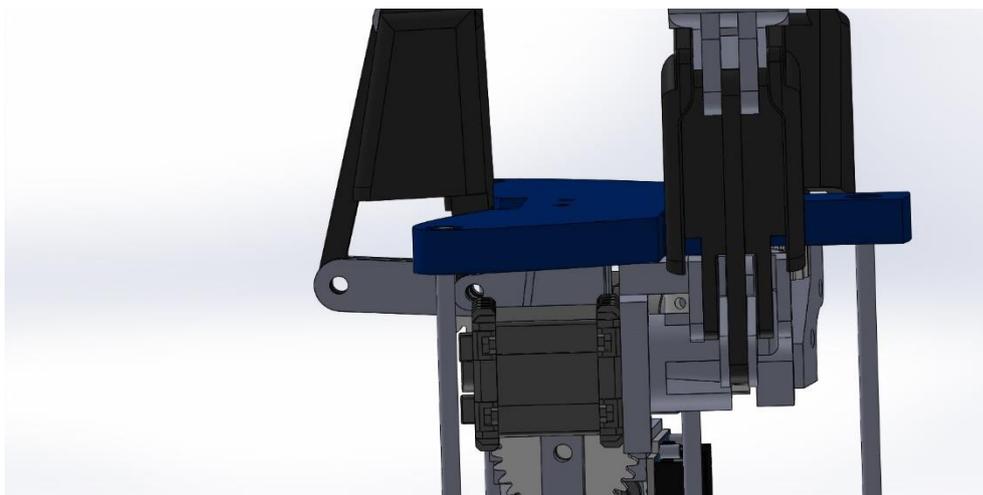
Figura 4.23 Círculos primitivos de 20mm de diâmetro para furos dos veios.

- Corte simétrico para que o suporte dos dedos rode 90°, 45° para cada lado (Figura 4.24);



*Figura 4.24 Corte da palma para a rotação de 90° do dedo.*

- Separação da palma original dos suportes integrados;
- Dois furos de diâmetro 4mm espaçados de 14mm para fixação do suporte do dedo fixo;
- Preenchimento de dois cortes que eram para ligação da palma à base original do modelo-base;
- Alargamento da palma segundo duas parábolas simétricas para abrigar os motores no seu interior durante a rotação dos dedos;
- Dois furos de 4mm de diâmetro para ligação da palma à base da garra na extremidade das parábolas. Esses furos estão feitos de modo a que quando os dedos rodem o ângulo máximo, os motores encostem a 1mm do veio que liga a palma à base (Figura 4.25).



*Figura 4.25 Posição do motor em relação ao veio de suporte, na rotação máxima do dedo (90°)*

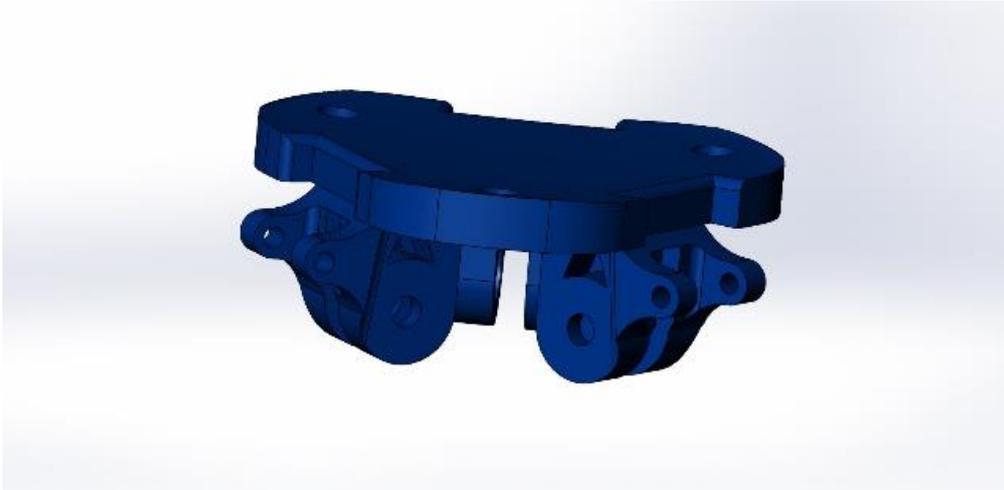


Figura 4.26 Palma do modelo base original (Telegenov et al., 2015)

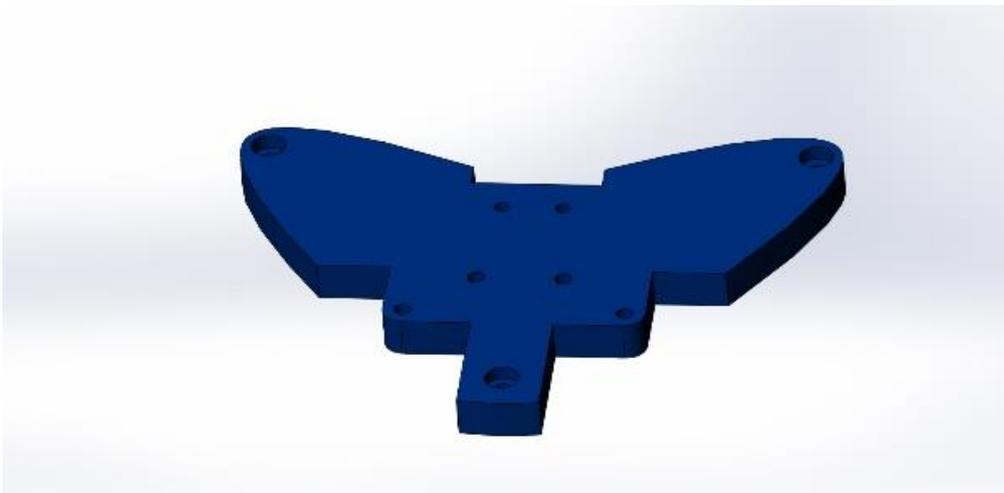


Figura 4.27 Palma final do projeto

#### 4.7.2. Base

A base da garra original (Figura 4.28) corresponde a um cilindro de diâmetro 100 mm e altura 8mm com um suporte para o motor Dynamixel AX-12A. A base da garra modificada (Figura 4.29) corresponde à palma modificada, preenchida por *splines* para que seja convexa. Manteve-se uma fixação para o motor, fazendo uso dos encaixes traseiros de parafusos M2 das caixas dos Dynamixel AX-12A. A posição do motor foi definida de forma a estar fixa, não interferir com a montagem do Arduino, e concêntrica com o veio de atuação do sistema de orientação. O corte retangular de 15mm por 20mm permite ligar os pinos DATA, GND e VDD do Dynamixel.

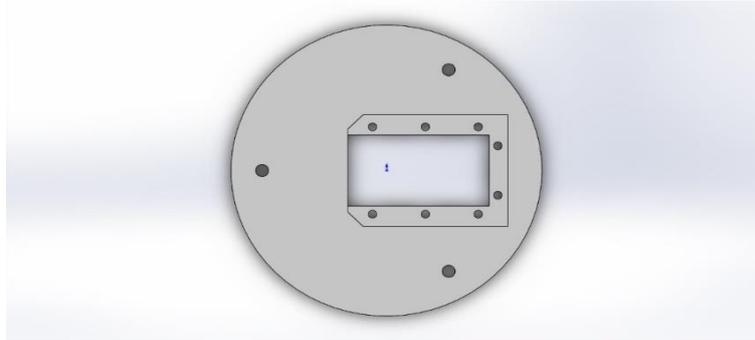


Figura 4.28 Base do modelo base original (Telegenov et al., 2015)

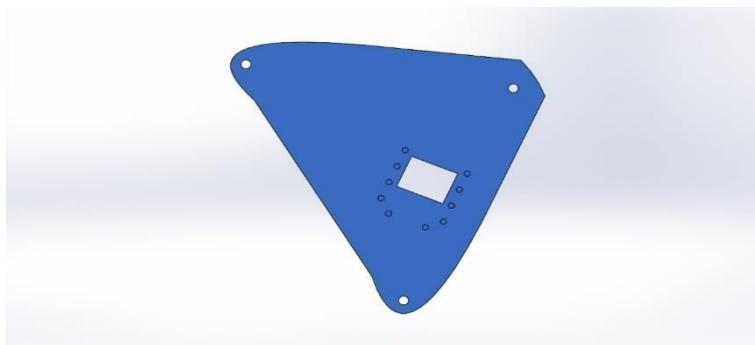


Figura 4.29 Base final do projeto

### 4.7.3. Falange proximal

A falange proximal foi cortada segundo dois retângulos, de lados 7.5mm e 26.28mm, simétricos em relação a uma reta que passa pelo ponto médio da fixação da mola, como apresentado na Figura 4.30.

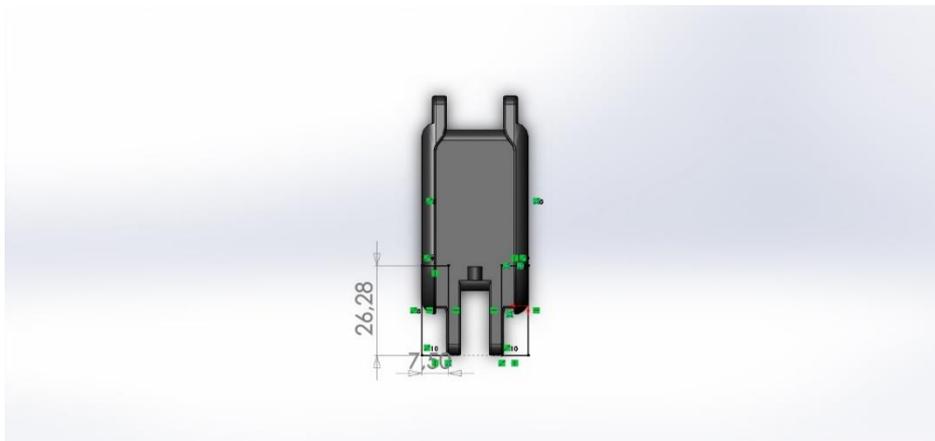
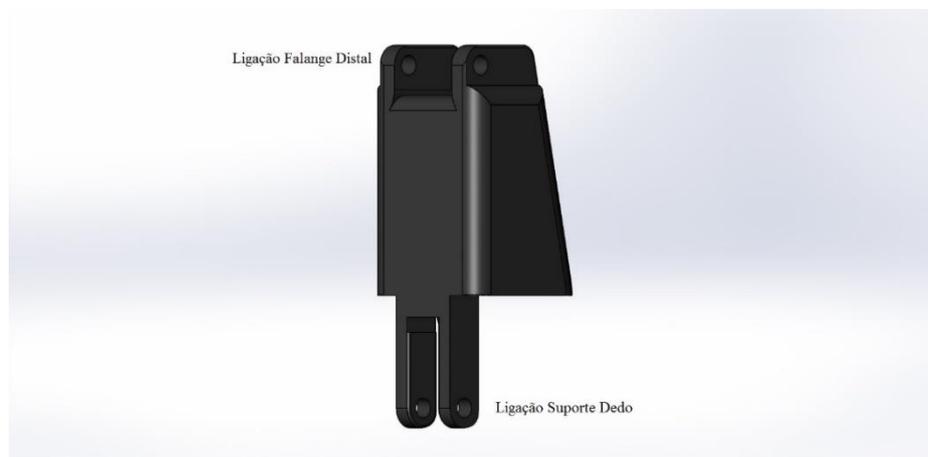


Figura 4.30 Corte falange proximal

O corte que a palma sofreu para que os dedos pudessem rodar noventa graus, foi feito de modo a que a falange proximal batesse no suporte, no ponto onde bateria na palma original (igual ângulo de fecho). Para diminuir o atrito estático entre o suporte e a falange proximal foi retirado o material dos lados. A altura do corte projetado foi de 26.28mm para que a nova roda dentada não batesse no suporte da mola visto que houve uma alteração na relação de engrenagem em relação ao modelo-base para aumentar o binário no final da cadeia. A falange proximal do modelo base e a final, empregue na construção do sistema final, são representadas nas Figura 4.31 e Figura 4.32, respetivamente.



*Figura 4.31 Falange proximal do modelo base (Telegenov et al., 2015)*



*Figura 4.32 Falange proximal final*

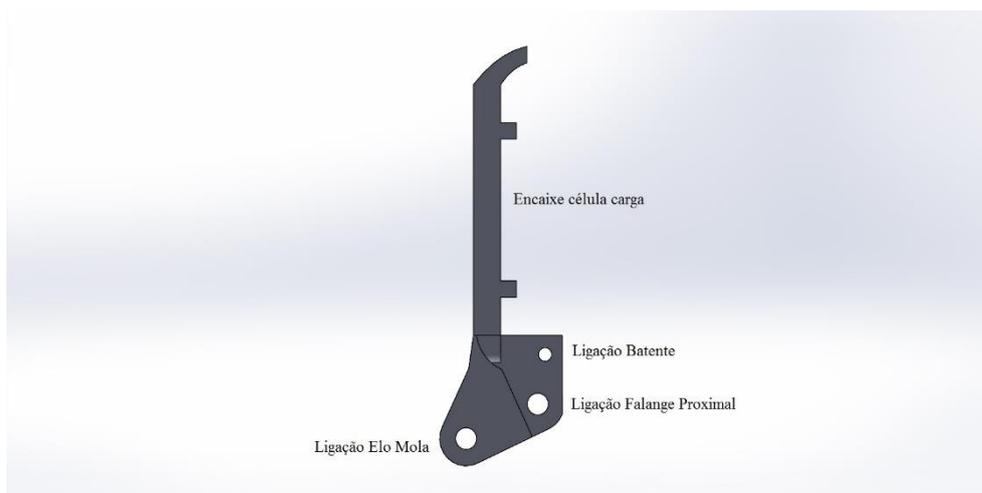
#### 4.7.4. Falange Distal

A falange distal original (Figura 4.33) foi alterada, apenas mantendo os furos para ligação ao elo da mola e à falange proximal. Foi feita uma cavidade para colocação da célula de carga, e um furo para o batente que vai estar em contacto com os objetos, como exposto na Figura 4.34. O espaçamento entre o batente e a falange distal é de 4mm para que a ação da força incida totalmente no sensor. A ligação da

falange proximal à falange distal foi aumentada de 1mm para que os três pinos do sensor táctil pudessem passar na junta das duas falanges e que as ligações elétricas pudessem ser feitas pelo seu interior. Apresenta-se uma vista ampliada da falange distal final com a integração dos sensores na Figura 4.35.



