



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Sensor Anticolisão Robótico

Mestrado em Projeto e Produção Mecânica
Engenharia Mecânica

Bruno Manuel Trindade Catarino

Mestrado em Engenharia Mecânica

Abrantes, novembro de 2022



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Bruno Manuel Trindade Catarino

Sensor de Anticolisão Robótico

Relatório de Projeto Final

Orientado por:

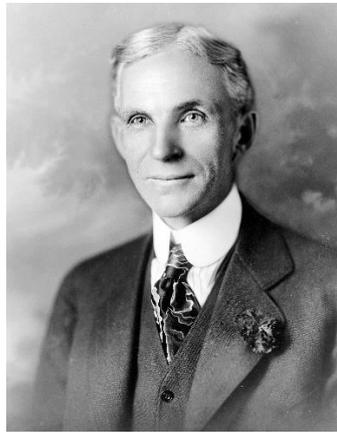
Professor Adjunto Bruno Chaparro – Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Relatório de Projeto Final apresentado à Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, do Instituto Politécnico de Tomar para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica



“There is one rule for the industrialist and that is: make the best quality goods possible at the lowest cost possible, paying the highest wages possible”...

[“Existe uma regra para a indústria que é: fazer os produtos com a melhor qualidade possível com o menor custo possível, pagando os salários mais altos possíveis” ...]



Henry Ford – Empreendedor e engenheiro mecânico fundador da *Ford Motor Company*.



Esta página foi deixada intencionalmente em branco.



Resumo / palavras-chave

O presente relatório surge no âmbito da unidade curricular de Projeto do curso de Mestrado em Projeto e Produção Mecânica, da Escola Superior de Tecnologia de Abrantes (ESTA), pertencente ao Instituto Politécnico de Tomar (IPT) e pretende evidenciar um relatório técnico, relativo a um projeto desenvolvido pelo discente no âmbito do sensor de anticolisão robótico, bem como os estudos desenvolvidos nos últimos 20 anos, sobre o tema em questão.

Ao longo deste trabalho irá ser descrito a evolução dos sistemas robóticos em termos de sensores e mecanismos de segurança quando sujeitos a um esforço excessivo. Os sensores são dos componentes mais usados em sistemas robóticos e no mundo da engenharia em geral, estes permitem prever, antecipar e precaver falhas ao segundo. No caso dos sensores de colisão, conseguem de um modo exato e preciso, afinar o esforço máximo ou mínimo que um robô ou braço robótico irá fazer num determinado movimento, bem como pará-lo de forma imediata, precavendo assim acontecimentos indesejados. Esta calibração de esforço pode ser afinada manualmente ou de um modo automático, consoante o tipo de sensor em uso.

A investigação efetuada é baseada em livros credíveis e artigos científicos conceituados, em que os autores são responsáveis por variados estudos dentro do tema em ênfase. Após uma observação de vários artigos destes autores é possível constatar que é quase impossível falar de robótica sem falar de automação. Estes dois campos interagem entre eles permitindo que se complementem um ao outro, de modo a criar sistemas que satisfaçam as necessidades do mundo tecnológico.

De modo a colmatar a investigação, foi desenvolvido um projeto de um sensor anticolisão robótico, onde o objetivo principal é criar uma ferramenta inovadora, precisa, exata e económica, face às ferramentas já disponíveis no mercado.

Palavras-chave: sistemas de colisão robóticos; braço robótico; sensores de colisão; automação; robótica.



Abstract / keywords

This report is part of the Project curricular unit of the Master in Mechanical Design and Production, of the Abrantes Superior School of Technology (ESTA), belonging to the Polytechnic Institute of Tomar (IPT) and intends to show a technical report, related to a project developed by the student in the robotic collision avoidance sensor, as well as the studies developed in the last 20 years, on the subject in question.

Throughout this work we will describe the evolution of robotic systems in terms of sensors and safety mechanisms when subjected to excessive effort. Sensors are one of the most used components in robotic systems and in the engineering world in general. In the case of collision sensors, they can precisely and precisely fine-tune the maximum or minimum effort that a robot or robotic arm will make in a given movement, as well as stop it immediately, thus preventing unwanted events. This effort calibration can be adjusted manually or automatically, depending on the type of sensor in use.

The research carried out is based on credible books and reputable scientific articles, in which the authors are responsible for various studies within the topic under emphasis. After observing several articles by these authors it is possible to see that it is almost impossible to talk about robotics without talking about automation. These two fields interact with each other allowing them to complement each other in order to create systems that meet the needs of the technological world.

In order to fulfil the research, a project of a robotic anti-collision sensor was developed, where the main goal is to create an innovative, precise, accurate and economic tool, compared to the tools already available on the market.

Keywords: *robotic collision systems; robotic arm; collision sensors; automation; robotics.*



Agradecimentos

Expresso aqui os meus agradecimentos a todas as pessoas que me ajudaram ao longo do projeto final, contribuindo para o sucesso do mesmo. Deste modo, começo por agradecer a todos os colaboradores da Escola Superior de Tecnologia de Abrantes., que, de algum modo, contribuíram para o sucesso deste projeto.

Ao Professor Adjunto Bruno Chaparro, do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, por aceitar ser o meu orientador de projeto e por toda a disponibilidade e apoio prestado no decorrer do mesmo.

A todos os meus colegas, de curso e amigos, por me terem acompanhado durante este percurso de 3 anos, pelos incentivos e pelo apoio que me deram, pela cooperação e camaradagem. Foram uma grande ajuda para levar o curso a bom porto, mesmo nas alturas em que a motivação não era tanta.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para o sucesso deste projeto que não foram mencionadas anteriormente.

Por fim, quero agradecer especialmente à minha família que sempre me apoiou ao longo do percurso, e sempre me deu a força necessária para continuar em frente.



Índice

Resumo / palavras-chave	v
Abstract / keywords	vi
Agradecimentos	vii
Índice	viii
Índice de ilustração de figuras	x
Índice de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas e siglas	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e objetivos.....	1
1.2. Organização do relatório.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Evolução dos robôs	5
2.2. Indústria 4.0 na robótica	7
2.2.1. Indústria 4.0 em Portugal	8
2.2.2. A importância da robótica na Indústria 4.0	8
2.3. Dados Estatísticos Gerais.....	9
2.3.1. Continente Europeu	10
2.4. Constituição base de um robô	11
2.5. Cinemática de Robôs	13
2.5.1. Movimentação dos robôs.....	14
2.5.2. Cinemática Direta e Inversa	16
2.6. Notação de Denavit-Hartenberg	22
2.7. Robôs Colaborativos.....	24
2.7.1. Segurança.....	25



2.7.2.	Avaliação de risco de <i>Cobots</i>	26
2.8.	Sensores robóticos	28
2.8.1.	Sensores táteis	29
2.8.2.	Sensores de proximidade e alcance	30
2.8.3.	Sensores diversos e sistemas baseados em sensores	30
3.	Desenvolvimento de sensor anticolisão robótico	31
3.1.	Planeamento	34
3.1.1.	Missão e objetivos do projeto	34
3.1.2.	Restrições no projeto	35
3.2.	Desenvolvimento do produto	41
3.2.1.	Análise da competitividade	41
3.2.2.	Design de produto	48
3.3.	Análise funcional	67
4.	Conclusão	74
	Recomendações	76
	Referências bibliográficas e webgráficas	77
	Anexos A	80



Índice de ilustração de figuras

Figura 1 – Número de artigos científicos de jornais presente na base de dados do site "Science Direct", entre Janeiro de 2000 e Janeiro de 2022 (data de pesquisa: 01/2022)	1
Figura 2 – Primeiro Robô Industrial [14]	5
Figura 3 – Pilares da indústria 4.0	8
Figura 4 – Mercado mundial para robôs industriais (2003-2015) [20]	9
Figura 5 – Instalações anuais robôs industriais 2015-2020 e 2021*-2024* [20].	10
Figura 6 – Instalação anual de robôs industriais [20]	11
Figura 7 – Mecanismo de 1-DOF [4]	14
Figura 8 – Junta do tipo L [23]	15
Figura 9 – Junta do tipo R [23]	15
Figura 10 – Junta do tipo T [23]	15
Figura 11 – Junta do tipo V [23]	16
Figura 12 – 3 Graus de liberdade [23]	16
Figura 13 – Posição das juntas de um robô com 2 graus de liberdade	17
Figura 14 – Manipulador de 2 graus de liberdade	18
Figura 15 – Manipulador de 3 graus de liberdade	20
Figura 16 – Manipulador de 4 graus de liberdade	21
Figura 17 – Parâmetros cinemáticos do manipulador	23
Figura 18 – Robôs industriais vs. Robôs colaborativos [20]	25
Figura 19 – Sistema desenvolvido por Sebastian Blankemeyer et al. [31]	28
Figura 20 – 7 fases elementares no evento de colisão [32]	29
Figura 21 – Fases do projeto	32
Figura 22 – Robô KUKA KR 6 R1820	36
Figura 23 – Espaço de trabalho do KUKA KR 6 R1820	37
Figura 24 – Controlador KR C4 smallsize-2	38
Figura 25 – Diâmetro da flange do KUKA KR 6 R1820	39
Figura 26 – Gráfico distância vs. peso	39
Figura 27 – Curva típica de custos e pessoal [33]	40
Figura 28 – Sensor OnRobot [34]	42
Figura 29 – Especificações do sensor HEX-E QC e HEX-H QC [34]	42
Figura 30 – Gráfico Força vs. Comprimento HEX-E e HEX-H [34]	43