*Figura 4.33 Falange distal do modelo base (Telegenov et al., 2015)*



*Figura 4.34 Vista lateral falange distal*

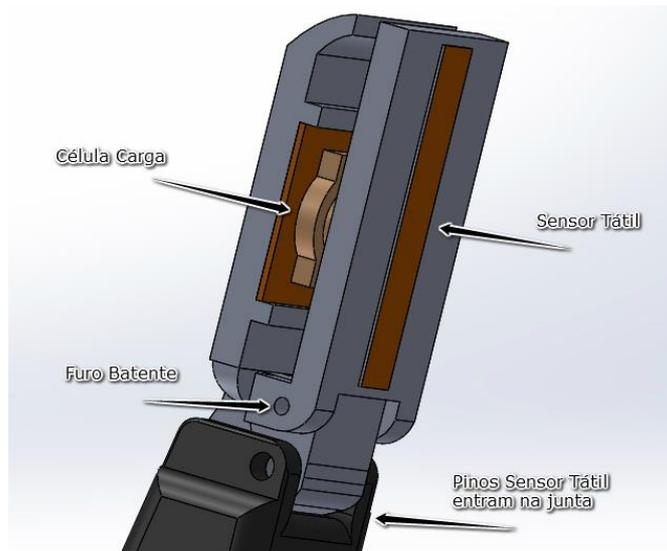


Figura 4.35 Representação falange proximal com sensor tátil e de força

#### 4.7.5. Suporte Dedos rotativos

O suporte dos dedos rotativos (Figura 4.37) corresponde ao suporte do dedo fixo projetado com as seguintes modificações:

- Integração de uma roda dentada que está solidária com a peça. Esta roda dentada é cortada pois não é necessário o dedo realizar uma revolução completa em torno do eixo, mas apenas um quarto de revolução para atingir as configurações de apertos desejadas;
- Três furos de 2.5mm de diâmetro para ligação ao motor Dynamixel Ax-12A. A posição está definida de modo a que o atuador fique concêntrico com o veio de 4mm (Figura 4.36). O veio entra na roda dentada motora e fixa a posição da roda em relação ao suporte do dedo, permitindo apenas a sua rotação;

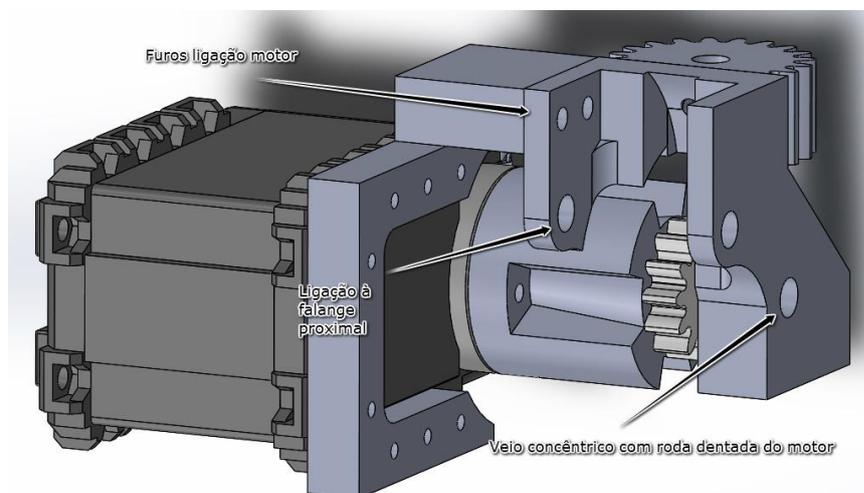
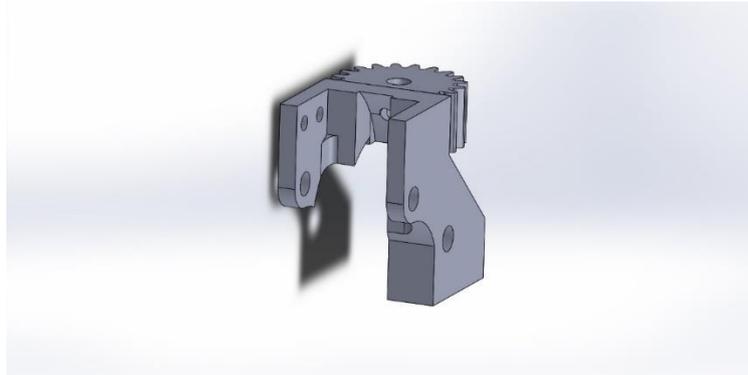


Figura 4.36 Montagem motor ao suporte de um dedo rotativo

- Corte em arco para alocação do motor e facilitar o processo de montagem do motor, veio e roda dentada de abertura e fecho do dedo;
- Corte radial no interior da roda dentada superior para que a roda dentada da abertura/fecho do dedo possa rodar no seu interior livremente;
- Furo de 4mm diâmetro, para inserção do veio, que assegura que qualquer que seja o ângulo que o suporte rode (de 0 a 90°) a distância à palma seja a mesma.



*Figura 4.37 Suporte dedo rotativo*

O suporte do outro dedo rotativo é exatamente igual, à exceção da roda dentada integrada que foi cortada com uma diferença de um dente para que os dois suportes fossem simétricos. Também se efetua o corte em arco para alocação do motor no lado oposto (Figura 4.38), para uma disposição espaçada dos atuadores na palma.



*Figura 4.38 Simetria dos suportes dos dedos rotativos 1 e 2*

#### 4.7.6. Atuação

##### 4.7.6.1. Rotativos

Nos dedos rotativos, o mecanismo de flexão e extensão do dedo consiste numa engrenagem de duas rodas dentadas (Figura 4.39).



Figura 4.39 Roda dentada motora (esquerda), roda movida (direita)

As especificações técnicas das rodas dentadas são apresentadas nos Quadro 4.3 e Quadro 4.4.

Roda motora:

Quadro 4.3 Especificações roda motora dedo rotativo

Grandeza	Valor	Unidade
Módulo (m)	1	Adimensional
Número de dentes (N)	13	Adimensional
Diâmetro primitivo (d)	13	mm
Saliência (a)	1	mm
Reentrância (b)	1.25	mm
Raio Concordância	0.38	mm
Ângulo de pressão ( $\alpha$ )	0.349	rad
Raio círculo base	6.108	mm
Espessura	4	mm

Roda movida:

Quadro 4.4 Especificação roda movida dedo rotativo

Grandeza	Valor	Unidade
Módulo (m)	1	Adimensional
Número de dentes (N)	22	Adimensional
Diâmetro primitivo (d)	22	mm
Saliência (a)	1	mm
Reentrância (b)	1.25	mm
Raio Concordância	0.38	mm
Ângulo de pressão ( $\alpha$ )	0.349	rad
Raio círculo base	10.337	mm
Espessura	4	mm

Com relação de engrenagem 1.69:1 e relação de transmissão 1.69, logo, relação de transmissão redutora. Isto faz com que o binário de saída seja maior que o binário de atuação, mas, por sua vez, a

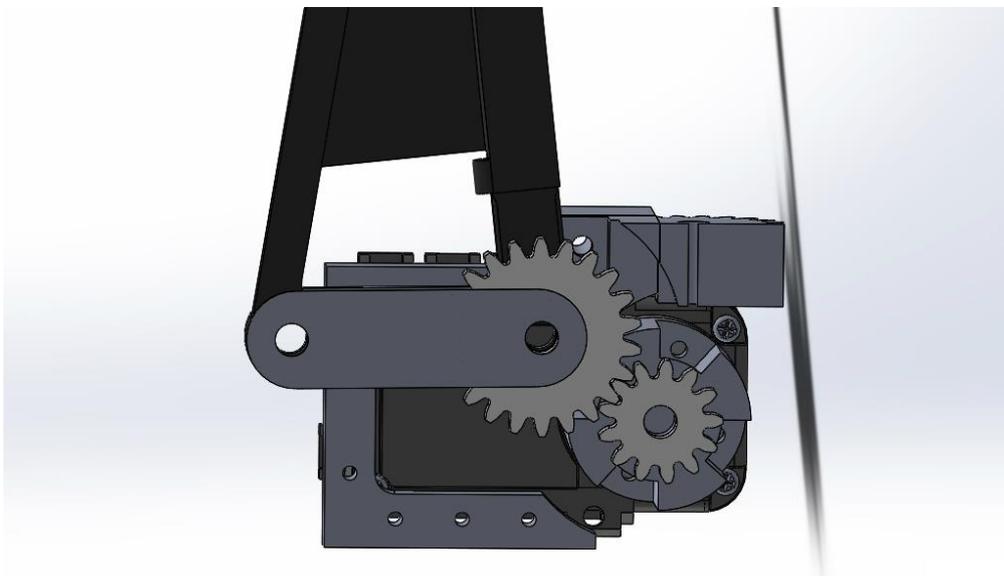
velocidade de abertura e fecho do dedo menor que a velocidade da roda dentada motora. Para efeitos de preensão é mais importante o binário que a velocidade da abertura e fecho, daí ter-se projetado com essa relação de engrenagem. O binário de bloqueio máximo do dedo é de 2.75 N.m com uma alimentação de 10V.

A fixação da roda motora ao atuador é feita através de quatro parafusos M2 de 7mm de comprimento. A Figura 4.40 mostra a roda dentada e os quatro furos para fixação ao motor.



*Figura 4.40 Roda dentada motora com o suporte de ligação ao motor*

A roda dentada movida está ligada à base do dedo pelo elo da falange proximal, de acordo com a Figura 4.41, e faz com que o dedo abra ou feche.



*Figura 4.41 Vista secção sistema de extensão/flexão dedo rotativo*

A falange distal (falange mais distante da palma) está paralela à falange proximal por ação de uma mola. Quando a falange proximal é bloqueada, a ação do motor contraria a força da mola e a falange distal flete. O binário de bloqueio do motor é suficiente para que a falange distal não volte à sua posição inicial. Apenas rodando o motor no sentido inverso as falanges tornam a ficar paralelas.

#### 4.7.6.2. Fixo

O suporte do dedo fixo (Figura 4.42 e Figura 4.47) não necessita nem da roda dentada no topo nem do corte radial interno porque a atuação já não é feita diretamente na roda dentada de fecho/abertura devido à falta de espaço disponível, como pode ser inferido pela Figura 4.45.



Figura 4.42 Diferença entre suporte rotativo e suporte de dedo fixo

O mecanismo projetado consiste numa engrenagem de quatro rodas (Figura 4.43). O número de rodas dentadas teve de ser superior por razões de espaço disponível na montagem devido ao volume que os atuadores Dynamixel AX-12A ocupam.



Figura 4.43 Engrenagem de 4 rodas para extensão/flexão dedo fixo

As especificações técnicas das rodas dentadas são apresentadas nos Quadro 4.5, Quadro 4.6, Quadro 4.7 e Quadro 4.8.

Roda motora:

Quadro 4.5 Especificações roda motora

Grandeza	Valor	Unidade
Módulo (m)	1	Adimensional
Número de dentes (N)	10	Adimensional
Diâmetro primitivo (d)	10	mm
Saliência (a)	1	mm
Reentrância (b)	1.25	mm
Raio Concordância	0.38	mm
Ângulo de pressão ( $\alpha$ )	0.349	rad
Raio círculo base	6.108	mm
Espessura	4	mm

Roda dentada livre da cadeia 1:

*Quadro 4.6 Especificações primeira roda livre da engrenagem*

Grandeza	Valor	Unidade
<b>Módulo (m)</b>	1	Adimensional
<b>Número de dentes (N)</b>	30	Adimensional
<b>Diâmetro primitivo (d)</b>	30	mm
<b>Saliência (a)</b>	1	mm
<b>Reentrância (b)</b>	1.25	mm
<b>Raio Concordância</b>	0.38	mm
<b>Ângulo de pressão (<math>\alpha</math>)</b>	0.349	rad
<b>Raio círculo base</b>	6.108	mm
<b>Espessura</b>	4	mm

Roda dentada livre da cadeia 2:

*Quadro 4.7 Especificações segunda roda livre da engrenagem*

Grandeza	Valor	Unidade
<b>Módulo (m)</b>	1	Adimensional
<b>Número de dentes (N)</b>	22	Adimensional
<b>Diâmetro primitivo (d)</b>	22	mm
<b>Saliência (a)</b>	1	mm
<b>Reentrância (b)</b>	1.25	mm
<b>Raio Concordância</b>	0.38	mm
<b>Ângulo de pressão (<math>\alpha</math>)</b>	0.349	rad
<b>Raio círculo base</b>	6.108	mm
<b>Espessura</b>	8.75	mm

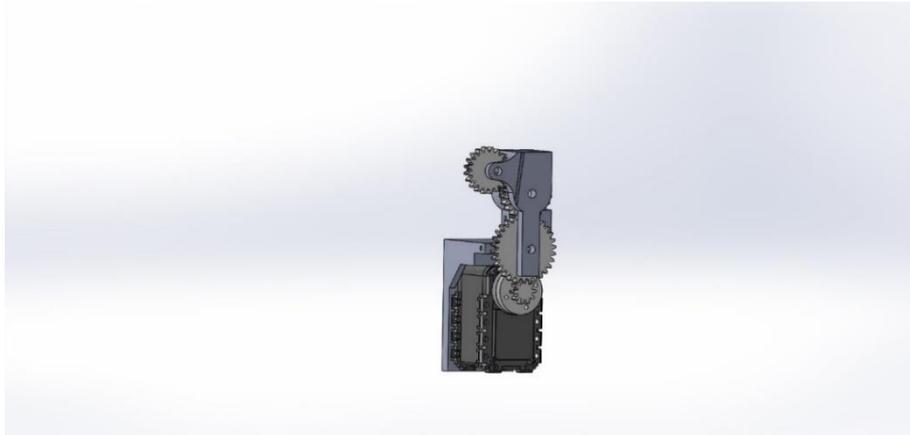
Roda movida (fim da cadeia):

*Quadro 4.8 Especificações roda movida (fim da engrenagem)*

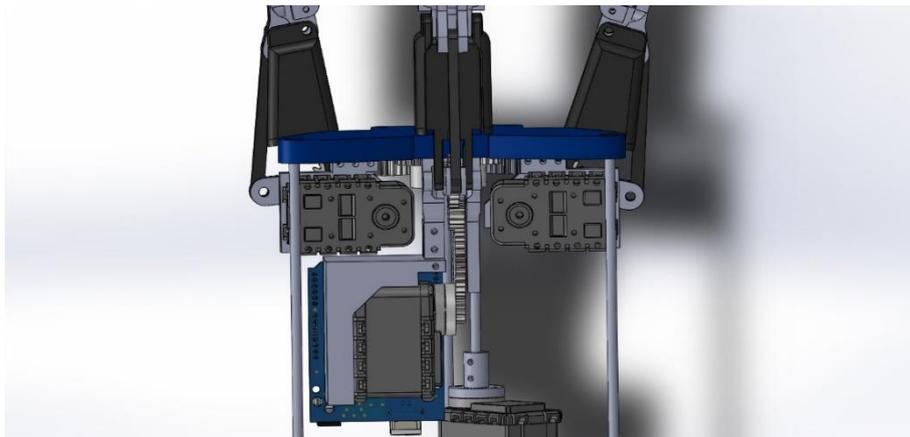
Grandeza	Valor	Unidade
<b>Módulo (m)</b>	1	Adimensional
<b>Número de dentes (N)</b>	20	Adimensional
<b>Diâmetro primitivo (d)</b>	20	mm
<b>Saliência (a)</b>	1	mm
<b>Reentrância (b)</b>	1.25	mm
<b>Raio Concordância</b>	0.38	mm
<b>Ângulo de pressão (<math>\alpha</math>)</b>	0.349	rad
<b>Raio círculo base</b>	6.108	mm
<b>Espessura</b>	4	mm

A relação de transmissão é dois. O binário de bloqueio máximo do dedo fixo será 3.22 N.m com uma alimentação de 10V. A fixação da roda motora ao atuador é feita por meio de parafusos M2 de 6mm de comprimento. As restantes rodas são montadas por meio de veios de 4mm de diâmetro com comprimentos:

- 6mm para a roda dentada livre da cadeia 1;
- 22mm para a roda dentada livre da cadeia 2;
- 23 mm para a roda movida (fim da cadeia).