Figura 31 – Design do sensor HEX-E e HEX-H [34]	43
Figura 32 – Sensor de torque Robotiq [35]	44
Figura 33 – Peças constituintes do sensor de torque Robotiq [35].....	45
Figura 34 – Flange sensor Robotiq [35]	45
Figura 35 – Sensor de anticollisão ATI [35]	46
Figura 36 – Funcionamento sensor ATI [35]	47
Figura 37 – Primeiro esboço bidimensional	49
Figura 38 – Funcionamento do primeiro esboço	50
Figura 39 – Segundo esboço bidimensional	50
Figura 40 – Funcionamento do segundo esboço	51
Figura 41 – Visão geral do projeto	53
Figura 42 – Dimensões gerais do sensor	53
Figura 43 – Vista explodida do sensor	54
Figura 44 – Corpo do sensor.....	56
Figura 45 – Mecanismo do sensor	56
Figura 46 – Zoom do mecanismo	57
Figura 47 – Contacto do pino com as esferas	57
Figura 48 – Sistema com prato superior das esferas	58
Figura 49 – Prato superior das esferas.....	59
Figura 50 – Condução elétrica pelas esferas	59
Figura 51 – Flange de acoplamento inferior.....	60
Figura 52 – Prato suporte de molas	60
Figura 53 – Prato suporte de molas superior	61
Figura 54 – Funcionamento do perno de ajuste.....	62
Figura 55 – Carga axial e angular.....	63
Figura 56 – Carga rotacional	63
Figura 57 – Anet A8	69
Figura 58 – Impressão 3D prato das molas e embolo.....	69
Figura 59 – Impressão 3D base inferior, base inferior/superior esferas.....	70
Figura 60 – Sistema conjugado do embolo 1	71
Figura 61 – Sistema conjugado do embolo 2	71
Figura 62 – Corpo sensor e flange.....	72



Figura 63 – Ensaio sensor.....	72
Figura 64 – Sensor anticolisão robótico aplicado no robô KUKA KR 6 R1820	76
Figura A 1 – Vista geral Sensor anticolisão	80
Figura A 2 – Vista explodida.....	80
Figura A 3 – 2D Detalhe do mecanismo do sensor	80
Figura A 4 – 2D Corpo do sensor.....	80
Figura A 5 – 2D Base Inferior	81
Figura A 6 – 2D Base inferior das esferas.....	81
Figura A 7 – 2D Base superior das esferas.....	81
Figura A 8 – 2D Pino 6 mm	81
Figura A 9 – 2D Embolo	81
Figura A 10 – 2D Cabeça do embolo	81
Figura A 11 – 2D Prato suporte molas	81
Figura A 12 – 2D Flange superior	82
Figura A 13 – 2D Flange inferior	82
Figura A 14 – 2D Perno M10	82



Índice de tabelas

Tabela 1 – Lista de componentes do sensor	55
Tabela 2 – Tipos de extremidade de molas	64
Tabela 3 – Características das molas	65
Tabela 4 – Resultados da constante das molas	65
Tabela 5 – Características mecânicas dos materiais	66
Tabela 6 – Peso dos componentes do sensor	67



Lista de abreviaturas e siglas

HRC – *Human-robot collaboration;*

NC – *Numerical control;*

DOF – *Degrees of freedom;*

CAD – *Computer aided design;*

CAM – *Computer aided manufacturing;*

PLA – *Polylactic acid;*

ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene;*

PETG – *Polyethylene terephthalate glycol;*

gdm – Graus de liberdade.

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos

Os robôs colaborativos têm atraído cada vez mais atenção nos últimos anos, devido à sua elevada flexibilidade e versatilidade. As interações físicas, incluindo colisões entre os robôs e os humanos, são inevitáveis. Os sistemas mais comuns para evitar esta colisão são sensores óticos, câmeras, sensores de pressão e sensores de torque/força [1]. Os robôs e manipuladores robóticos foram originalmente desenvolvidos para complementar ou substituir os humanos, fazendo trabalhos fastidiosos, repetitivos, sujos, desumanizantes ou perigosos.

Foi efetuado um estudo sobre a evolução científica dos sensores de colisão robóticos (Figura 1). É perceptível que ao longo dos anos tem havido uma incidência crescente nesta área de estudo, no entanto, é um tema pouco explorado até à atualidade.

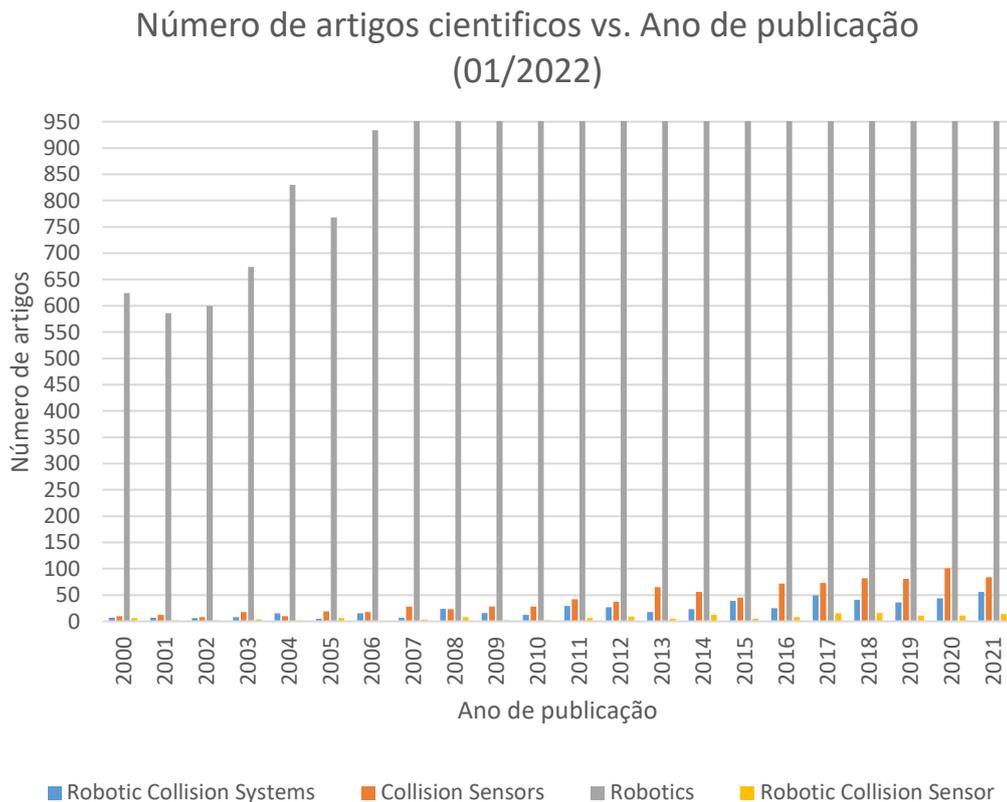


Figura 1 – Número de artigos científicos de jornais presente na base de dados do site "Science Direct", entre Janeiro de 2000 e Janeiro de 2022 (data de pesquisa: 01/2022)



Um dos objetivos do presente trabalho é efetuar um estado de arte sobre sensores de anticolisão robóticos, de modo a perceber a influência dele nos sistemas robóticos, a sua utilidade, bem como compreender o princípio de funcionamento e comparar o projeto delineado na Tese de Mestrado, com estudos já existentes.

Segundo a ISO 8373:2012 [2], um robô é um "mecanismo acionável programável em dois ou mais eixos com um grau de autonomia, movendo-se dentro do seu ambiente, para realizar tarefas previstas". Esta mesma norma define ainda o termo "robô industrial" como "um manipulador multiusos programável, reprogramável e automaticamente controlado em três ou mais eixos, que pode ser fixado no lugar ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial".

A utilização do robô industrial, que foi identificado como um dispositivo único nos anos 60 [3], juntamente com os sistemas de concepção assistida por computador (CAD) e de fabrico assistido por computador (CAM), caracterizam as tendências mais recentes na automatização do processo de fabrico. Uma das principais razões para o crescimento na utilização de robôs industriais é a redução dos custos. Durante os anos 90, os preços dos robôs diminuíram ao mesmo tempo que os custos do trabalho humano aumentavam. Além disso, os robôs não só estão a tornar-se mais baratos, como também mais eficazes, mais rápidos, mais precisos e mais flexíveis. Se tivermos em conta estes ajustes de qualidade nos números, o custo da utilização de robôs está a cair muito mais rapidamente do que o seu custo unitário [4]. Para além da economia, à medida que os robôs se tornam mais apropriados, serão capazes de realizar cada vez mais tarefas que seriam perigosas ou impossíveis de serem realizadas pelos trabalhadores humanos [5].

Os robôs colaborativos tornaram-se populares no local de trabalho, uma vez que permitem a colaboração de trabalhadores humanos e robôs. No entanto, a integração dos dois elementos diferentes provou ser uma tarefa complicada, nomeadamente em termos de segurança. Em primeiro lugar, os robôs colaborativos devem ter uma unidade inata para criar ou alterar dinamicamente os padrões de trabalho com partes conscientes do ser humano, de modo a colmatar as necessidades complementares dos diferentes operadores. Em segundo lugar, devem dispor de estruturas funcionais que possam criar e reconfigurar rapidamente. O levantamento bibliográfico deu a observação de que as experiências foram levadas a cabo [6].



A capacidade de manter níveis elevados de qualidade de produção em massa e produtividade com robôs colaborativos é inevitável. No entanto, estes robôs são programados para executar uma tarefa específica, isto cria sérios problemas quando sujeitos a esforços excessivos ou movimentos não planeados. Estes esforços excessivos podem danificar tanto humanos, como ferramentas de trabalho. Por conseguinte, os algoritmos habituais de deteção de colisões são baseados no modelo dinâmico do robô que sofre frequentemente de atritos complexos nas articulações. A incerteza destes atritos pode levar a uma baixa sensibilidade do algoritmo de deteção de colisões. Estas ainda ocorrem por vezes devido aos rápidos movimentos relativos aleatórios entre robôs e humanos. Por conseguinte, é necessário que os robôs colaboradores detetem e evitem as colisões [1].

Existe vários métodos que foram estudados ao longo dos anos de modo evitar contatos involuntários com os humanos, ou mesmo esforços excessivos que danificam as ferramentas em utilização. Um dos métodos é a visão a bordo ou câmaras colocadas no ambiente para antecipar colisões e evitá-las através do planeamento de um caminho livre de colisões [7], [8].

Uma outra forma é baseada no sensor externo, como o sensor táctil [9], [10] e o sensor de força/torque (na articulação do pulso do robô). Este método pode ser sensível e obter facilmente as magnitudes das forças de impacto. No entanto, para o sensor táctil, é difícil conseguir cobrir todo o corpo do robô, como resultado, a deteção falharia na parte onde não se encontram os sensores. Para o sensor de força/torque na articulação do “pulso” de um robô, ele só pode detetar a colisão que ocorre no robô na parte final. Outra forma livre de modelos é monitorizar correntes elétricas excessivas que existem derivado de um esforço excessivo do robô [11], [12].