*Figura 4.44 Vista do motor e da engrenagem de 4 rodas para o dedo fixo*



*Figura 4.45 Necessidade de baixar o atuador do dedo fixo por causa da rotação dos outros 2*

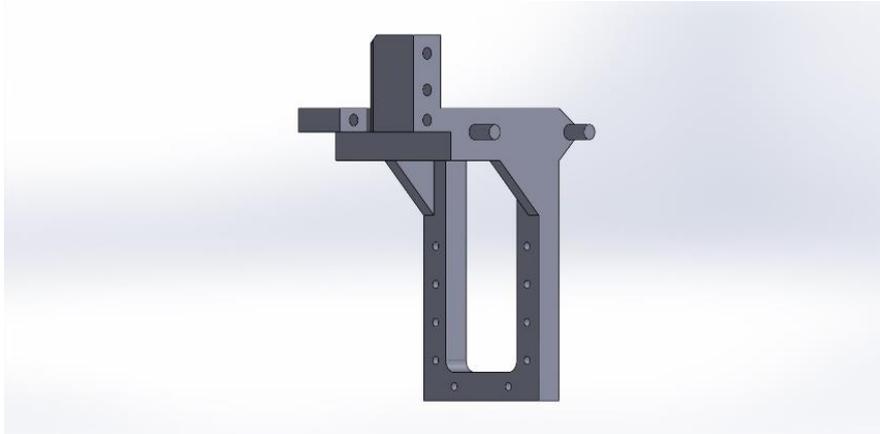
#### 4.7.7. Ligação dos motores

Os suportes dos motores para os dedos rotativos são iguais, mas simétricos (Figura 4.46) de forma a otimizar o espaço ocupado pelos atuadores.



*Figura 4.46 Ligação aos motores simétricos*

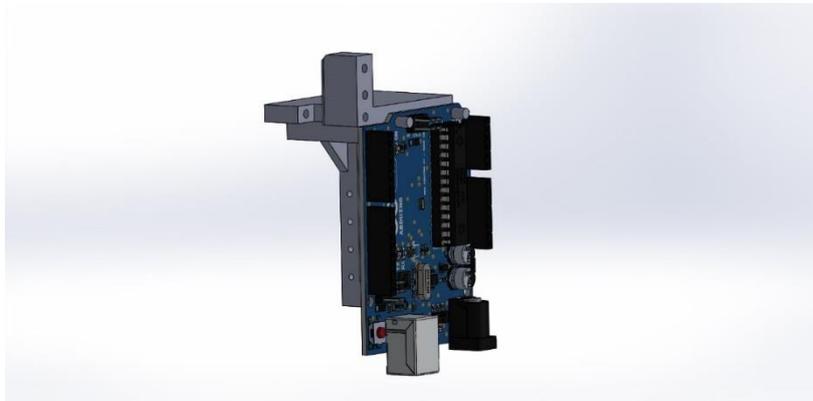
O suporte do motor que atua o dedo fixo, é fixado ao suporte desse dedo por um parafuso M3 de 34mm.



*Figura 4.47 Suporte dedo fixo, Dynamixel AX-12A e Arduino*

#### 4.7.8. Arduino

O suporte do microcontrolador Arduino Uno Rev. 3 (Figura 4.48) está integrado no suporte do motor do dedo fixo. O microcontrolador é fixado por porcas autoblocantes M3.



*Figura 4.48 Ligação do Arduino ao suporte do dedo fixo*

A única peça que não sofreu alterações no projeto foi o suporte da mola que faz a ligação entre a falange proximal e distal.

## 4.8. Sensores

### 4.8.1. Força

Cada dedo da garra possui duas partes móveis, a falange proximal e a distal. Quando o dedo abre ou fecha, as duas falanges estão paralelas e realizam um movimento radial. É possível estimar a força exercida para mover as duas falanges através da informação de realimentação do motor. Contudo, a falange distal é atuada por um mecanismo passivo, a mola, não ficando totalmente caracterizada. Para determinar qual a força exercida no objeto foi integrada na falange distal de cada um dos dedos uma célula de carga YZC-161B (Figura 4.49).

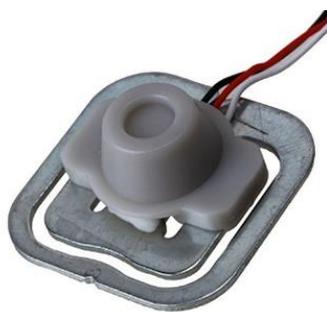


Figura 4.49 Célula de carga YZC-161B

As especificações da célula de carga empregue são detalhadas no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 Especificações célula de carga YZC-161B

<b>Capacidade</b>	5 Kg
<b>Sensibilidade</b>	$1.0 \pm 0.1$ mV/V
<b>Não Linearidade</b>	0.08% FS
<b>Histerese</b>	0.1% FS
<b>Repetibilidade</b>	0.05% FS
<b>Fluência</b>	0.05% FS
<b>Efeito temperatura saída</b>	0.02% FS/°C
<b>Efeito temperatura zero</b>	0.02% FS/°C
<b>Desvio Zero</b>	$\pm 0.1000$ mV/V
<b>Resistência Entrada</b>	$1000 \pm 20\%$ $\Omega$
<b>Resistência Saída</b>	$1000 \pm 10\%$ $\Omega$
<b>Resistência Isolamento</b>	2000 M $\Omega$
<b>Carga Limite Segurança</b>	120% FS
<b>Sobrecarga de Rotura</b>	150 % FS
<b>Temperatura de operação</b>	-20~65 °C
<b>Tensão alimentação recomendada</b>	5 VDC
<b>Tensão alimentação máxima</b>	8 VDC

#### 4.8.1.1. Montagem do sensor na garra

A razão para se ter colocado o sensor em apenas uma das falanges, em vez de nas duas, deve-se ao facto de a falange distal ser usada para realizar apertos de precisão. Neste tipo de aperto, têm-se pequenas forças exercidas e reduzidas superfícies de contacto (Figura 4.50) sendo por isso necessário monitorizar e controlar a preensão para adaptação às características individuais do objeto.

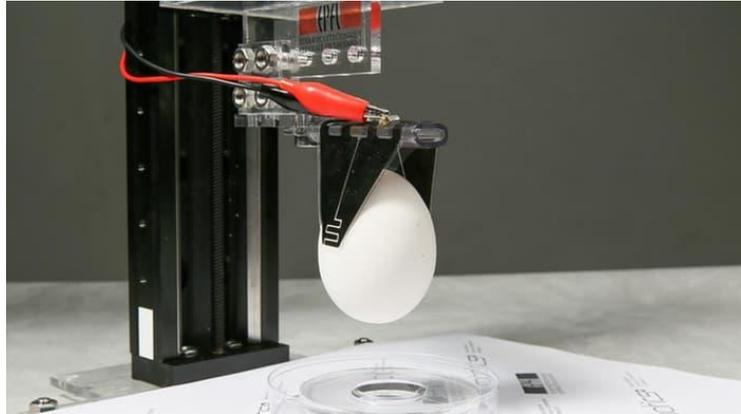


Figura 4.50 Exemplo aperto precisão objeto oval (retirado de <http://www.gizmag.com/robotic-gripper-electrostatic-field/41613/>)

Em apertos de potência, os dedos envolvem o objeto, usando a palma como suporte, porque o objetivo é uma configuração estável para transporte do material (de um ponto A para um ponto B) e não uma elevada capacidade manipulativa. Apesar dos apertos de potência serem caracterizados por elevadas estabilidade e forças, a superfície de contacto também é alta e as forças estão por isso bem distribuídas no objeto.

A falange distal foi projetada de forma a que o batente tocasse na falange proximal no movimento de sub-atuação, impedindo que a falange distal fizesse um ângulo inferior a  $68^\circ$  com a falange proximal (Figura 4.51).

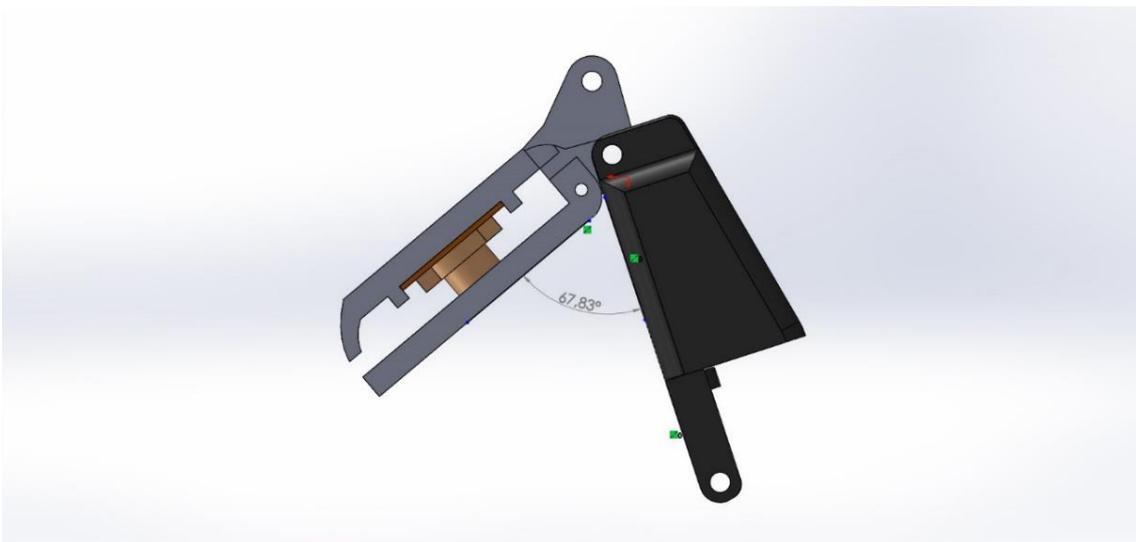


Figura 4.51 Ângulo máximo da falange distal com a proximal.

#### 4.8.1.2. Ligações elétricas

O sensor YZC-161B é um circuito de meia ponte (Figura 4.52), ou seja, tem apenas 2 elementos ativos (extensômetros). Um extensômetro é montado de forma a ser sensível à compressão e outro à extensão.

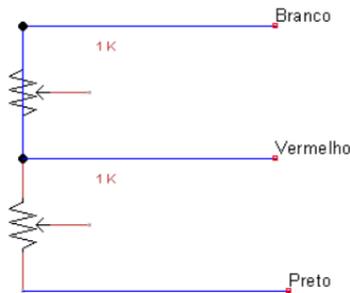


Figura 4.52 Esquema célula de carga YZC-161B

Para completar a ponte é necessário ligar duas resistências de igual valor, tendo-se para esse efeito escolhido valores de  $1k\Omega$ . A ligação dos sensores ao HX711 e ao Arduino é apresentada na Figura 4.53.

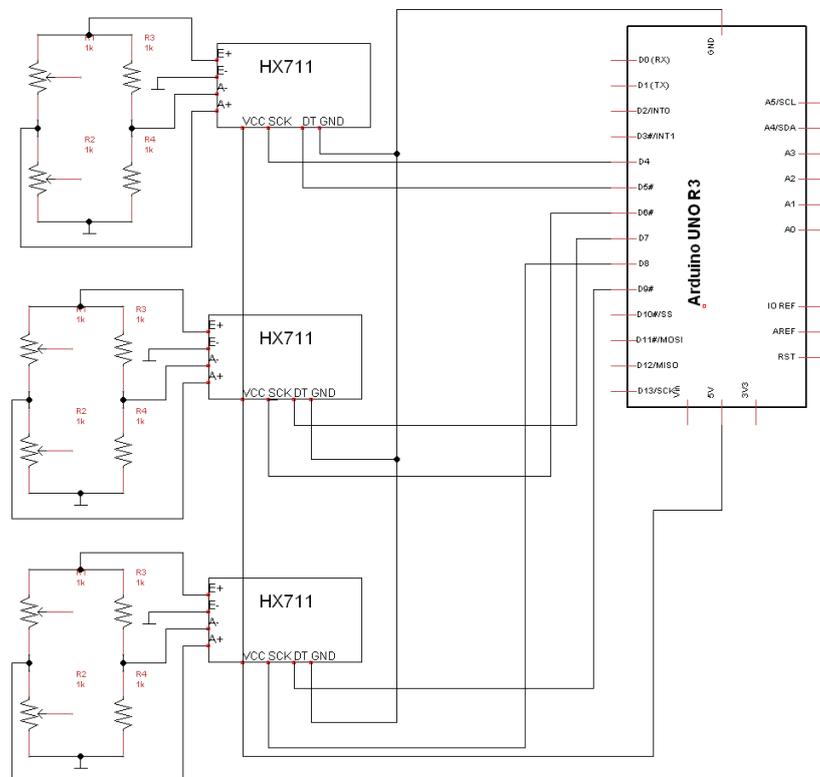


Figura 4.53 Ligações das células de carga

O HX711 é um conversor analógico-digital de duplo canal (A e B) com controlo de ganho (32, 64 e 128) usado para obter dados mensuráveis de células de carga. Este conversor vem por omissão com uma taxa de amostragem de 10 Hz. É possível aumentar a taxa de amostragem ligando o pino 15 diretamente à tensão de alimentação (VCC) como se explicita na Figura 4.54.