O sistema de sensor anticolisão idealizado nesta Tese é um sensor de anticolisão robótico projetado para evitar danos graves essencialmente em ferramentas de trabalho. Os recursos do sensor incluem: rearme automático, alta repetibilidade, ampla rotação de momento, projeto robusto e baixo custo. Referir ainda que este sensor é tipicamente mecânico, ou seja, é fácil de afinar e apresenta uma consistência física e funcional mais elevada, quando comparado com sensores elétricos ou pneumáticos. Este dispositivo pode detetar uma colisão antes ou durante uma colisão do robô e da sua ferramenta, bem como prevenir colisões com humanos.



1.2. Organização do relatório

O relatório é constituído por 4 capítulos. No primeiro é apresentada uma introdução e enquadramento do presente relatório.

O segundo capítulo pretende evidenciar uma revisão teórica de alguns conceitos de robótica, desde a sua evolução histórica, indústria 4.0, dados estatísticos dos robôs, cinemática de robôs e um capítulo sobre sensores robóticos. Todos os conceitos revistos são de elevada importância para as atividades desenvolvidas ao longo do projeto.

O terceiro capítulo reflete todo o desenvolvimento do sensor anticolisão robótico, desde a missão e objetivos, as restrições do projeto, o desenvolvimento do produto em 2D e 3D e por fim a análise funcional, com recurso à impressão 3D.

O quarto capítulo faz abordagem às conclusões detalhadas e sugestões para melhorar no futuro próximo.

A fechar o relatório apresentam-se as referências relevantes para a realização do mesmo, e os anexos que permitem uma melhor compreensão dos assuntos abordados.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Evolução dos robôs

Após a Segunda Guerra Mundial, as máquinas automáticas foram concebidas para aumentar a produtividade, e os fabricantes de máquinas-ferramentas fizeram máquinas numericamente controladas (NC) para permitir aos fabricantes produzir melhores produtos. Ao mesmo tempo, foram desenvolvidos manipuladores de vários graus de liberdade para o trabalho com materiais nucleares [13]. A integração entre a capacidade NC das máquinas-ferramentas e os manipuladores criou um robô simples. Os primeiros robôs eram controlados por tiras de papel com furos, em que os olhos elétricos podiam detetar e que controlavam os movimentos do robô. À medida que a indústria foi melhorando, a tira de papel deu lugar a fitas magnéticas, a dispositivos de memória e a computadores pessoais [13].

Foi na década de 1950, quando *George Devol* desenvolveu o primeiro robô industrial (Figura 2), um dispositivo de duas toneladas que transferiu objetos autônomos de um lugar para outro com atuadores hidráulicos. Desde então, à medida que os sensores, a eletrónica e o *software* de computador avançaram, as capacidades dos robôs industriais expandiram-se consideravelmente para incluir tarefas complexas como soldadura, pintura, montagem, embalagem, paletização, inspeção e testes, tudo realizado com velocidade, precisão e repetibilidade [14].



Figura 2 – Primeiro Robô Industrial [14]

O primeiro robô industrial do mundo foi utilizado numa linha de produção na fábrica da GM Ternstedt em Trenton, NJ, que fabricava puxadores de portas e janelas, botões de mudanças de velocidade, luminárias e outras ferragens para interiores de automóveis. O robô



custou cerca de 57.000 euros para fazer, mas a Unimation vendeu-o por 18.000 dólares americanos [14]. Ao longo do final da década de 1960 e início dos anos 1970, à medida que a necessidade de automação de tarefas intensivas em mão-de-obra na fabricação aumentou, o foco da robótica industrial mudou, do levantamento pesado para o manuseio de materiais e trabalhos de precisão. Isso deu origem ao desenvolvimento de robôs elétricos menores com controlos avançados, microprocessadores, motores miniaturizados, giroscópios e servos, o que os tornou ideais para tarefas mais leves de montagem, como aperto de parafusos e porcas [15].

O primeiro robô na Europa surgiu em 1967 e foi instalado em Metallverken, Uppsland Väsby, Suécia [14].

Em meados da década de 1980 começou a ver aumento do interesse e excitação em robótica. Ao ver os robôs como as "máquinas do futuro", os engenheiros começaram a avançar no limite para apoiar o desenvolvimento industrial e alcançar maior competitividade na fabricação. O surgimento dessas tecnologias, juntamente com uma redução substancial nos custos de hardware de computador, como microprocessadores, resultou em uma mudança de passo no avanço das capacidades robóticas industriais. Usando sensores de força de precisão e lasers, os robôs industriais foram adquirindo a capacidade de detectar e seguir componentes de fabricação ao longo das linhas de montagem. Esses lasers e sensores forneceram aos robôs um senso de visão e toque humano e revolucionaram as suas interações com o ambiente industrial. Como resultado, os robôs foram transformados de simples dispositivos mecânicos que foram programados para executar tarefas repetitivas para máquinas mais elaboradas que possuíam o que muitos categorizavam como "inteligência limitada" [15].

Desde o início dos anos 2000, os desenvolvimentos da robótica industrial têm sido em grande parte impulsionados por avanços no *software*. A maioria dos robôs industriais em uso hoje são equipados com uma infinidade de sensores avançados que coletam imensas quantidades de dados. Nos próximos anos, à medida que os robôs industriais se tornarem mais inteligentes, serão capazes de assumir tarefas mais complexas e executá-las com uma eficiência que excede em muito as capacidades humanas. Eles também serão capazes de trabalhar com segurança ao lado dos humanos no ambiente de fabricação. Isso é algo que já está a ocorrer nos dias de hoje, com o surgimento de robôs colaborativos, ou *cobots*.



Os *cobots* utilizam tecnologia avançada, incluindo articulações limitadas à força e visão computacional para detectar a presença de humanos no seu ambiente. São muitas vezes menores e mais leves do que robôs industriais tradicionais, facilmente móveis e programados para executar tarefas específicas.

2.2. Indústria 4.0 na robótica

A “Indústria 4.0” pode ser definida como a quarta revolução industrial, focada na digitalização de processos e integração de sistemas, aplicada à indústria tradicional, com os vários parceiros da cadeia de valor [16].

Na essência, a principal novidade desta indústria para o ambiente das empresas é a conectividade. A partir da digitalização, toda a fábrica estará conectada, desde a produção até ao sistema de logística e os departamentos de marketing e vendas. As máquinas estão interligadas entre si e também com peças, com ferramentas e com seres humanos. Tudo isso por meio de sistemas cyber-físicos que enviam informações de um dispositivo para o outro. A partir dessa comunicação, interação e troca de informações, as próprias máquinas poderão, por exemplo, tomar as decisões para melhorar o processo produtivo ou até mesmo reduzir custos. Não será necessário efetuar nova fazer uma programação. Ao chegar às máquinas, as peças estarão repletas de informações que serão transmitidas aos equipamentos o que é necessário para que elas se tornem um produto final, verificando se são capazes de realizar os processos.

Segundo Drath e Horch o termo indústria 4.0” surge pela primeira vez na Hannover Messe Fair em finais de 2011 na Alemanha. Termo esse que pretende antever uma nova revolução industrial, a quarta, que ocupa na nossa história um “agora” e que tem por objetivo melhorar os sistemas de produção, as cadeias de valores e os modelos de negócio na indústria [17]. Desde 2011 o termo tem vindo a ser extremamente debatido começando pelo público alemão e mais tarde, progressivamente, veio a ganhar uma dimensão global. Indústria 4.0” é proposto originalmente por três engenheiros alemães, Henning Kagermann (físico), Wolfgang Wahlster (professor de inteligência artificial) e Wolf. Dieter Lukas (físico e sénior do Ministério Federal Alemão da Educação e Investigação - *German Federal Ministry of Education and Research*). Engenheiros esses que acabaram por deixar de ser a força essencial que proporciona e segue alimentando o debate, pois, a sua visão era a de angariar fundos visando atingir certos objetivos técnicos.

2.2.1. Indústria 4.0 em Portugal

No que diz respeito ao caso português a iniciativa governamental surge com o nome “Portugal i4.0” ou ainda “i4.0: Indústria 4.0 – Economia Digital” introduzida pelo Ministério da Economia naquela que é a Estratégia Nacional para a Digitalização da Economia. Neste sentido em 2017 foi lançado pelo Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação (IAPMEI) o “Guia de Informação Indústria 4.0 Sistemas de Incentivos à Economia Digital” (IAPMEI, Portugal 2020 e União Europeia, 2017) apoiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do acordo de parceria existente entre Portugal e a Comissão Europeia atuante através de cinco Fundos Europeus Estruturais e de Investimento com especial ênfase em políticas de desenvolvimento social, económico e territorial, denominado “Portugal 2020” [16].

Um dos impactos previstos da indústria 4.0 na mão de obra é a drástica redução tanto de postos de trabalho, quanto de funções repetitivas e manuais. O chão de fábrica como conhecemos hoje vai mudar. Os profissionais terão um papel mais estratégico, com conhecimento mais técnico e especializado. O trabalho tende a ser muito mais flexível, pois as pessoas terão de lidar com máquinas e sistemas inteligentes [16].

2.2.2. A importância da robótica na Indústria 4.0

A indústria 4.0 possui nove pilares que serão o seu apoio, estes são na realidade tecnologias que já estão em uso e a sua introdução no sistema produtivo fará com que se alcance o padrão 4.0 [18].



Figura 3 – Pilares da indústria 4.0

Como se pode observar na Figura 3 a robótica é definida como um dos pilares da indústria 4.0, os robôs industriais foram desenvolvidos para executar tarefas repetitivas que exigem força ou precisão, as primeiras gerações destas máquinas apresentam programação fixa e executam somente o que foi previamente definido e qualquer alteração no processo resulta em paragens para reprogramação [18].

A robótica autónoma inspira uma nova geração de robôs capazes de sentir o ambiente à sua volta e operar por longas horas sem a supervisão direta de humanos. Estes equipamentos poderão aprender novas funções e se auto programarem o que permitirá o seu uso em processos de produção flexível. Estes equipamentos podem trabalhar em conjuntos com outros robôs ou com seres humanos. Como conseguem perceber o ambiente ao seu redor, eles são capazes de controlar seus movimentos de modo a evitar acidentes [19].

Ao incorporar robôs inteligentes aos processos da indústria, o setor ganha em desempenho e disponibilidade, deixando a execução de tarefas de produção logísticas e repetitivas a cargo das máquinas. Além de reduzir os custos, estes robôs representam um importante aumento na produção.

2.3. Dados Estatísticos Gerais

Na América do Norte, houve muita adoção de equipamento robótico no início da década de 1980, seguida de um breve recuo no final da mesma década. Desde essa altura, o mercado tem vindo a crescer, embora esteja sujeito a oscilações económicas, tal como todos os mercados. A Figura 4 mostra o número de robôs que foram instalados por ano, no mundo todo, até ao ano de 2015 [20].

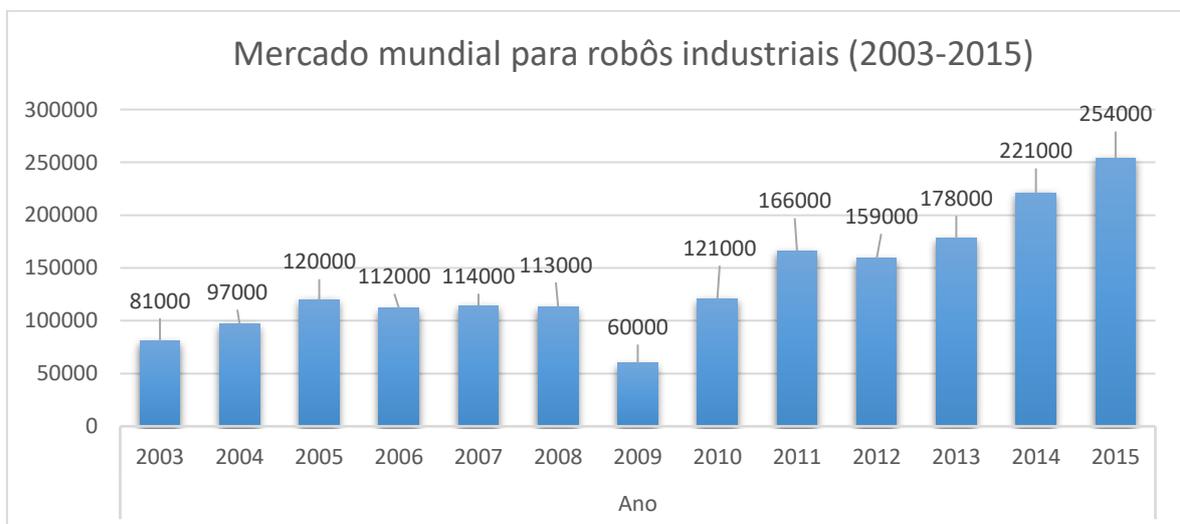


Figura 4 – Mercado mundial para robôs industriais (2003-2015) [20]

Uma das principais razões para o crescimento na utilização de robôs industriais é o seu custo decrescente e o aumento das suas capacidades. A Figura 5 mostra o número de robôs que são instalados por ano, entre 2015 até aos dias de hoje [20].

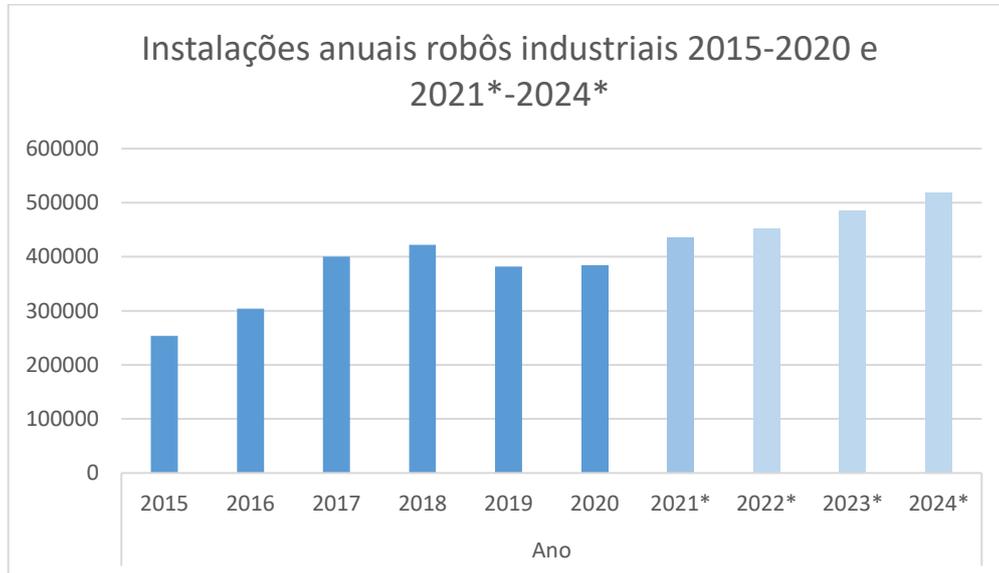


Figura 5 – Instalações anuais robôs industriais 2015-2020 e 2021*-2024* [20].

O relatório da “*World Robotics 2021*” mostra um recorde de 3 milhões de robôs industriais que operam em fábricas de todo o mundo, um aumento de 10%. As vendas de novos robôs cresceram ligeiramente a 0,5% apesar da pandemia global, com 384.000 unidades enviadas globalmente em 2020. Esta tendência foi dominada pela evolução positiva do mercado na China, compensando as contrações de outros mercados. Este é o terceiro ano de maior sucesso na história da indústria robótica, após 2018 e 2017 [20]. Segundo *Milton Guerry*, espera-se que as instalações robotizadas globais recuperem fortemente e cresçam 13% para 453.000 unidades em 2022, ultrapassando assim o nível recorde ano após ano [21].

Até 2025, estima-se que o empregador médio de fabrico poupará 16% em mão-de-obra, substituindo trabalhadores humanos por robôs. Em alguns países, é ainda mais favorável a utilização de robôs [20].

2.3.1. Continente Europeu

As instalações de robôs industriais na Europa diminuíram 8% para 67.700 unidades em 2020. Este foi o segundo ano de declínio, após um pico de 75.560 unidades em 2018. A procura da indústria automóvel diminuiu mais 20%, enquanto que a procura da indústria em geral aumentou 14%. A Alemanha, que pertence aos cinco maiores mercados de robôs do

mundo (China, Japão, EUA, Coreia, Alemanha) tinha uma quota de 33% do total de instalações na Europa. Seguiram-se a Itália com 13% e a França com 8% [20].

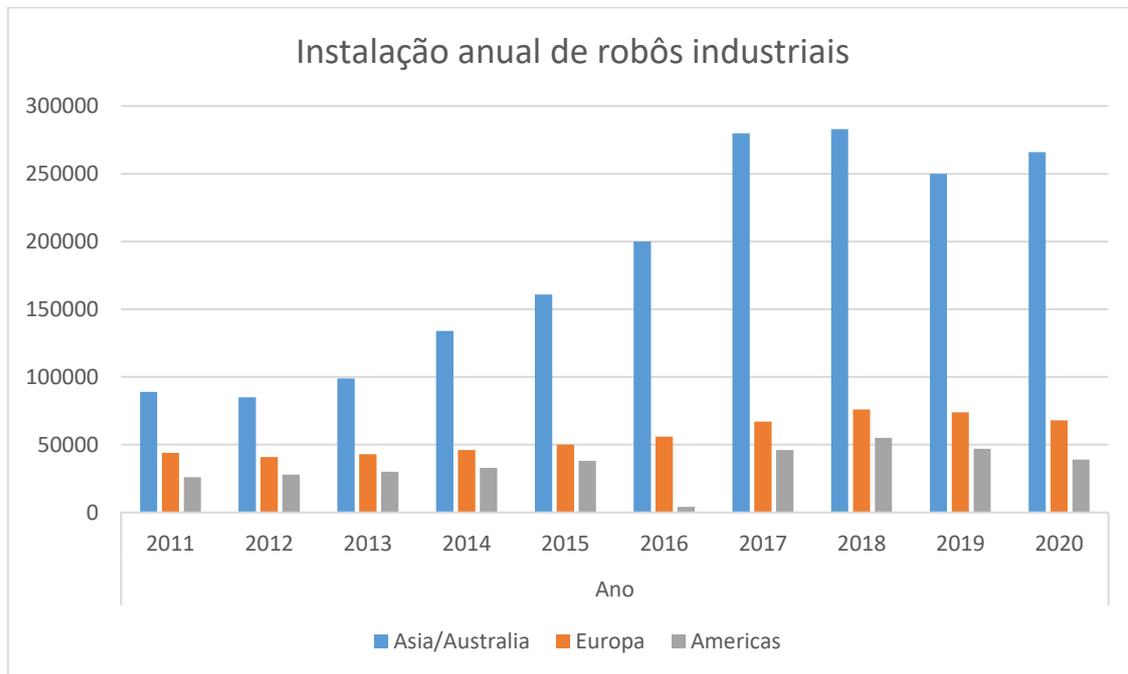


Figura 6 – Instalação anual de robôs industriais [20]

O número de robôs instalados na Alemanha manteve-se em cerca de 22.300 unidades em 2020 (Figura 6). Esta é a terceira maior contagem de instalações de sempre, um resultado notável dada a situação pandémica que dominou o ano 2020. A indústria robótica alemã está a recuperar, impulsionada por fortes negócios no estrangeiro. Espera-se que a procura de robôs na Alemanha cresça lentamente, apoiada principalmente pela procura de robôs de baixo custo na indústria em geral e fora do fabrico.

2.4. Constituição base de um robô

Um robô, como sistema, é composto por vários elementos isolados que interagem entre eles, de modo a tornarem exequível uma determinada função, os elementos são os seguintes [13]:

- Manipulador: Este é o corpo principal do robô que consiste nas ligações, as juntas, e outros elementos estruturais do robô. Sem outros elementos, o manipulador sozinho não é um robô.
- Garra final: Esta parte está ligada à última articulação (mão) de um manipulador que geralmente manipula objetos, faz ligações a outras máquinas, ou executa as tarefas



necessárias. Os fabricantes de robôs geralmente não concebem nem vendem garras finais. Na maioria dos casos, tudo o que eles fornecem é uma simples pinça. Geralmente, a mão de um robô tem disposições para a ligação de garras finais de especialidade especificamente concebidos para um fim. Isto é o trabalho dos engenheiros de uma empresa ou consultores externos para conceber e instalar o fim no robô, e para o fazer funcionar para a situação em questão. Uma tocha de soldadura, uma pistola de pintura, um dispositivo de colocação de cola, ou um manipulador de peças são apenas algumas possibilidades. Na maioria dos casos, a ação da garra final é controlada ou pelo controlador do robô, ou o controlador comunica com o dispositivo de controlo do efetor final.