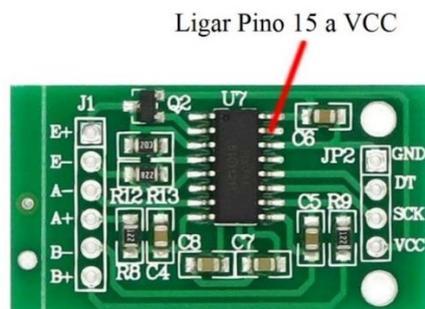


Figura 4.54 Aumentar taxa de amostragem do HX711

Apesar de isto permitir ler dados oito vezes mais rápido, aumentaria o erro dos dados medidos se estivermos apenas interessados em variações lentas na leitura das forças. Como não se esperam mudanças bruscas por parte da abertura/fecho dos dedos da garra, mas sim mudanças graduais, deixou-se a taxa de amostragem de omissão. Importa referir que o canal B tem um ganho fixo de trinta e dois e o canal A um ganho de cento e vinte oito por omissão, podendo-se optar por sessenta e quatro. Numa primeira fase, tentou-se usar um HX711 para cada dois sensores fazendo uso do canal A e B. Contudo, o canal B, com o seu ganho fixo reduzido de trinta e dois não foi projetado para ler uma célula de carga independente, mas sim para medir a tensão de referência em células de carga de seis fios. Também seria preciso efetuar uma calibração individual para cada célula e ler os dois valores dentro do mesmo ciclo. A *datasheet* do sensor não fornece informações relativas ao tempo de troca entre canais e foi apenas possível medir os valores em estado bruto de duas células de carga usando os dois canais. A mudança de canal introduziria um tempo extra o que faria com que não fosse possível adquirir os dados a 10 Hz. Foi utilizada a biblioteca disponível em <https://github.com/bogde/HX711>. A escolha do ganho é feita com a função `set_gain()` e o seu parâmetro irá escolher o canal a ser usado, trinta e dois para o canal B e sessenta e quatro ou cento e vinte e oito para o canal A. Contudo, selecionar o ganho apenas altera uma *flag* que apenas terá efeito na próxima iteração. Como o preço do HX711 é baixo (menos de 5 euros) e não acarreta muitas ligações ao Arduino nem espaço na montagem, foi utilizado um conversor analógico digital HX711 para cada uma das células de carga.

#### 4.8.1.3. Calibração dos sensores

Para calibração dos sensores foram seguidos os passos aconselhados na biblioteca do HX711. Foi chamada a função `set_scale()` sem parâmetros e seguidamente a função `tare()` que faz a média dos valores medidos e usa-os para calcular o desvio (*offset*). Após isto, foi colocado um peso de 74 gramas, medido com uma balança de cozinha YHC-1103 de precisão 0.1 gramas. Foi chamada a função `get_units(10)` que

faz a média dos últimos dez valores medidos (parâmetro passado), subtrai a esse valor o desvio e divide-o pelo fator de escala (valor a calibrar).

$$get_{units(n)} = \frac{(\sum_{i=0}^n valor_{(i)}) - desvio}{fator\ de\ escala} \quad (4.3)$$

Finalmente, divide-se o resultado dado pela função *get\_units(10)* pelo valor calculado do peso e esse será o parâmetro fator de escala a passar depois no programa. Para dividir a calibração e o funcionamento do programa de prensão, o parâmetro de escala foi guardado na EEPROM do Arduino Uno. Esta memória não volátil guarda no endereço zero, quatro e oito os valores do fator de escala das células um, dois e três respetivamente. É necessário efetuar este procedimento pelo menos uma vez para cada célula de carga, podendo ser necessário ajustar o fator de escala. Após calibração bastará ler os valores guardados na EEPROM no programa principal. São apresentadas na Figura 4.55, 10 leituras do peso de 74 gramas aplicado à falange distal do dedo.

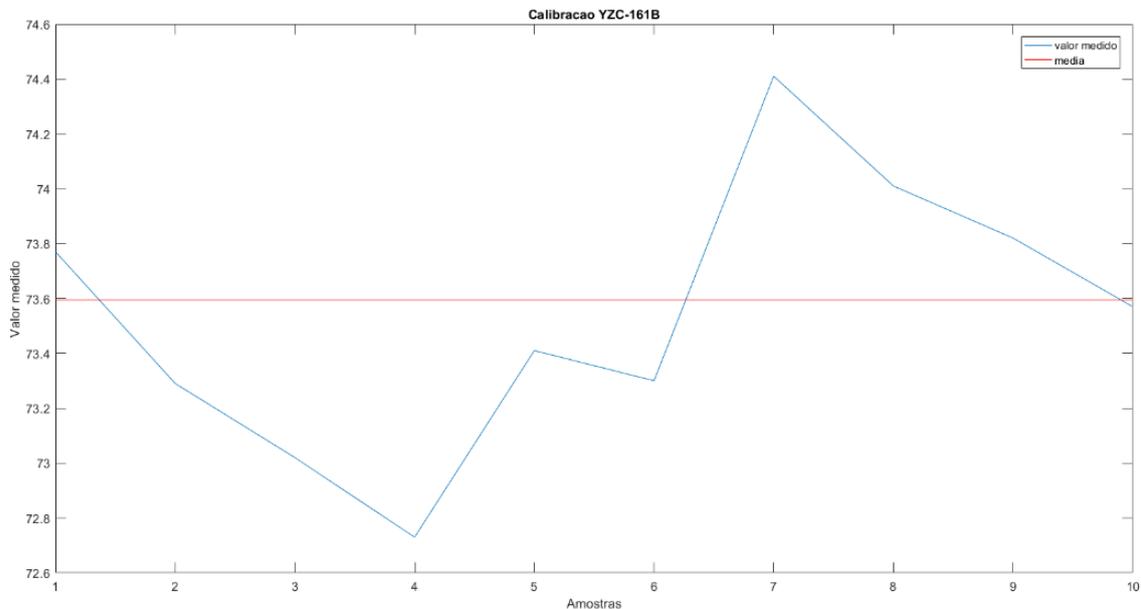


Figura 4.55 Amostra de 10 valores medidos após calibração com peso.

#### 4.8.2. Táctil

Para além do controlo de força, utilizando sensores tácteis confere-se maior versatilidade de operação à garra projetada. Sem controlo visual (ausência de câmaras), desde que se forneça uma ideia da geometria aproximada do objeto a manipular, pode-se utilizar o controlo táctil para correto posicionamento da garra em relação ao objeto. Para esse efeito, utilizam-se potenciômetros lineares (Figura 4.57) cuja resistência varia entre 100Ω e 10kΩ e permitem calcular a posição relativa de contacto do objeto no dedo, na área ativa do potenciómetro. As vantagens do uso deste sensor são: reduzida espessura para fácil

integração (< 0.5mm), elevada repetibilidade, linearidade nas medidas (1 a 5%) e elevada resistência mecânica que permite que o sensor esteja em contacto com os objetos durante a prensão. O sensor é esquematizado na Figura 4.56.

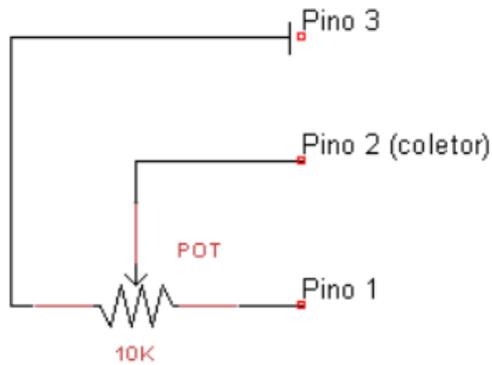


Figura 4.56 Esquema potenciômetro linear

Este potenciômetro de membrana funciona como um divisor de tensão variável conforme a posição de contacto no sensor. É composto por três camadas (Figura 4.58), assim que as camadas superiores e inferiores entram em contacto, o sinal de resistência é enviado em sentidos opostos desde o ponto de toque.

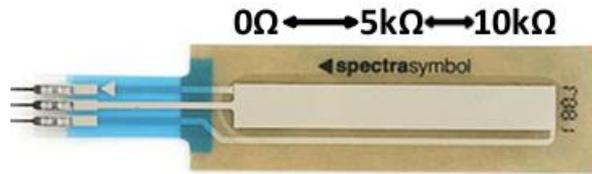


Figura 4.57 Variação da resistência do potenciômetro

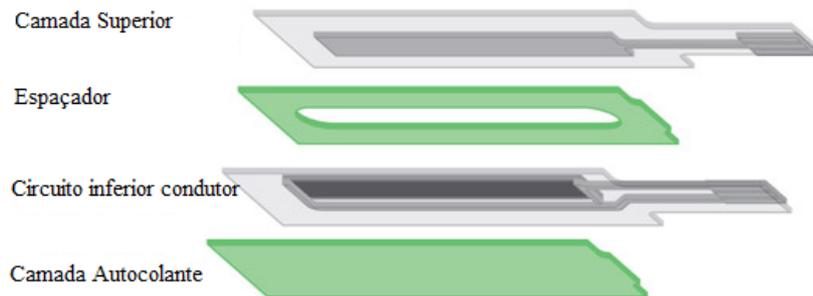


Figura 4.58 Esquema interno do potenciômetro membrana.

A resolução do sensor, isto é, o menor incremento de movimento que produz uma variação do sinal de saída, é teoricamente infinita. Como o sinal de saída varia entre uma infinidade de valores (sinal analógico) é necessário ligar o coletor do sensor a um conversor analógico-digital. Neste projeto utiliza-se

o microcontrolador Arduino Uno R3 que tem 6 portas (A<sub>0...6</sub>) capazes de ler tensões analógicas. O conversor analógico-digital do Arduino Uno tem uma resolução de 10 bits e consegue, portanto, distinguir 1024 níveis diferentes (2<sup>10</sup>).

#### 4.8.2.1. Ligações elétricas

Apresenta-se na Figura 4.59 o esquema da montagem seguido:

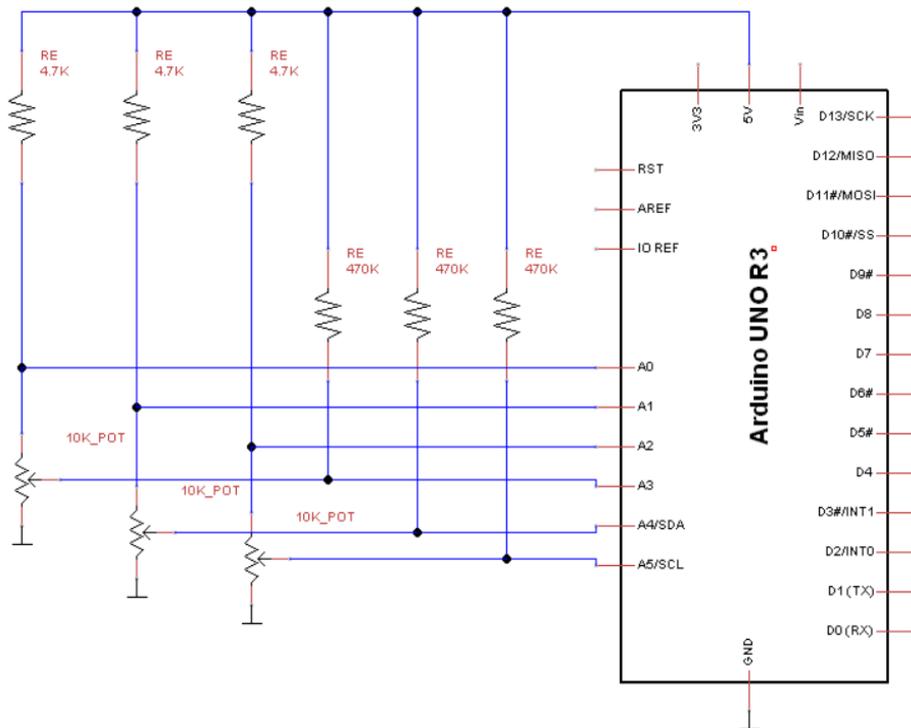


Figura 4.59 Esquema de montagem do sensor táctil

É necessário colocar uma resistência do sensor à tensão de alimentação, caso contrário, o sensor aqueceria muito quando se tocasse na zona de baixa resistência. O circuito equivalente de um potenciômetro individual é dado pela Figura 4.60.

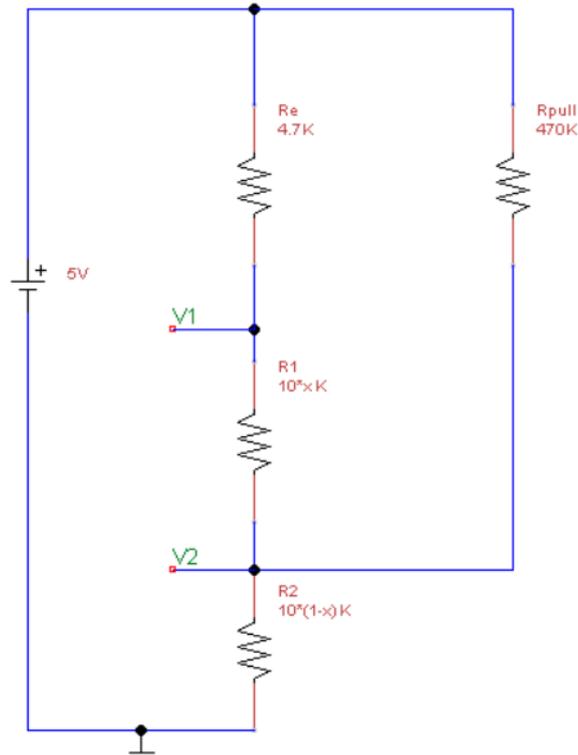


Figura 4.60 Esquema individual da célula de carga com resistências  $R_1$  e  $R_2$

Na Figura 4.60, o potenciômetro de membrana foi substituído por um modelo de duas resistências em série  $R_1$  e  $R_2$  de resistências  $10 * x \text{ k}\Omega$  e  $(1 - x) * 10 \text{ k}\Omega$ , respetivamente, com  $x$  a posição de contacto no sensor a variar entre 0.0 e 1.0. Pela simples aplicação da primeira lei de Kirchoff ou lei dos nós ( 4.4 ), obteve-se a equação ( 4.5 )

$$\frac{5 - v_2}{4.7 + 10x} = \frac{v_2}{10(1 - x)} + \left(-\frac{5 - v_2}{470}\right) \quad ( 4.4 )$$

$$v_2 = \frac{5(100x + 4747)(x - 1)}{-100x^2 + 53x + 6956} \quad ( 4.5 )$$

Que representa a tensão do coletor em função da posição de contacto  $x$ . A Figura 4.61 é a representação gráfica da equação ( 4.5 ).