- **Atuadores:** Os atuadores são os "músculos" dos manipuladores. O controlador envia sinais aos atuadores, que, por sua vez, movem as articulações e ligações do robô. Os tipos mais comuns de atuadores são servomotores, motores de passo, atuadores pneumáticos, e atuadores hidráulicos. Referir ainda que os atuadores estão sob o controlo do controlador.
- **Sensores:** Os sensores são utilizados para recolher informações sobre o estado interno do robô ou para comunicar com o ambiente exterior. Tal como nos seres humanos, o controlador do robô precisa de saber a localização de cada ligação do robô para conhecer a configuração do robô. Quando se acorda de manhã, mesmo sem abrir os olhos, ou quando está completamente escuro, ainda se sabe onde se encontram os braços e as pernas. Isto acontece porque os sensores de feedback no sistema nervoso central embutidos nos tendões musculares enviam informação para o cérebro. O cérebro utiliza esta informação para determinar o comprimento dos músculos e, consequentemente, o estado dos braços, pernas, e assim por diante. O mesmo é válido para robôs, onde os sensores integrados no robô enviam informações sobre cada junta ou ligação para o controlador que determina a configuração do robô.
- **Controlador:** O controlador é bastante semelhante ao cérebro humano, embora não tenha o poder do mesmo, continua a controlar os seus movimentos. O controlador recebe os dados do computador (o cérebro do sistema), controla os movimentos dos atuadores, e coordena os movimentos com a informação de feedback sensorial. Para que o robô pegue numa peça, é necessário que a sua primeira junta esteja na magnitude correta, se a junta não estiver nesta magnitude, o controlador enviará um



sinal ao atuador (corrente para um motor eléctrico, ar para um cilindro pneumático, ou um sinal para uma servo-válvula hidráulica) provocando o seu movimento. Quando a junta atinge o valor desejado, o sinal é parado. Em robôs mais sofisticados, a velocidade e a força exercida pelo robô são também controladas pelo controlador.

- **Processador:** O processador calcula os movimentos dos robôs, determina quanto e quão rápido cada junta deve mover-se para alcançar a localização e as velocidades desejadas, e supervisiona as ações coordenadas do controlador e dos sensores. O processador é geralmente um computador, que funciona como todos os outros computadores, mas é dedicado a este fim. Requer um sistema operativo, programas, equipamento periférico como um monitor, e tem as mesmas limitações e capacidades. Em alguns sistemas, o controlador e o processador estão integrados em conjunto numa só unidade.
- **Software:** São utilizados 3 grupos de *software* num robô. Um é o sistema operativo que opera o processador. O segundo é o *software* robótico que calcula os movimentos necessários de cada junta com base nas equações cinemáticas do robô. Esta informação é enviada para o controlador. Este *software* pode estar em muitos níveis diferentes, desde a linguagem da máquina até às linguagens sofisticadas utilizadas pelos robôs modernos. O terceiro grupo é a colecção de rotinas e programas orientados para aplicações desenvolvidos para utilizar o robô ou os seus periféricos para tarefas específicas, tais como montagem, carregamento de máquinas, manuseamento de materiais, e rotinas de visão.

2.5. Cinemática de Robôs

A cinemática é a ciência do movimento que trata o assunto sem ter em conta as forças que o causam. Dentro da ciência da cinemática, estuda-se a posição, a velocidade, a aceleração e todos os derivados de ordem superior das variáveis de posição (no que diz respeito ao tempo ou a qualquer outra variável(s)). Assim, o estudo da cinemática dos manipuladores refere-se a todas as propriedades geométricas e baseadas no tempo do movimento. As relações entre estes movimentos e as forças e binários que os causam constituem o problema da dinâmica. De um modo geral, quase todos os problemas de cinemática podem ser interpretados como uma adição vetorial. No entanto, cada vetor numa equação vetorial deve ser transformado e expresso num quadro de referência comum [4].

Os robôs manipuladores possuem vários graus de liberdade (DOF), o que significa que possuem bastantes articulações, permitindo-lhes moverem-se livremente dentro da sua área de trabalho. No espaço um robô consegue ter 6 graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação). Note-se que cada junta, rotativa ou prismática, confere ao manipulador um grau de movimento. O número de DOF do órgão terminal é sempre inferior ou igual ao número de graus de movimento (gdm) do manipulador. Se os vários gdm estiverem adequadamente distribuídos ao longo da estrutura mecânica, o número de DOF do órgão terminal será igual ao número de gdm do manipulador (até ao limite de 6). Quando o número de gdm é superior ao número de DOF diz-se que o manipulador é redundante [22]. A expressão grau de liberdade é bastantes vezes confundida com grau de movimento, trata-se de um abuso de linguagem que deve ser evitado a menos que não haja risco de confusão [4].

Num sistema de 1-DOF, quando a variável é definida para um valor particular, o mecanismo é totalmente definido e todas as suas outras variáveis são conhecidas. Por exemplo, no mecanismo de 1-DOF representado Figura 7, quando a manivela está definida para 120° , os ângulos da ligação acoplador e do braço também são conhecidos, enquanto num mecanismo com vários DOF, todas as variáveis de entrada devem ser definidas individualmente para conhecer os parâmetros restantes [4].

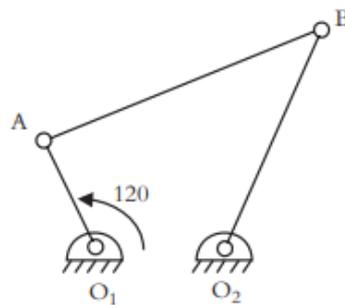


Figura 7 – Mecanismo de 1-DOF [4]

2.5.1. Movimentação dos robôs

Os robôs movem-se através de juntas, as mais usuais em projetos de robôs são juntas lineares ou rotacionais. As juntas lineares envolvem um movimento de deslizamento ou translação dos elos conectados. Este movimento pode ser conseguido de várias maneiras possíveis. Podemos referir uma junta linear como uma junta do tipo L (Linear).

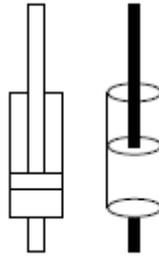


Figura 8 – Junta do tipo L [23]

De acordo com Groover *et al.*[23], existe pelo menos, três tipos de juntas rotacionais que podem ser distinguidas nos manipuladores robóticos:

- junta R (Rotacional) - onde o eixo de rotação é perpendicular ao eixo dos dois elos conectados (Figura 9).;

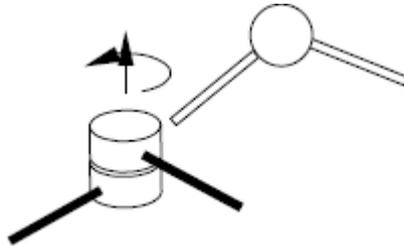


Figura 9 – Junta do tipo R [23]

- junta T (Torção) - onde o eixo de rotação da junta é paralelo a ambos (Figura 10);

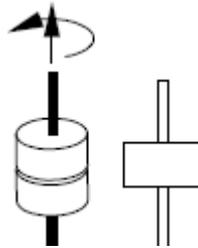


Figura 10 – Junta do tipo T [23]

- junta V (reVolução) - o elo de entrada é paralelo ao eixo de rotação e o elo de saída é perpendicular ao eixo de rotação (Figura 11).

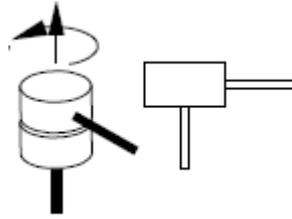


Figura 11 – Junta do tipo V [23]

De um modo geral, pode-se dizer que as juntas do braço e corpo são projetadas para habilitar o robô a mover a ferramenta para uma posição desejada dentro dos limites do seu tamanho e dos movimentos das respetivas juntas. O movimento da garra é projetado para habilitar o robô a orientar a ferramenta em relação à tarefa a ser realizada. Por exemplo, a garra deve ser orientada num ângulo específico, apropriado para executar uma determinada tarefa, como por exemplo, agarrar um objeto. De forma a dar a orientação desejada, a garra é normalmente dotada de 3 DOF (Figura 12).

- Rolamento (*Roll*) - Rotação do mecanismo da garra sobre o eixo do braço;
- Pulso (*Pitch*) - Rotação para cima ou para baixo da garra;
- Orientação (*Yaw*) - Rotação para direita ou para esquerda do punho.

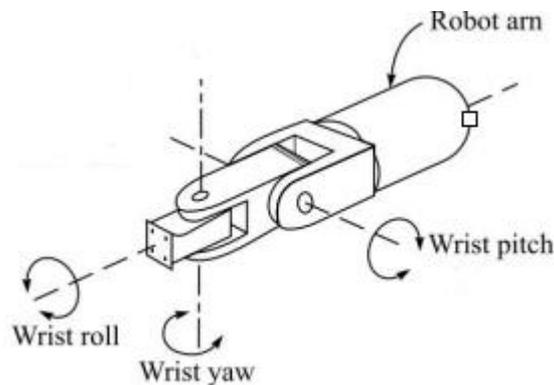


Figura 12 – 3 Graus de liberdade [23]

2.5.2. Cinemática Direta e Inversa

A cinemática de robôs pode ser considerada direta ou inversa. A cinemática direta trata de computar a posição e orientação do sistema de referência da ferramenta com relação ao sistema da base. O resultado da cinemática direta provém da equação do braço, para cada tipo de robô, conforme a configuração do mesmo. Para tanto é necessário conhecer os parâmetros cinemáticos envolvidos em cada elemento do robô. Tendo as suas variáveis

articulares, é possível determinar a posição e orientação de cada ligação, para um determinado conjunto de características geométricas do robô [24].

Por outro lado, a cinemática inversa envolve a determinação da posição das juntas ativas a partir da posição generalizada do órgão terminal. Normalmente, para os manipuladores de estrutura em série é um problema difícil, para o qual nem sempre é possível encontrar solução analiticamente [25]. Além disso, normalmente, a solução não é única. Quando se pretende determinar o vetor de coordenadas operacionais (por exemplo, coordenadas cartesianas e ângulos de Euler) que corresponde a um determinado vetor no espaço das juntas (problema da cinemática direta), verifica-se facilmente que as componentes relativas à posição podem ser lidas diretamente da matriz de transformação do robô. As componentes relativas à orientação (ângulos de Euler) não são de leitura imediata, uma vez que a orientação vem dada em termos de uma matriz de rotação de dimensão 3×3 . A determinação do vetor de coordenadas do espaço das juntas que corresponde a um dado vetor de coordenadas operacionais, envolve cálculos bem mais complexos na cinemática inversa [22].

2.5.2.1. 2 Graus de liberdade

A Figura 13 representa a posição das juntas de um robô com 2 graus de liberdade, bem como os seus respetivos ângulos, para uma situação de duas dimensões. Os comprimentos das várias ligações são representados por: L_1 e L_2 . Por outro lado, os ângulos associados a cada junta de rotação, são θ_1 e θ_2 .

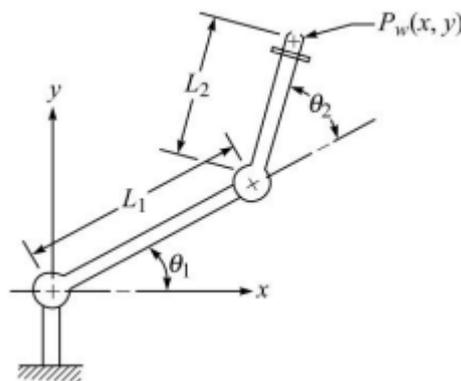


Figura 13 – Posição das juntas de um robô com 2 graus de liberdade

É possível definir a posição final do robô, através de duas maneiras:

- Utilizando os ângulos de juntas θ_1 e θ_2 , onde a posição pode ser definida pela equação 1.

$$P_j = (\theta_1, \theta_2) \tag{1}$$

- Utilizando a posição relativa ao eixo cartesiano x e y , estando a origem do mesmo posicionada na base do robô.

$$P_w = (x, y) \tag{2}$$

A posição final do braço P_w , pode ser calculada, definindo um vetor para o elo de ligação 1 e outra para o elo 2.

$$r_1 = [L_1 \cos \theta_1, L_1 \sin \theta_1] \tag{3}$$

$$r_2 = [L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \tag{4}$$

Após adição vetorial as coordenadas x e y do fim do braço (ponto P_w) no espaço, são as seguintes:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{5}$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{6}$$

Em muitos casos é mais importante ser capaz de derivar os ângulos de articulação dada a posição final do braço no espaço de trabalho, está-se a trabalhar na situação de cinemática inversa. A situação típica é quando o controlador do robô deve calcular os ângulos de articulação necessários para mover a sua extremidade do para um ponto no espaço definido pelas coordenadas do ponto. Para o manipulador de duas ligações da Figura 14, existem duas configurações possíveis para alcançar o ponto (x, y) .

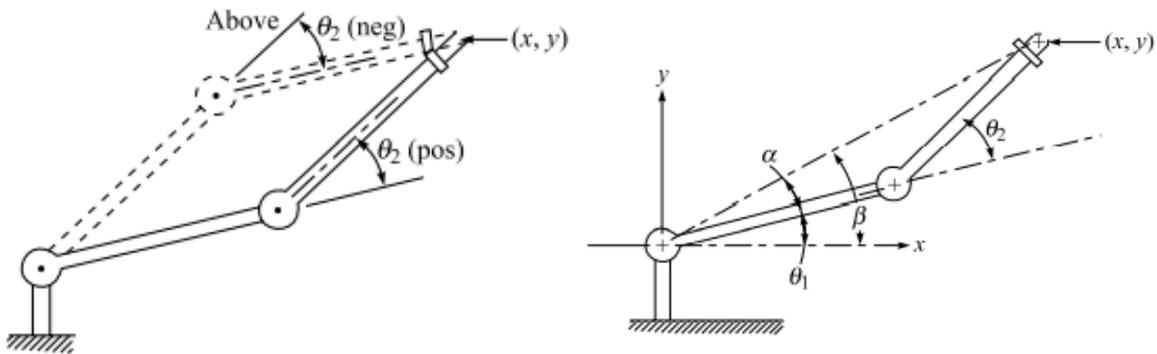


Figura 14 – Manipulador de 2 graus de liberdade



A relação entre os ângulos de articulação e as coordenadas do ponto final envolve termos “seno” e “cosseno”, deste modo é possível obter duas soluções quando resolvidas as duas equações. É ainda necessário desenvolver alguma estratégia para selecionar a configuração apropriada.

No caso da Figura 14, θ_2 pode ser considerado positivo ou negativo, dependendo da interpretação de cada utilizador e da função mais apropriada para o braço robótico. Considerando θ_2 positivo é possível utilizar as relações geométricas das seguintes equações:

$$\cos(A + B) = \cos(A)\cos(B) - \sin(A)\sin(B) \quad (7)$$

$$\sin(A + B) = \sin(A)\cos(B) + \sin(B)\cos(A) \quad (8)$$

Reescrevendo as equações 5 e 6, obtemos o seguinte:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (9)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (10)$$

Somando as duas equações obtém-se,

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (11)$$

De modo a determinar θ_1 , é necessário fazer as seguintes deduções:

$$\tan \alpha = \frac{L_2 \sin \theta_2}{L_2 \cos \theta_2 + L_1} \quad (12)$$

$$\tan \beta = \frac{y}{x} \quad (13)$$

Usando a identidade trigonométrica,

$$\tan(A - B) = \frac{\tan A - \tan B}{1 + \tan A \tan B} \quad (14)$$

E por fim obtém-se,

$$\tan \theta_1 = \frac{[y(L_1 + L_2 \cos \theta_2) - xL_2 \sin \theta_2]}{[x(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + yL_2 \sin \theta_2]} \quad (15)$$

Conhecendo os comprimentos de ligação L_1 e L_2 é possível calcular os ângulos necessários para colocar o braço numa posição (x, y) no espaço bidimensional.

2.5.2.2. 3 Graus de liberdade

Um braço robótico de duas articulações tem pouco valor prático, exceto para tarefas muito simples. Um terceiro grau de liberdade melhora a capacidade de orientação, bem como de posicionamento de uma peça ou ferramenta. A Figura 15 mostra o caso em que existe 3 graus de liberdade.

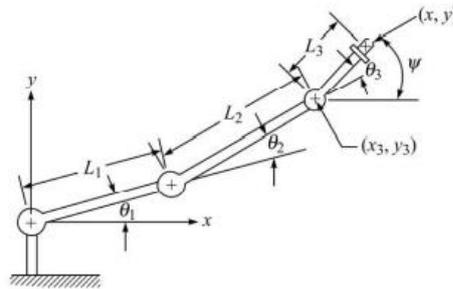


Figura 15 – Manipulador de 3 graus de liberdade

Este terceiro grau de liberdade representa uma articulação do pulso. As coordenadas espaciais mundiais para a extremidade do pulso seriam as seguintes:

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (16)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (17)$$

$$\Psi = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (18)$$

Pode-se utilizar os resultados obtidos para os 2 graus de liberdade para fazer a transformação inversa para o braço de 3 graus de liberdade. Quando definindo a posição da extremidade do braço utilizaremos x, y e Ψ . O ângulo Ψ é o ângulo de orientação para o pulso. Tendo em conta estes três valores, pode-se obter os ângulos de juntas (θ_1, θ_2 e θ_3) usando as seguintes equações:

$$x_3 = x - l_3 \cos \Psi \quad (19)$$

$$y_3 = y - l_3 \sin \Psi \quad (20)$$

Após a determinação da posição da junta 3, o problema para determinar θ_1 e θ_2 resume-se a um caso de 2 graus de liberdade, como foi analisando anteriormente.

2.5.2.3. 4 Graus de liberdade

O caso em que o robô apresenta 4 graus de liberdade, pode ser considerado o mais comum, quanto maior os graus de liberdade, mais tarefas complexas os robôs conseguem executar. A Figura 16 ilustra a configuração de um manipulador em três dimensões com 4 graus de liberdade.

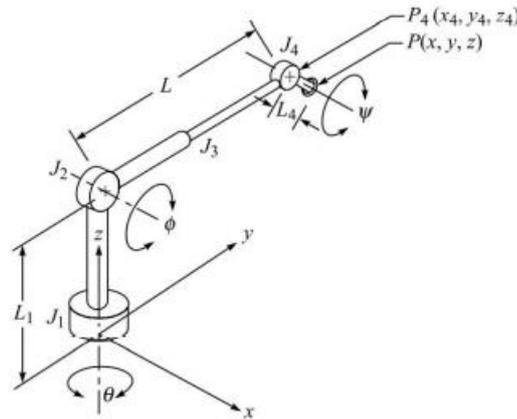


Figura 16 – Manipulador de 4 graus de liberdade

A posição final do ponto P, definida no sistema mundial de coordenadas para robô, é dado por:

$$x = \cos \theta (L \cos \phi + L_4 \cos \Psi) \quad (21)$$

$$y = \sin \theta (L \cos \phi + L_4 \cos \Psi) \quad (22)$$

$$z = L_1 + L \sin \phi + L \sin \Psi \quad (23)$$

Dada a especificação do ponto P (x, y, z) e do ângulo de rotação Ψ , é possível encontrar qualquer das posições conjuntas relativas à coordenada da junta J_4 (x_4, y_4, z_4).

$$x_4 = x - \cos \theta (L_4 \cos \Psi) \quad (24)$$

$$y_4 = y - \sin \theta (L_4 \cos \Psi) \quad (25)$$

$$z_4 = z - L_4 \sin \Psi \quad (26)$$

Os valores de L, ϕ e θ podem também ser encontrados através das equações,

$$L = [x_4^2 + y_4^2 + (z_4 - L_1)^2]^{-1} \quad (27)$$

$$\sin \phi = \frac{z_4 - L_1}{L} \quad (28)$$



$$\cos \theta = \frac{y_4}{L} \quad (29)$$

É importante avaliar quantos graus de liberdade o robô necessita de ter, esta tarefa deve ser feita em relação ao uso do mesmo, por exemplo, para certas tarefas como a soldadura, são necessários cinco graus de liberdade, uma vez que o movimento de rotação do pulso não é necessário para efetuar soldadura.

2.6. Notação de Denavit-Hartenberg

Para o estudo da cinemática deve-se definir um sistema de referência denominado inercial fixo na base do robô e referenciar por letras e números, sequencialmente da base ao punho, tal como elos e juntas [26]. Na cinemática direta para representar a posição e a orientação da garra final é utilizada a notação de Denavit-Hartenberg. A notação de Denavit-Hartenberg é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com n graus de liberdade. A partir desta notação, cada elo é referenciado por um sistema de coordenadas próprio de forma, a que um dos eixos desses sistemas seja fixo numa junta e direcionado à junta seguinte, tornando-se solidário ao movimento do elo percorrido pelo eixo.