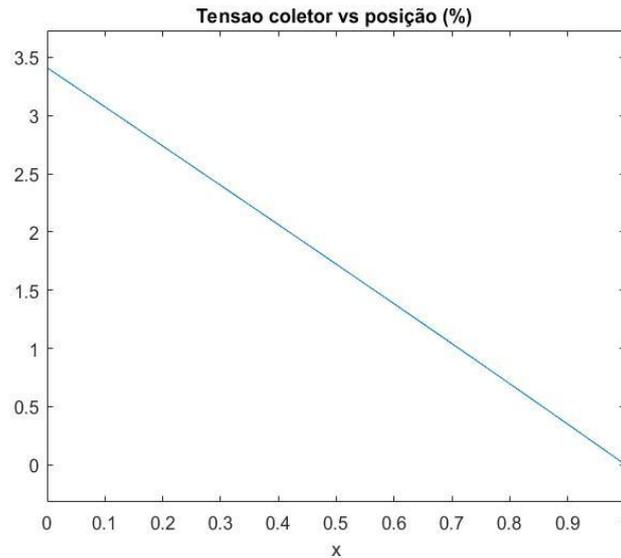


Figura 4.61 Gráfico da tensão do coletor em função da posição do toque

Com: valor mínimo: 0 V ( $x = 1$ )

valor máximo: 3.4122 V ( $x = 0$ )

Conclui-se que as resistências adicionadas diminuíram a resolução do sensor sem afetar a linearidade, fazendo o valor lido pelo ADC variar entre 0 e 698. Como a tensão do pino 2 (coletor ou *wiper*) flutua quando não há contacto na área ativa do sensor, utilizam-se resistências de 470k $\Omega$  de *pull-up* para que a tensão seja de 5V quando não haja contacto. A escolha do valor da resistência de *pull-up* deve ser suficientemente baixa para que a tensão do coletor seja 5V quando não ocorra contacto, e ao mesmo tempo, suficientemente alta para reduzir erros de linearidade nas medidas do sensor. Demonstra-se, através das Figura 4.62 e Figura 4.63, o que acontece à linearidade das medidas com valores diferentes para as resistências de *pull-up*.

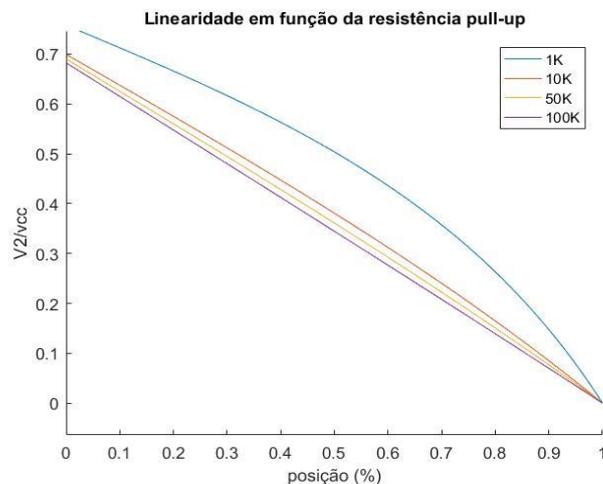


Figura 4.62 Linearidade da saída em função da resistência de *pull-up*

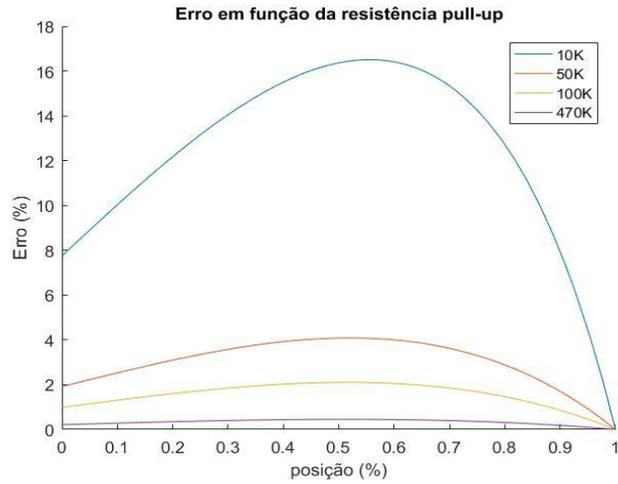


Figura 4.63 Erro em função da posição de toque

Os erros máximos de linearidade são apresentados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 Erros máximos em função do valor da resistência de pull-up

Resistência	Erro Máximo (%)
10k	16.5093
50k	4.0876
100k	2.1067
470k	0.4580

De onde se retira que a escolha da resistência externa de *pull-up* de 470k é adequada para manter a linearidade do sensor, e é melhor do que utilizar as resistências de *pull-up* internas do Arduino que apresentam um valor típico de 20kΩ.

Finalmente, pode-se obter uma estimativa da área de contacto do sensor com o objeto graças ao valor da tensão  $v_1$ . Calculando  $R_1$  e  $R_2$  em função das tensões  $v_1$  e  $v_2$ , e, sabendo que quanto maior a área de contacto menor o valor de  $R_1+R_2$  pois a área curta-circuitada é maior obtêm-se as equações ( 4.6 ) e ( 4.7 ):

$$R_1 = \frac{4.7(v_1 - v_2)}{5 - v_1} \quad ( 4.6 )$$

$$R_2 = 470 \frac{v_2}{505 - 100v_1 - v_2} \quad ( 4.7 )$$

A área de contacto  $d$  corresponderá a  $\frac{10 - R_1 - R_2}{10}$  (%).

## 4.9. Motores

Para a abertura e fecho dos dedos da garra, bem como para a sua orientação, foram escolhidos atuadores Dynamixel-Ax12A. Um atuador para cada dedo para extensão e flexão, totalizando três, e outro para atuar as rodas dentadas que posicionam os dois dedos simultaneamente.

A vantagem da escolha destes atuadores são:

- Realimentação da temperatura interna.
- Realimentação da posição angular do veio.
- Realimentação da velocidade de rotação.
- Realimentação do esforço de carga (direção)
- Binário e limites dos ângulos de rotação configuráveis.
- Ligação em cadeia (*Daisy-chain*).
- Relatório de erros.

Existem dois modos de funcionamento: roda e articulado. O modo de roda, tal como o nome indica, é para acoplamento do motor a rodas em que se preveja que estas rodem sem controlo de posição. O modo articulado, usado no projeto, é escolhido sempre que seja preciso controlar a posição do motor com ângulos específicos, como por exemplo, colocar os dedos de um manipulador nas coordenadas pretendidas. Neste modo:

- O binário pode ser configurado passando como parâmetro um valor entre 0 e 1023 aos endereços 34 e 35 da RAM. Um valor de 1023 corresponderá a 100% do binário disponível e 512 a apenas metade;
- A posição desejada é escolhida passando como parâmetro um valor entre 0 e 1023. A resolução é de 0.29°. Passando 512 aos endereços 30 e 31 da RAM o ângulo será de 150°, com 1023 será 300° (ângulo máximo);
- A velocidade de rotação também é configurável passando aos endereços 32 e 33 um valor compreendido entre 0 e 1023. A resolução é de 0.111 revoluções por minuto;
- Realimentação do esforço de carga por leitura do valor dos endereços 40 e 41. O valor está compreendido entre 0 e 2047. Se for entre 0 e 1023, significa que a carga contraria o movimento na direção anti horária, se for entre 1024 e 2047 passa-se o mesmo, mas na direção horária. Um valor de 512 significará que o motor faz esforço no sentido anti-horário a 50% do seu binário máximo, pois a resolução é de 0.1%;
- O ângulo do veio do motor varia entre 0 e 300°. Isto deve ser levado em conta quando se projeta a relação de engrenagem das rodas dentadas que ligam ao servo.

A comunicação é assíncrona *half-duplex* feita por porta-série de saída TTL. Por ser *half-duplex*, o motor não pode transmitir e receber os dados simultaneamente. A comunicação é feita através de um único pino (pino 3), com o pino 1 (terra) como referência. Os pins estão esquematizados na Figura 4.64.

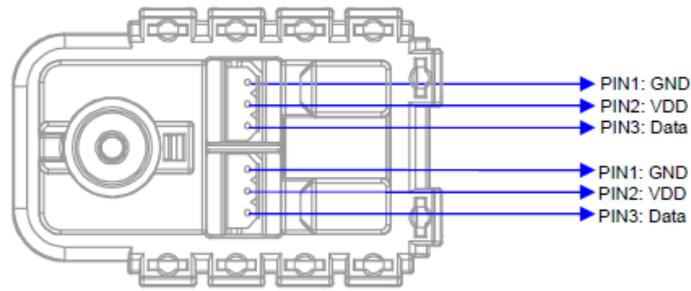


Figura 4.64 Pins do Dynamixel AX-12A

Durante o envio de um pacote de instruções ao motor a direção de comunicação deve ser de saída, passando a entrada após a recepção do pacote. É possível configurar um relatório de estado de pacotes para: não enviar para nenhuma das instruções, enviar só para as instruções de leitura ou para todas as instruções.

#### 4.9.1. Montagem

O esquema de montagem é representado na Figura 4.65.

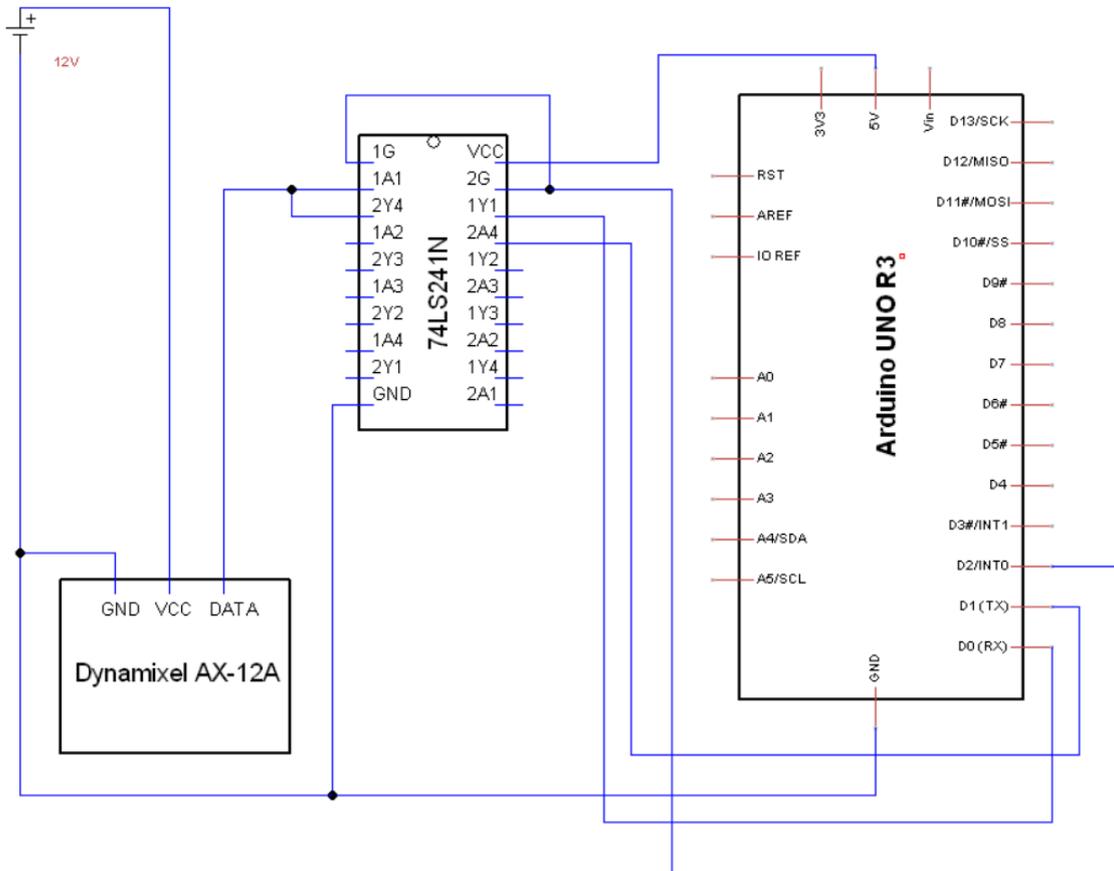


Figura 4.65 Esquema de montagem dos atuadores

Os restantes Dynamixel são ligados entre si em cadeia, O componente 74LS241N corresponde a um *tri-state buffer* e é utilizado quando existem vários componentes ligados à mesma pista, frequentemente em UART *half-duplex*. Com este esquema, certifica-se que quando o microcontrolador está a transmitir dados, a pista DATA do Dynamixel não está ligada ao pino Rx do Arduino, e que, quando à espera de receber um pacote de instruções do servo, não está ligada ao pino Tx (Figura 4.66)

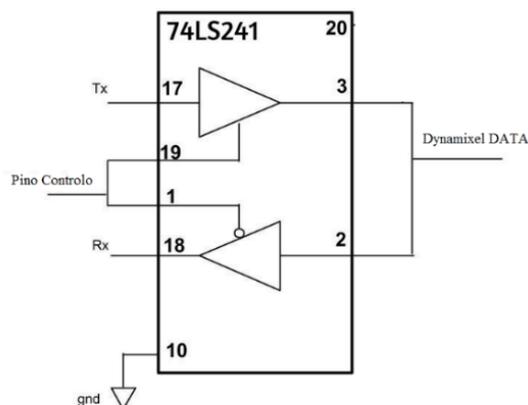


Figura 4.66 Ligações ao tri-state buffer

Quando o pino de controlo tem o nível lógico 1, a pista DATA do Dynamixel está ligada ao Tx do Arduino e o Rx está desconetado (modo Z de alta impedância). Quando o pino de controlo tem o nível lógico 0, a pista Data do Dynamixel está ligada ao Rx do Arduino e o Tx desconetado (Dynamixel envia dados ao microcontrolador). A biblioteca utilizada é disponibilizada em: [www.sourceforge.net/projects/dynamixelforarduino/files](http://www.sourceforge.net/projects/dynamixelforarduino/files)

#### 4.9.2. Calibração

Os dedos, com o elo da falange paralela à palma podem realizar a extensão com um ângulo de 70° sem tocar em qualquer outra peça. Isto permite que o dedo recolha e a palma possa servir de suporte. Para a flexão (fecho do dedo) poderá fazer um ângulo de 20° sem bater na peça que lhe serve de suporte. Para proteção do funcionamento da garra foram definidos limites de rotação de ângulo e velocidade, evitando operações fora do âmbito de operação para a qual foi projetada. Estes valores são representados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 Valores de calibração do Dynamixel Ax-12A

Limite	Peça	Propósito	Valor
Ângulo	Dedos Rotativos	Abertura~Fecho	0~210°
Ângulo	Roda dentada	Orientação dos dedos	0~90°
Ângulo	Dedo Fixo	Abertura~Fecho	0~300°
Velocidade nominal	Dedos Rotativos	Fecho até entrar em contacto com o objeto	4.5 rpm
Velocidade reduzida	Dedos Rotativos	Força de prensão	2.8 rpm
Velocidade nominal	Dedo Fixo	Fecho até entrar em contacto com o objeto	7.2 rpm
Velocidade reduzida	Dedo Fixo	Força de prensão	4.7 rpm

Consegue-se que os dedos fechem com a mesma velocidade e não excedam os ângulos máximos definidos pelo material. Todos os outros valores são deixados de fábrica.

#### Alimentação:

Como o sistema projetado consiste numa prova de conceito, a alimentação não é independente da rede elétrica ou do computador. Para os 5V do Arduino, utiliza-se a ligação do microcontrolador ao computador. Para os 12V dos motores, ligou-se um circuito *SMPS2Dynamixel* a um transformador 12V, 5A, 2.1mm.

## 5. Resultados

Os dados analisados correspondem aos valores medidos pelos sensores tácteis e de força. No âmbito do projeto, não é analisada a qualidade do aperto nem calculados os pontos de contactos ótimos. Nesta secção:

- Distingue-se no aperto as fases de prensão e fase de retenção;
- Calculam-se as forças máximas de prensão e retenção para cada um dos objetos;
- Representam-se as forças graficamente;
- Testa-se o sistema de sub-atuação com objetos de tamanhos variados;
- Testam-se apertos de precisão e potência;
- Testa-se o sensor tátil para posicionamento correto do dedo.

### 5.1. Exportação dos dados

Para analisar os dados e representá-los graficamente foi utilizado o software Matlab. O Arduino Uno tem uma porta-série (UART TTL) disponível nas portas digitais Tx (pino 0) e Rx (pino 1). Estas portas são usadas para controlo dos 4 servos, com o pino 2 a servir de controlo da direção de comunicação. Para o Arduino comunicar com o Matlab, foi empregue um conversor USB para porta-série (Figura 5.1) juntamente com a biblioteca *SoftwareSerial*. Esta biblioteca permite que se usem outras portas digitais para replicar a comunicação série por software. Os valores de interesse foram escritos para a porta criada e lidos no Matlab.



Figura 5.1 Conversor USB-porta série.

## 5.2. Programa genérico prensão

Para efeitos de teste do funcionamento da garra e leitura dos dados dos sensores foi criado um programa em C++. O programa é decomposto em 4 fases que serão apresentadas nesta secção sobre a forma de fluxograma.

Inicialização:

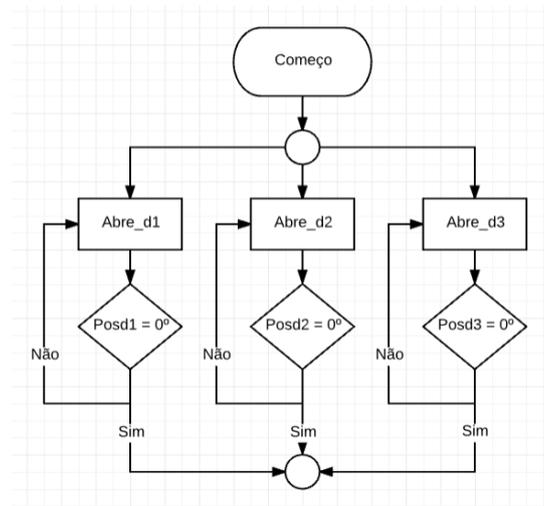


Figura 5.2 Fase inicialização.

Todos os dedos abrem (extensão) até ao máximo ângulo.

Configuração:

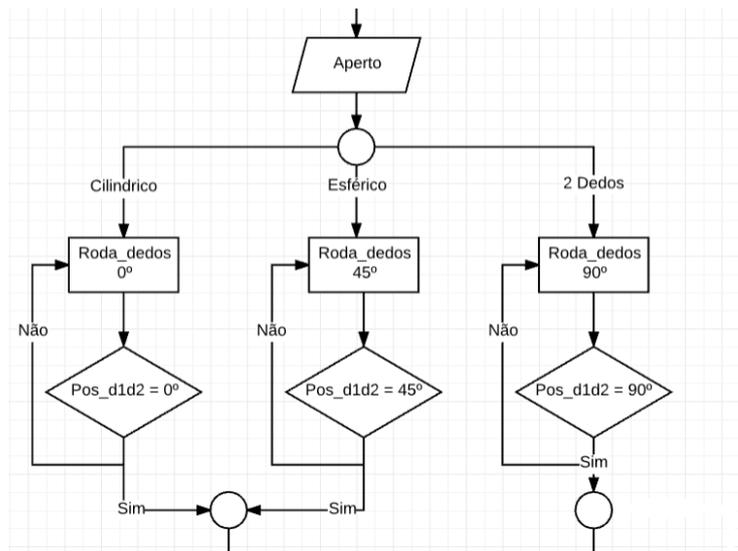


Figura 5.3 Fase configuração de aperto

Escolha da configuração do aperto através da entrada do utilizador do caracter ‘c’ para cilíndrico, ‘e’ para esférico e ‘2’ para usar apenas os dois dedos rotativos.

Preensão:

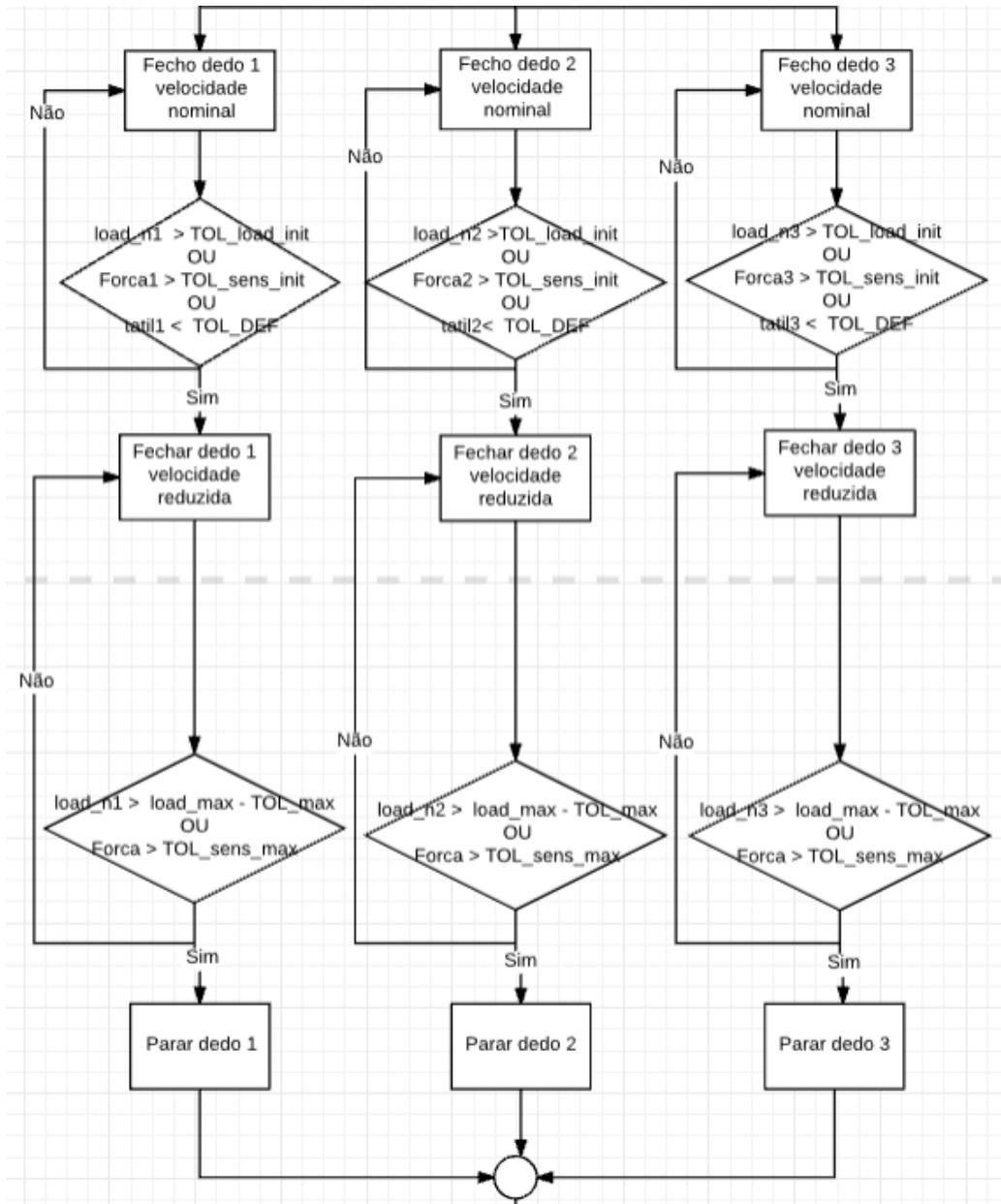


Figura 5.4 Fase de preensão

Os três dedos fecham individualmente a uma velocidade nominal até que o esforço do motor, o sensor de força ou o sensor táctil sejam superiores a um dado valor. Isto significa que esse dedo está em contacto com um objeto. Nessa altura, exerce-se uma força no objeto até atingir a força de retenção, fechando os dedos a uma velocidade reduzida. Quando a força aplicada é maior que uma tolerância definida conforme as propriedades do material com que interage, ou o esforço do motor é quase máximo, o

movimento do dedo acaba. Os 3 dedos são independentes e acionados por uma máquina de estado distinta para cada um. Se o aperto escolhido for o de dois dedos, o terceiro dedo permanece imóvel.

Verificação:

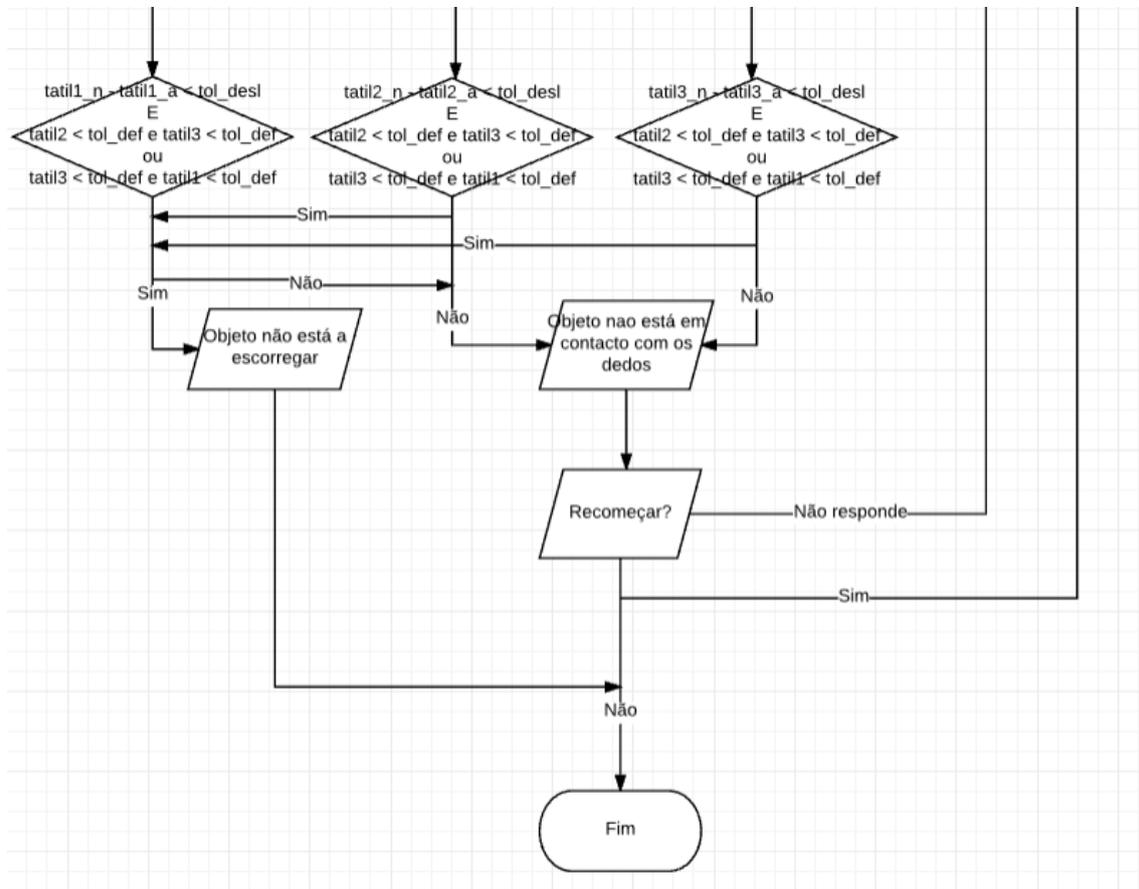


Figura 5.5 Fase de verificação do aperto

Nesta fase utilizam-se os dados dos sensores tácteis para saber se existe deslizamento do objeto por comparação do novo valor medido com o valor lido no ciclo anterior. Verifica-se também, se pelo menos duas falanges distais estão em contacto com o objeto. Se o material estiver a escorregar, e o utilizador não enviar o comando de recomeço, volta-se à fase de prensão na tentativa de aumentar a força exercida pelo dedo. Caso se pretenda recomeçar o programa, este volta à fase de inicialização. Se o objeto for manipulado com sucesso o ciclo acaba.

### 5.3. Aperto com 2 dedos:

Para o aperto com apenas 2 dedos, a orientação dos dedos rotativos foi de 90° e o objeto a apreender corresponde a um anel aberto (fita-cola) para teste da sub-atuação. As forças medidas durante o aperto são representadas na Figura 5.6.