De acordo com CRAIG [4], de modo a pôr em prática este método, é necessário ter algumas considerações:

- a_i : Distância de Z_i a $Z_i + 1$ medida ao longo do eixo X_i do elo;
- α_i : Ângulo de Z_i a $Z_i + 1$ medido em torno de X_i ($\alpha = 0^\circ$);
- d_i : Distância de X_{i-1} a X_i medida ao longo de Z_i ;
- θ_i : Ângulo de X_{i-1} a X_i medido em torno de Z_i .

A Figura 17, representa os parâmetros cinemáticos do manipulador.

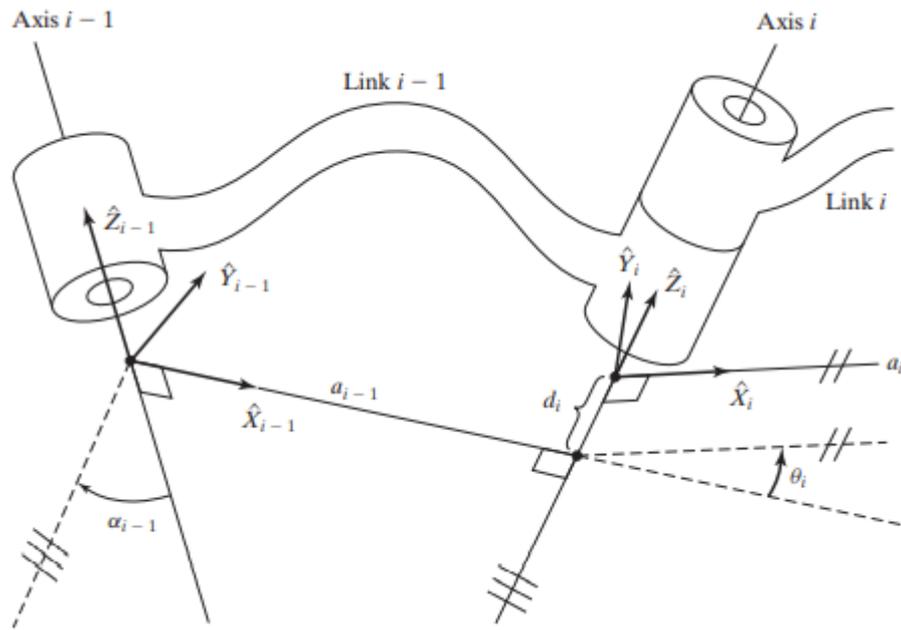


Figura 17 – Parâmetros cinemáticos do manipulador

CRAIG refere ainda que após definidos os parâmetros básicos para um sistema de referência de D-H, deve ser analisado e definido conforme os passos:

- 1) Identificar os eixos das juntas e definir linhas infinitas ao longo deles. Para as etapas de 2 a 5 considerar duas dessas linhas vizinhas (eixos i e $i + 1$);
- 2) Identificar a perpendicular comum, ou o ponto de intersecção, entre eles. Atribuir a origem do sistema de referência do elo ao ponto de intersecção, ou ao ponto onde a perpendicular comum encontrar com o i -ésimo eixo;
- 3) Definir o eixo Z_i apontado ao longo do i -ésimo eixo de junta;
- 4) Definir o eixo X_i apontado ao longo da perpendicular comum ou, se os eixos se cruzam, determinar que X_i é normal ao plano que contém os dois eixos;
- 5) Definir o eixo Y_i para completar o sistema de coordenadas usando a regra da mão direita;
- 6) Atribuir $\{0\}$ para que se equipare a $\{1\}$ quando a primeira variável de junta for zero. Para $\{N\}$, escolher uma localização para a origem e direção X_N livremente, mas em geral de forma que o máximo possível de parâmetros de acoplamento seja zero.

Da definição dos parâmetros de Denavit-Hartenberg modificados, pode-se perceber que um ponto P_i , expresso no sistema de coordenadas i , pode ser expresso no sistema de coordenadas $i - 1$ fazendo-se a seguinte sequência de transformações:

- Translação de d_i ao longo de Z_i .

$$D_z(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

- Rotação de um ângulo θ_i em torno de Z_i , para alinhar X_i com X_{i-1} .

$$R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

- Translação de α_{i-1} ao longo de X_{i-1} para fazer as origens coincidentes.

$$D_x(\alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

- Rotação de um ângulo α_{i-1} em torno de X_{i-1} , para alinhar Z_i com Z_{i-1} .

$$R_x(\alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Por fim obtém-se,

$$\begin{aligned} {}^{i-1}T_i &= R_x(\alpha_{i-1})D_x(\alpha_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i) = R_x(\alpha_{i-1})R_z(\theta_i) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (34)$$

2.7. Robôs Colaborativos

Apesar do especial destaque dado aos *cobots* pelos meios de comunicação social, o número de unidades instaladas continua a ser muito baixo, totalizando uma quota de apenas 3,24%. Em 2019, apenas 16.000 dos mais de 373.000 robôs industriais instalados eram *cobots*. No ano anterior, os *cobots* não chegaram às 16.000 unidades. No entanto de 2017

para 2018, as instalações anuais de *cobots* aumentaram 50% [20], como se pode observar na Figura 18.

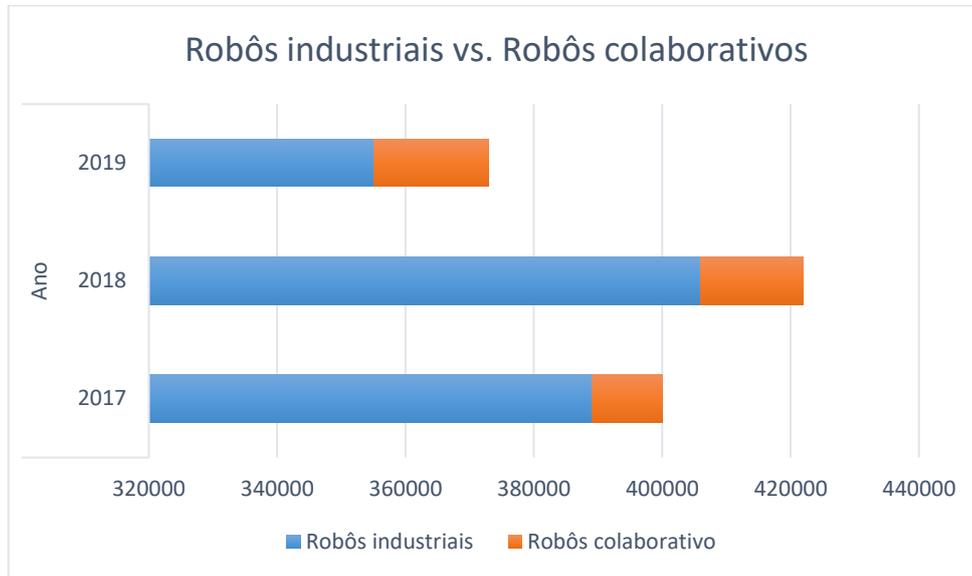


Figura 18 – Robôs industriais vs. Robôs colaborativos [20]

2.7.1. Segurança

Um dos problemas que ainda persistem nos dias de hoje em relação aos robôs colaborativos, é a segurança que demonstram para com o colaborador. É um campo difícil de combater, uma vez que os robôs são programados para executar determinadas tarefas, seguindo linhas de orientação pré-definidas. Quando o robô se cruza com um humano, não tem a capacidade por si só de perceber que está perante um obstáculo e que tem de se desviar ou inativar imediatamente, de modo a evitar colisões e danos maiores [27].

O processo de identificação de perigos de um sistema robótico deve considerar os seguintes tópicos:

- As características do robô (carga, velocidade, força, momento, torque, potência, geometria, formato das superfícies);
- Condições de contato com o robô;
- Distância e localização do operador em relação ao robô.

Após a identificação dos perigos, deve-se estimar e avaliar os riscos associados antes de aplicar medidas de redução de risco, as quais devem seguir os três passos recomendados pela norma ISO 12100 [28].

- Medidas de segurança inerentes ao projeto do sistema robótico;



- Proteções de segurança ou medidas de proteção complementares;
- Informação para uso.

Para sistemas robóticos tradicionais, as medidas de proteção que geralmente são adotadas procuram reduzir os riscos por meio de dispositivos de scanners de segurança a laser, embora seja possível utilizar novas tecnologias (por exemplo, para limitação de força ou de extensão de movimentos) ou uma combinação de ambas. Os requisitos essenciais para a aplicação dessas medidas podem ser encontrados nas normas ISO 10218-1, ISO 10218-2.

Após a análise de segurança percebe-se a importância do desempenho dos sensores anticolisão, seja para minimizar colisões com humanos, ou para evitar danos em ferramentas do robô. O próximo capítulo irá centrar-se nos sensores anticolisão existentes, e numa nova proposta de sistema.

2.7.2. Avaliação de risco de *Cobots*

A maior vantagem trazidos por robôs colaborativos reside na oportunidade de combinar vantagens da automatização com a flexibilidade e a flexibilidade cognitiva e suave competências humanas. Especificamente, os robôs industriais tradicionais podem executar as tarefas para as quais estão programadas continuamente e com precisão, velocidade e repetibilidade impossíveis de alcançar por humanos. No entanto, carecem de versatilidade e não se podem adaptar eficazmente a ambientes de trabalho dinâmicos ou mudanças na produção [29].

Uma vez que a indústria está cada vez mais apelativa dos robôs colaborativos de uma maneira totalmente diferente do que faziam no passado, torna-se ainda mais crucial realizar uma avaliação de risco detalhada sobre os riscos e exposições da pessoa que trabalha ao lado de um robô colaborativo. Dada a complexidade do corpo humano, as interações e exposições que podem ocorrer tem de ser analisar ainda com mais precisão essas aplicações.