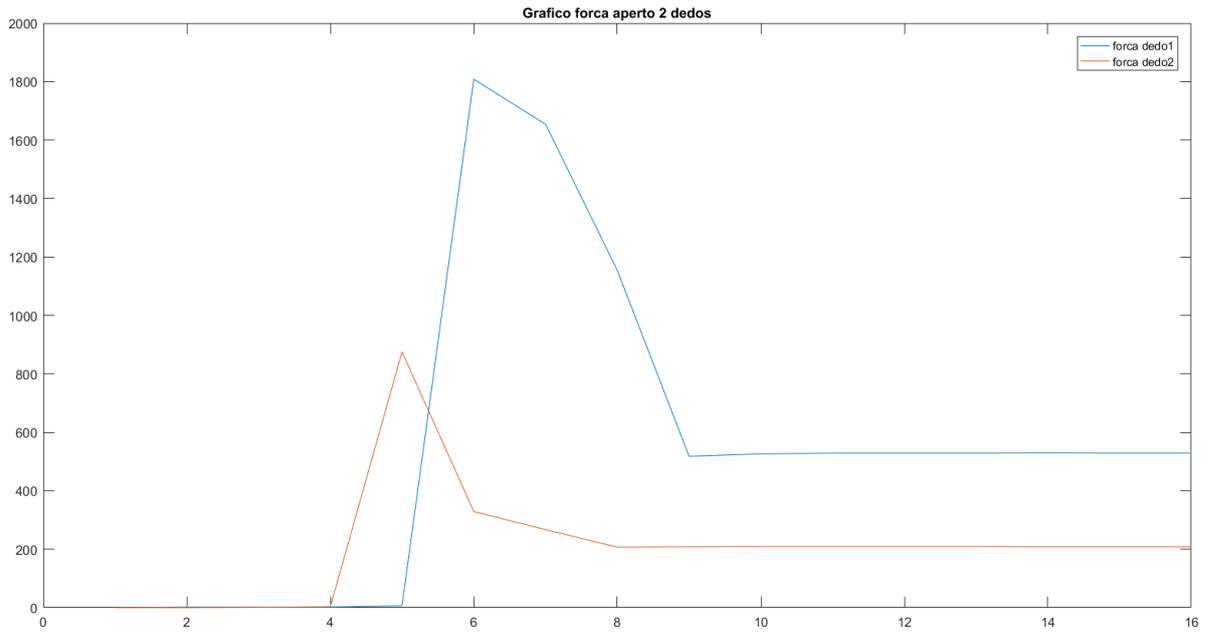


Figura 5.6 Gráfico de força aperto 2 dedos

Através do gráfico é possível distinguir a fase de prensão, em que o valor da força exercida aumenta, da fase de retenção em que a força não terá de aumentar pois o material já esta constringido. Os dados do sensor táctil são manifestados na Figura 5.7.

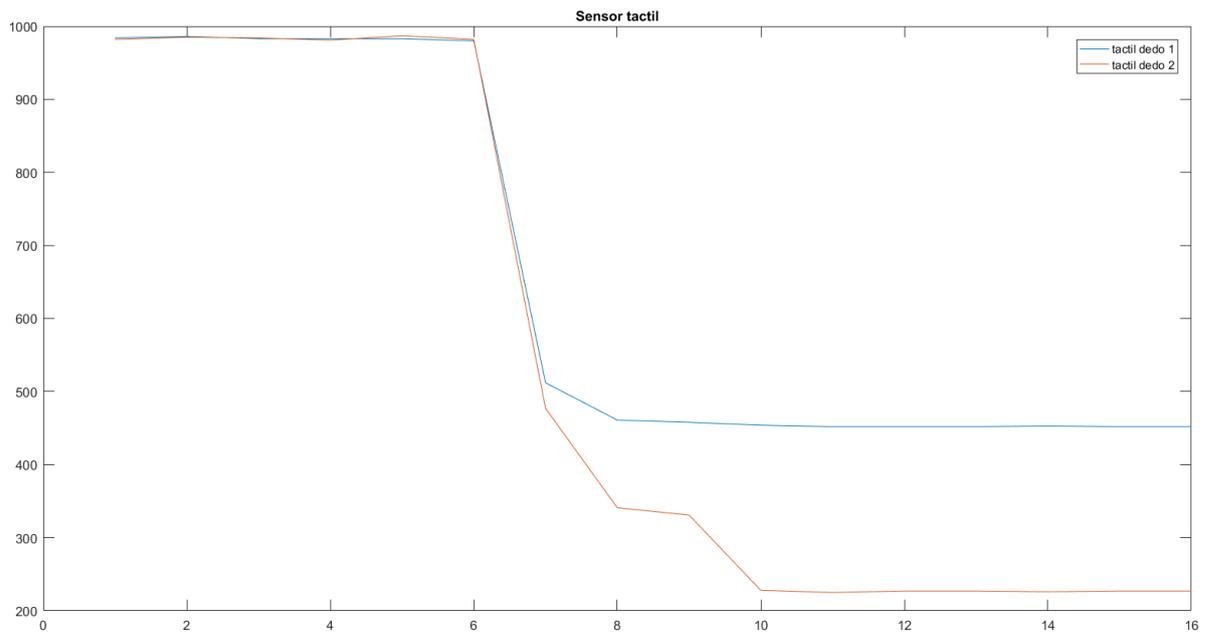
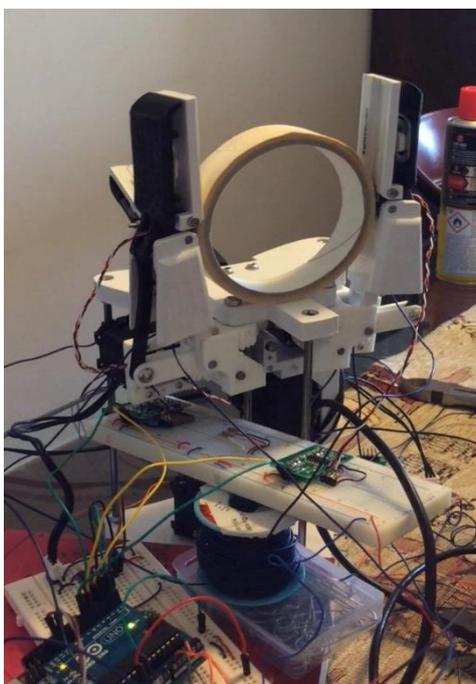


Figura 5.7 Gráfico sensor táctil aperto 2 dedos

Como o objeto não escorregou e o aperto foi seguro e completado com sucesso, os valores do sensor táctil mantêm-se fixos após a variação devido ao fecho da falange distal durante a sub-atuação. Foram tiradas fotografias ao sistema durante a prensão, retratadas por ordem temporal nas Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10.



*Figura 5.8 Fase 2 da prensão*



*Figura 5.9 Fase 3 da prensão*



*Figura 5.10 Fase 4 da prensão*

## 6. Conclusão

Após introduzir o problema, justificar a sua importância e contextualizar o tema, será exposto um sumário dos resultados obtidos, a sua relação com o problema resolvido e influência na literatura do tópico. Seguidamente, serão indicadas recomendações para futura pesquisa e apresentadas as limitações na condução deste estudo.

O estudo foi conduzido de forma a projetar uma garra capaz de manipular objetos rígidos de contorno regular com elevada destreza e servir de suporte a uma perna de um robot quadrúpede. A manipulação prevê a capacidade de efetuar diferentes configurações de aperto com integração de sensores e controlo individual de cada dedo, enquanto a locomoção é feita com os três dedos estendidos, ou abertos, posicionando-os acima da palma para não entrarem em contacto com o terreno.

A evolução das garras robóticas tem sido feita de forma a aumentar a sua versatilidade para apanhar o maior número de objetos diferentes sem troca de partes do sistema, com reatividade e controlo às forças externas e aplicadas. Simultaneamente, a locomoção baseada em pernas apresenta diversas vantagens em comparação à tração de rodas tais como: a capacidade de ultrapassar irregularidades no terreno, adaptar o andar para correção de falhas e conciliação ao meio, aptidão de se levantar em caso de queda e adaptar-se aos diferentes tipos de coeficientes de fricção do chão. Pelo que foi considerado anteriormente, é eminente que se alie a elevada capacidade de manipulação das garras estudadas, com o suporte estático da locomoção baseada em pernas para que o robot seja capaz de manipular materiais enquanto se equilibra com as restantes pernas sem incluir um manipulador extra para esse efeito, poupando custos de desenvolvimento.

Na altura da escrita da dissertação, a sub-atuação nas garras é uma área de estudo relativamente recente (1994), com o primeiro livro totalmente dedicado ao assunto (Birglen, Laliberté, & Gosselin, 2008) escrito em 2008. Espera-se que seja uma área de potencial crescimento na transferência dos mecanismos das garras industriais para mãos robóticas totalmente sub-atuadas. Existem duas vertentes que dominam o trabalho efetuado nesta área. Por um lado, existe pesquisa profundamente enraizada em princípios teóricos da mecânica da manipulação, e por outro, o projeto intuitivo de protótipos funcionais. De facto, as publicações efetuadas não caracterizam completamente o comportamento físico dos dedos devido às dificuldades teóricas

subjacentes ao processo. A sub-atuação pretende simplificar o projeto da garra e não complicar o seu estudo, efetuando-se modelagem computacional para um compromisso entre o quadro teórico e o prático. A locomoção de robots quadrúpedes é também uma área de estudo recente, e o foco é da perspectiva do controlo, cinemática e dinâmica, com as pernas destes robots de construção robusta, mas simples. No contexto atual, e segundo a pesquisa bibliográfica efetuada, não existem sistemas que exerçam simultaneamente a função de suporte e de manipulação, sendo ambas áreas de desenvolvimento a explorar no futuro próximo. Pretendeu-se, pois, com o presente estudo e apresentação do projeto colmatar esta inexistência e aprofundar mais este conceito explorando relações de interação entre estes elementos.

A escolha do número de dedos, tipo de prensão e atuação estão de acordo com os dados estudados na literatura em (Monkman, Hesse, Steinmann, & Schunk, 2007). O acoplamento dos dois dedos, que os permite efetuar uma rotação de noventa graus na palma consegue posicionar os dedos em qualquer valor neste intervalo, ou seja, a rotação não é feita em intervalos discretos. O sistema de orientação é superior à primeira garra sub-atuada MARS e semelhante à garra SARAH, sendo de construção e montagem mais simples para facilitar a transferência e impressão do projeto. Este mecanismo é atualizado em conformidade com o tipo de apertos existentes para garras de três dedos do tipo impacto. Mesmo com o sistema desligado, se o sistema for forçosamente atuado, o motor conterà a nova posição do veio aquando da ligação, conferindo “memória” ao sistema. De acordo com as métricas de desempenho exibidas no capítulo *Estado de Arte*, na secção 2.1.1 *Desempenho, avaliações e classificações*, o conjunto possui: controlo de posição para as falanges proximais e orientação dos dois dedos; controlo de binário dos dedos alterando o binário limite dos motores; diferentes configurações de aperto desde elíptico, esférico, cilíndrico ou só usando dois dedos; sensibilidade às forças de compressão na falange distal; sensibilidade ao impacto pelo aumento do esforço de carga do motor; possibilidade de localizar o toque na falange distal, a área de toque e a sua ausência. Nas tarefas funcionais, o conjunto é apropriado para manipular a peça durante o aperto e utilizar a leitura dos sensores para controlar as posições e forças dos dedos.

De acordo com o referido, o sistema apresenta contribuições interessantes na área do desenvolvimento de garras, retratando a componente inovadora de suporte. Deve-se ter em conta que foi projetado de forma a minimizar o número de peças envolvidas, facilitando a impressão e montagem, e com sensores de baixo custo favorecendo a sua distribuição e utilização por terceiros. Espera-se que seja utilizada como plataforma de investigação, ao ser distribuída abertamente para que se possam efetuar alterações de acordo com os objetivos individuais em vista, na área da manipulação e/ou locomoção.

O projeto foi de natureza interdisciplinar, composto pelas vertentes de eletrónica, mecânica e computação, em que a componente mecânica exigiu um maior aprofundamento por forma a desenhar o produto com as características necessárias. Houve a necessidade de dominar o desenho CAD, bem como a terminologia técnica e cálculos, especialmente no que respeita a engrenagens.

## Trabalho futuro

As engrenagens beneficiariam em ser metálicas para evitar o desgaste e garantir uma maior robustez. Ainda, o que impede que os dedos abram sob o efeito de carga é o binário dos motores, que é suficiente para as aplicações testadas, mas seria proveitoso colocar motores com maior binário, como os Rx-64, Mx-64, Mx-106 ou Ex-106+. No futuro, poder-se-ia otimizar o projeto dos dedos para incluir 3 falanges, com uma mola entre a falange intermédia e a distal. O conjunto ainda não é independente da rede elétrica nem portátil, podendo-se utilizar uma bateria e reguladores de tensão comutados para alimentar a placa de desenvolvimento Arduino Uno e os servos Dynamixel.

Um dos aspetos a melhorar é o desenvolvimento de matrizes de sensores tácteis de alta resolução e integração, capazes de medir forças de cisalhamento, normais, temperatura e vibração. A capacidade de manipulação ainda não está normalizada, pois não se definem testes precisos para a quantificar. Contudo, existem métricas de qualidade definidas de acordo com o quadro teórico da mecânica para apertos, que todavia também variam na literatura.

Foram acompanhadas de forma sistemática e consistente as publicações feitas nestas temáticas, e por isso, recomenda-se: o estudo da manipulação da garra para objetos de forma geométrica complexa; a geração e validação de apertos e pontos de contacto para materiais de forma irregular; algoritmos de controlo para tarefas que exijam deteção da posição do objeto e/ou doseamento dinâmico da força; manuseamento do objeto recorrendo ao ambiente físico durante a preensão; teste da estabilidade de suporte em diferentes terrenos; implementação como suporte de uma perna e manipulação de artigos em estabilidade estática ou andamento.

# 7. Glossário

## 7.1. Terminologia células carga

Nesta secção são explicadas as especificações técnicas das células de carga que podem ser consultadas nas *datasheets* dos vários modelos.

**Capacidade:** força máxima que poderá ser medida no sensor dentro dos limites das suas especificações técnicas.

**Sensibilidade:** diferença algébrica entre o sinal de saída do sensor em capacidade máxima e sem carga aplicada.

**Não Linearidade:** diferença algébrica entre o sinal de saída do sensor a uma dada carga e o ponto correspondente se fosse traçada uma reta entre a capacidade mínima e capacidade máxima do sensor. Se o sensor fosse perfeitamente linear, uma simples calibração de dois pontos seria suficiente para descrever o seu comportamento com outras cargas.

**Histerese:** diferença algébrica entre o sinal de saída do sensor a uma dada carga, medido a partir de um peso superior (sentido descendente), e a mesma carga medida a partir de um peso inferior (sentido ascendente).

**Repetibilidade:** a diferença algébrica máxima do sinal de saída do sensor para cargas iguais, quando medida nas mesmas condições.

**Fluência (*Creep*):** a variação na saída do sensor a cada trinta minutos com carga constante e condições ambientais estáticas. Deve-se à variação da deformação ao longo do tempo após aplicação de uma carga.

**Desvio zero:** sinal de saída do sensor quando não lhe é aplicada nenhuma carga. Deve ser feita uma calibração individual para cada sensor (tarar).

**Resistência Entrada:** resistência medida nos terminais de alimentação do circuito, quando este não tem carga aplicada e os terminais de saída (sinal) estão em circuito aberto. Está diretamente relacionada com a potência consumida pela célula de carga.

**Resistência Saída:** resistência medida nos terminais de saída (sinal) com o sensor sem carga aplicada e os terminais de alimentação em circuito aberto. Os resultados medidos pela ponte não serão exatos se o valor da impedância de saída for alto.

**Resistência Isolamento:** a resistência medida entre a estrutura metálica da célula de carga e o circuito em ponte.

**Carga Limite Segurança:** carga máxima que pode ser aplicada sem perda de funcionalidade do sensor dentro das especificações técnicas para as quais foi projetado.

**Sobrecarga de Rotura:** carga máxima que se ultrapassada resultará na perda de funcionalidade do sensor (falha estrutural).

## 7.2. Nomenclatura engrenagens

Será apresentada a nomenclatura de rodas dentadas cilíndricas de acordo com a norma ISO 1122-1:1998.

### 7.2.1. Eixos de rotação

As rodas dentadas podem-se classificar segundo a posição relativa dos seus eixos de rotação. As rodas dentadas dizem-se:

1. **Paralelas:** se os eixos de rotação da engrenagem são paralelos.

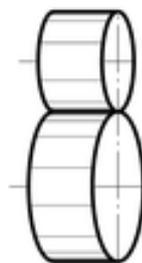


Figura 7.1 Rodas dentadas eixo paralelo (retirado de <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:5649:en>)

2. **Cónicas:** se os eixos de rotação da engrenagem interseccionam-se.

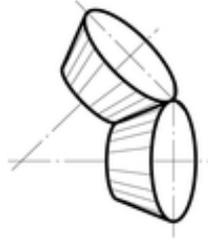


Figura 7.2 Rodas dentadas cónicas (retirado de <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:5649:en> )

3. **Eixos cruzados:** se os eixos de rotação da engrenagem forem oblíquos e não se intersectarem.



Figura 7.3 Roda dentada eixos cruzados (retirado de <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:5649:en> )

### 7.2.2. Engrenagens

**Pinhão:** designação dada à roda dentada com menos dentes do par.

**Roda conjugada do pinhão:** designação dada à roda dentada com maior número de dentes do par.

**Roda motora:** roda dentada da engrenagem responsável pela atuação do par. Usualmente ligada a um motor concêntrico ao seu eixo de atuação.

**Roda movida:** roda dentada da engrenagem movida por ação de outra.

**Roda dentada livre da cadeia:** roda dentada da engrenagem que é atuada por outra roda da cadeia e por sua vez engrenada noutra roda da engrenagem.

**Segmento roda dentada:** roda dentada cujos dentes não completam uma revolução completa de 360°.

## 7.3. Movimentos

Segundo a norma ISO 14539:2000 *Manipulating Industrial Robots – Object Handling with grasp-type grippers – Vocabulary and presentation of characteristics* definem-se dois tipos de movimentos:

### 7.3.1. Rotativos

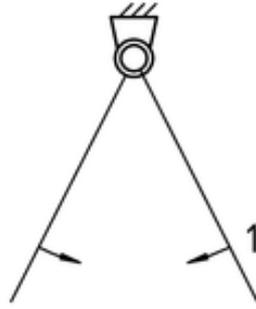


Figura 7.4 Movimento rotativo da garra (retirado de <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:24062:en> )

### 7.3.2. Translação

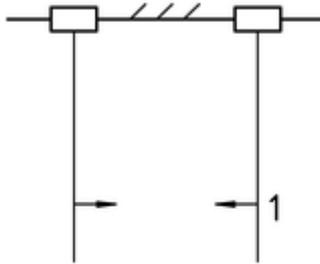


Figura 7.5 Movimento translação garra (retirado de <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:24062:en> )

## 7.4. Terminologia Apertos

**Aperto central:** a posição e orientação da garra são controladas para que o aperto se dê na zona central da garra.

**Aperto não-central:** neste tipo de aperto não é necessário que a garra se posicione de forma a centrar o objeto no eixo central da palma.

**Aperto adaptativo:** permitem uma maior flexibilidade ao sistema ao admitir que a garra se adapte à forma dos objetos que irá manipular (cilíndrico, retangular, etc). Deste modo, não é necessária a troca de partes da garra para interagir com diferentes objetos.

**Aperto simétrico:** os mecanismos de transmissão de força fazem com que o movimento dos dedos seja simétrico durante o aperto.

**Aperto assimétrico:** o movimento dos dedos da garra não necessita de ser simétrico, permitem uma maior flexibilidade.

**Aperto de força:** para impedir potenciais movimentos do objeto o conjunto de contactos estabelecido pela garra integra quer o movimento dos dedos, quer o contacto com a palma.

**Aperto planar:** todas as forças que atuam no objeto situam-se no mesmo plano.

**Aperto espacial:** as forças de contacto localizam-se em planos diferentes.

**Aperto palma:** a componente de peso do objeto aponta para a palma ou base da garra.

A classificação segundo (Neumann, 2002) categoriza os tipos de apertos, de acordo com a forma do objeto, como exposto no Quadro 7.1.

*Quadro 7.1 Nomenclatura de apertos de acordo com a forma do objeto a apreender (Neumann, 2002)*

Tipo aperto	Forma objeto	Exemplo
<b>Cilíndrico</b>	Cilíndrica	Segurar um taco de golfe
<b>Esférico</b>	Esférica	Segurar uma bola
<b>Gancho</b>	Arco	Segurar uma mala
<b>Cónico</b>	Cónica	Segurar uma faca

Expõem-se graficamente os tipos de apertos previamente anunciados na Figura 7.6.



*Figura 7.6 Apertos cilíndricos, esféricos e de gancho na mão humana (retirada de <https://dynamicprinciples.wordpress.com/tag/grip-strength/>)*

Igualmente, a categorização de acordo com o objetivo da tarefa é expressa pelo Quadro 7.2.

*Quadro 7.2 Nomenclatura aperto de acordo com o propósito (Neumann, 2002)*

Tipo aperto	Propósito	Exemplo
<b>Potência</b>	Força	Segurar um martelo
<b>Talas</b>	Precisão	Utilizar uma pipeta
<b>Gancho</b>	Esforços prolongados	Segurar uma mala

Expõem-se graficamente os tipos de apertos previamente anunciados na Figura 7.7.



*Figura 7.7 Exemplo apertos de precisão e potência mão humana (Encyclopedia Britannica, 2010)*

Os apertos de talas, ou precisão, correspondem ao uso do polegar em oposição ao indicador ou às falanges distais dos dedos. Estes apertos têm apenas 25% da força de um aperto de potência. Deve-se escolher o tipo de aperto específico para cada tarefa, existindo vários trabalhos desenvolvidos na escolha da configuração do aperto (Cutkosky & Howe, 1990; Hugo, 2013; Iberall, 1987; León et al., 2014; Orlando et al., 2013; Roa & Suárez, 2014). A garra projetada é capaz de realizar apertos de potência com os três dedos, esféricos e cilíndricos, e de precisão, utilizando dois ou três dedos, conforme a exigência da tarefa.

# Referências

- Baxter, D., Gao, J., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S., & Dani, S. (2007). An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling. *Research in Engineering Design*, 18(1), 37–48. <http://doi.org/10.1007/s00163-007-0028-8>
- Birglen, L., & Gosselin, C. M. (2004). Kinetostatic analysis of underactuated fingers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(2), 211–221. <http://doi.org/10.1109/TRA.2004.824641>
- Birglen, L., Laliberté, T., & Gosselin, C. (2008). *Underactuated Robotic Hands*. Springer Tracts in Advanced Robotics (Vol. 40). <http://doi.org/10.1007/978-3-540-77459-4>
- Chavan-Dafle, N., & Rodriguez, A. (2015). Prehensile pushing: In-hand manipulation with push-primitives. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Vol. 2015-Decem, pp. 6215–6222). <http://doi.org/10.1109/IROS.2015.7354264>
- Cutkosky, M. R., & Howe, R. D. (1990). Human Grasp Choice and Robotic Grasp Analysis. *Dextrous Robot Hands*, 1, 5–31. [http://doi.org/10.1007/978-1-4613-8974-3\\_1](http://doi.org/10.1007/978-1-4613-8974-3_1)
- Dario, P., Carrozza, M. C., Guglielmelli, E., Laschi, C., Menciassi, A., Micera, S., & Vecchi, F. (2005). Robotics as a future and emerging technology: Biomimetics, cybernetics, and neuro-robotics in European projects. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(2), 29–45. <http://doi.org/10.1109/MRA.2005.1458320>
- De Santos, P. G., Garcia, E., & Estremera, J. (2006). *Quadrupedal locomotion: An introduction to the control of four-legged robots*. *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. <http://doi.org/10.1007/1-84628-307-8>
- Encyclopedia Britannica. (2010). Britannica Online Encyclopedia. *Encyclopædia Britannica*, 1–73. Retrieved from <http://www.britannica.com/>
- Gonyea, W., & Ashworth, R. (1975). The form and function of retractile claws in the Felidae and other representative carnivorans. *Journal of Morphology*, 145, 229–238.

<http://doi.org/10.1002/jmor.1051450208>

- Hoffmann, K. (1989). An Introduction to Measurements using Strain Gages. *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, 273.
- Hughes., A. (2006). Electric motors and drives fundamentals, types and applications. In *Electric motors and drives fundamentals, types and applications* (p. 410). <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-098332-5.00001-2>
- Hugo, P. O. (2013). Grasping in Robotics. *Handbook of Robotic Grasp*, 10, 107–131. <http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4664-3>
- Iberall, T. (1987). The nature of human prehension: Three dextrous hands in one. *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 396–401. <http://doi.org/10.1109/ROBOT.1987.1087813>
- Kyberd, P. J. (2011). The influence of control format and hand design in single axis myoelectric hands: assessment of functionality of prosthetic hands using the Southampton Hand Assessment Procedure. *Prosthetics and Orthotics International*, 35(3), 285–293. <http://doi.org/10.1177/0309364611418554>
- Lenarčič, J., Bajd, T., & Stanišić, M. M. (2013). Robot Mechanisms (pp. 291–311). Dordrecht: Springer Netherlands. [http://doi.org/10.1007/978-94-007-4522-3\\_9](http://doi.org/10.1007/978-94-007-4522-3_9)
- León, B., Morales, A., & Sancho-Bru, J. (2014). From robot to human grasping simulation. *Cognitive Systems Monographs*, 19. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-01833-1>
- Marco, H., & Andreas, L. (2015). Universal Gripper for Legged Robots. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Martinez-Hernandez, U. (2016). Scholarpedia of Touch. In T. Prescott, E. Ahissar, & E. Izhikevich (Eds.) (pp. 783–796). Paris: Atlantis Press. [http://doi.org/10.2991/978-94-6239-133-8\\_57](http://doi.org/10.2991/978-94-6239-133-8_57)
- Mattar, E. (2013). A survey of bio-inspired robotics hands implementation: New directions in dexterous manipulation. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(5), 517–544. <http://doi.org/10.1016/j.robot.2012.12.005>
- Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2007). *Robot Grippers. Robot Grippers*. <http://doi.org/10.1002/9783527610280>
- Morecki, A., & Knapczyk, J. (1999). Basics of Robotics: Theory and Components of Manipulators and Robots. In A. Morecki & J. Knapczyk (Eds.) (pp. 223–274). Vienna: Springer Vienna. [http://doi.org/10.1007/978-3-7091-2532-8\\_9](http://doi.org/10.1007/978-3-7091-2532-8_9)
- Myszka, D. H. (2011). *Machines & Mechanisms: Applied Kinematic Analysis*. Pearson Education. Retrieved from <https://books.google.pt/books?id=AccuAAAAQBAJ>
- Neumann, D. A. (2002). Kinesiology of the musculoskeletal system.

- Nishimura, H., Kakogawa, A., & Ma, S. (2012). Development of an underactuated robot gripper capable of retracting motion. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012 - Conference Digest*, 2161–2166. <http://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491289>
- Orlando, M. F., Dutta, A., Saxena, A., Behera, L., Tamei, T., & Shibata, T. (2013). Manipulability analysis of human thumb, index and middle fingers in cooperative 3D rotational movements of a small object. *Robotica*, *31*(05), 797–809. <http://doi.org/10.1017/S0263574713000064>
- Roa, M. A., & Suárez, R. (2014). Grasp quality measures: review and performance. *Autonomous Robots*, *38*(1), 65–88. <http://doi.org/10.1007/s10514-014-9402-3>
- Rovetta, A., & Tanie, K. (1988). GraspingInNatureAndRobotics.pdf. IEEE. <http://doi.org/10.1109/IROS.1988.592400>
- Shi, L., Habib, M. K., Xiao, N., & Hu, H. (2015). Biologically Inspired Robotics. *Journal of Robotics*, *2015*. <http://doi.org/10.1155/2015/894394>
- Sinha, P. R., & Bajcsy, R. (1991). Active Exploration of Surfaces for Legged Locomotion of Robots. In *International Symposium on Intelligent Robotics* (p. 15).
- Telegenov, K., Tlegenov, Y., & Shintemirov, A. (2015). A low-cost open-source 3-D-printed three-finger gripper platform for research and educational purposes. *IEEE Access*, *3*, 638–647. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2433937>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Product Design and Development*. *Product Design and Development* (Vol. 384). <http://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8985-4.00002-4>
- Vallbo, a B., & Johansson, R. S. (1984). Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology*, *3*(1), 3–14.
- van Vliet, H., & Tang, A. (2008). Software Architecture Knowledge Management. *Software Engineering, 2008. ASWEC 2008. 19th Australian Conference on*, 24–31. <http://doi.org/10.1109/ASWEC.2008.4483186>