Embora ainda não exista nenhum documento homologado para os *cobots*, as aplicações colaborativas entre pessoas e robôs podem basear-se nas seguintes normas:

Segundo Pablo Segura *et al.* [30] existem 3 tipos de classes:

- Tipo A - Fornecer requisitos básicos de segurança, conceitos, e princípios para a conceção geral da máquina ambientes relacionados (ISO 12100);
- Tipo B - Fornecer requisitos genéricos de segurança para uma vasta gama de ambientes relacionados com máquinas (ISO 13850, ISO 13851 e ISO 13849-1);



- Tipo C - Fornecer requisitos de segurança detalhados para um grupo particular de máquinas e os seus respectivos "ambientes" (ISO 10218-1 e ISO 10218-2).

Com o objetivo de desenvolver um método eficaz que ajude as empresas a implementar a colaboração homem-robô na sua produção mais rapidamente e com menos riscos implícitos, enfrentando assim os próximos desafios, Sebastian Blankemeyer *et al.*[31] desenvolveram uma pesquisa à qual chamaram “*safemate*” onde o foco principal foi desenvolver uma análise criteriosa, de modo a perceber através de duas partes essenciais, se a aplicação de *cobots* numa determinada área era segura.

A primeira parte é baseada num questionário para determinar um grande potencial de colaboração entre humanos e robôs na aplicação a ser avaliado. Sebastian Blankemeyer *et al.* [31] fazem uma série de perguntas sobre estimuladores e inibidores da implementação do HRC com respeito às propriedades e aos constrangimentos das aplicações existentes. Os estimuladores e inibidores significam as propriedades ou condições de fronteira dos processos que influenciam a aptidão para a colaboração homem-robô. Em determinadas circunstâncias, só pode ser possível definir um sistema HRC seguro com grande esforço, uma vez que a implementação destes locais de trabalho implica normalmente riscos económicos elevados, são definidos critérios de alto risco. Isto evita que se trabalhe demasiado a ser investido na determinação do potencial futuro. Estes critérios incluem, por exemplo, o manuseamento de ferramentas de corte por um robô, uma vez que o risco de lesões para o trabalhador é demasiado elevado. No final da primeira etapa de avaliação, há a possibilidade de terminar o processo e examinar outros postos de trabalho. No caso de um potencial existente, o processo deve ser considerado no segundo passo.

Depois de ter sido identificado um potencial para o local de trabalho em questão, é investigado uma segunda fase. O processo é dividido em subprocessos, para que as atividades individuais possam ser avaliadas. O sistema desenvolvido para a determinação metódica e avaliação dos potenciais de aplicação do HRC baseia-se num modelo processual, que é apresentado na Figura 19. A linha de orientação consiste essencialmente em nove passos. As três primeiras etapas são independentes do processo observado e só são realizadas uma vez por empresa para considerar respetivas necessidades.

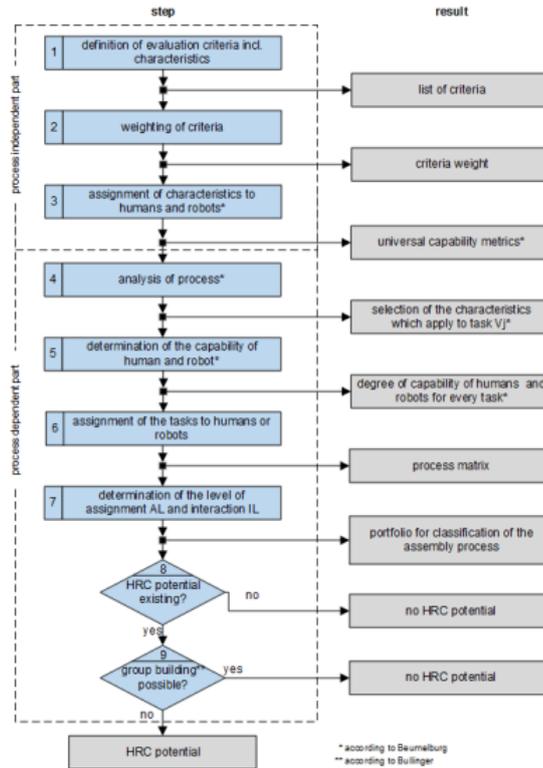


Figura 19 – Sistema desenvolvido por Sebastian Blankemeyer et al. [31]

Após vários passos que são descritos por Sebastian Blankemeyer *et al.* [31] ao longo do artigo em ênfase, é possível obter uma definição do espaço onde deve ser colocado o robô colaborativo, e sem interferir com a segurança dos humanos.

2.8. Sensores robóticos

Um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de variável física (por exemplo, força, pressão, temperatura, velocidade, taxa de fluxo, etc.) noutra forma. Usualmente é convertida para tensão elétrica, a razão para fazer a conversão é que o sinal convertido é mais conveniente de utilizar e avaliar utilizando um computador digital. Um sensor é um transdutor que é utilizado para fazer uma medição de uma variável física de interesse. Alguns dos sensores e transdutores comuns incluem extensómetros (utilizado para medir força e pressão), termopares (temperaturas), velocímetros (velocidade), e tubos de *Pitot* [23].

Segundo *Groover* [23] os sensores utilizados na robótica principalmente para interação com o ambiente incluem uma vasta gama de dispositivos que podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Sensores táteis;

- Sensores de proximidade e de alcance;
- Sensores diversos e sistemas baseados em sensores;
- Sistemas de visão mecânica.

2.8.1. Sensores táteis

Os sensores táteis são dispositivos que indicam o contacto entre eles e um objeto sólido. Os dispositivos de sensoriamento tátil podem ser divididos em duas classes: sensores de toque e sensores de força. Os sensores de toque fornecem um sinal de saída binário que indica se foi ou não feito contacto com o objeto. Por outro lado, os sensores de força indicam não só que foi feito contacto com o objeto, mas também a magnitude da força de contacto entre os dois.

São dispositivos simples tais como interruptores de limite, micro interruptores, e similares. Os dispositivos mais simples são frequentemente utilizados na concepção de sistemas de Inter bloqueio em robótica. Por exemplo, podem ser utilizados para indicar a presença ou ausência de peças num ou no ponto de recolha ao longo de um tapete rolante. Outro uso seria como parte de uma sonda de inspeção que é manipulada pelo robô para medir dimensões numa peça de trabalho.

A capacidade de medir forças permite ao robô executar uma série de tarefas. Incluindo a capacidade de agarrar peças de diferentes tamanhos no manuseamento de materiais, máquinas de trabalho de carga e montagem, aplicando o nível de força adequado para uma determinada tarefa. Em aplicações de montagem, a detecção de força poderia ser utilizada para determinar se os parafusos, se cruzaram ou se as peças estão encravadas.

Segundo Sami Haddadin *et al.* [32] existem 7 fases elementares (Figura 20) no evento de colisão. Algumas fases são (quase) instantâneas, outros não o são.



Figura 20 – 7 fases elementares no evento de colisão [32]

As fases desde a detecção até à identificação são independentes do contexto, enquanto as restantes dependem de fatores internos e externos, incluindo estado humano/ambiente e a tarefa em curso.



2.8.2. Sensores de proximidade e alcance

Os sensores de proximidade são dispositivos que indicam quando um objeto está próximo de outro. O quão próximo o objeto deve estar para ativar o sensor depende do dispositivo específico. As distâncias podem situar-se entre vários milímetros e vários metros. Alguns destes sensores também podem ser usados para medir a distância entre o objeto e o sensor, são chamados sensores de alcance. Os sensores de proximidade são tipicamente localizados no pulso ou na garra final, uma vez que estas são as partes móveis do robô. Um uso prático de um sensor de proximidade na robótica seria detetar a presença ou ausência de uma peça de trabalho ou outro objeto. Outra aplicação importante é para a deteção de seres humanos na célula de trabalho robotizada

Há uma variedade de tecnologias disponíveis para a conceção de sensores de proximidade e alcance. Estas tecnologias incluem dispositivos óticos, acústica, técnicas de campo elétrico (correntes de *Foucault* e campos magnéticos), e outros. Os sensores óticos de proximidade podem ser projetados colocando visível ou invisível (infravermelhos) fontes de luz., este podem ser ativos ou passivos. Os sensores ativos enviam um feixe infravermelho e respondem à reflexão do feixe contra um alvo. O sensor de infravermelhos ativo pode ser utilizado para indicar não só se uma parte está ou não presente, mas também a posição da parte. Os sensores de infravermelhos passivos são simplesmente dispositivos que detetam a presença de radiação infravermelha no ambiente. Eles são frequentemente utilizados em sistemas de segurança para detetar a presença de corpos que libertam calor dentro do alcance do sensor. Estes sistemas de sensores são eficazes na cobertura de grandes áreas na construção de interiores.

2.8.3. Sensores diversos e sistemas baseados em sensores

A categoria diversa abrange os restantes tipos de sensores e transdutores que podem ser utilizados para encravamentos e outros fins em células de trabalho robóticas. Esta categoria inclui dispositivos com a capacidade de detetar variáveis como a temperatura pressão, fluxo de fluidos, e propriedades elétricas.

Um dos sensores mais recentes é a deteção de voz, baseia-se nas técnicas de reconhecimento da fala para analisar palavras ditas por um humano e comparar as palavras ditas com um conjunto de padrões de palavras armazenadas. Quando a palavra falada



coincide com a armazenada no seu padrão, isto indica que o robô deve realizar algumas ações particulares que correspondem a uma determinada série de palavras.

Uma das aplicações importantes da tecnologia de sensores no fabrico automático é o controlo da segurança ou dos riscos que concomitantemente com a proteção do ser humano trabalhadores que trabalham nas proximidades do robô ou outro equipamento. Este assunto de monitorização da segurança e outros métodos para garantir a segurança dos trabalhadores na robótica.

A segunda maior utilização da tecnologia de sensores na robótica é a implementação de encravamentos no controlo da célula de trabalho. Os encravamentos são utilizados para coordenar a sequência de atividades das diferentes peças de equipamento na célula de trabalho. Na execução do programa do robô, existem certos elementos do ciclo de trabalho cuja conclusão deve ser verificada antes de se proceder com o próximo elemento do ciclo.

A terceira categoria é o controlo de qualidade. Os sensores podem ser utilizados para determinar uma variedade de características da qualidade da peça. Tradicionalmente, o controlo de qualidade tem sido realizado utilizando técnicas de inspeção manual com base numa amostragem estatística. A utilização de sensores permite que a operação de inspeção seja realizada automaticamente a 100%, em que cada parte é inspecionada. A limitação da utilização da inspeção automática é que o sistema de sensores só pode inspecionar uma gama limitada de características das peças e defeitos. Por exemplo, uma sonda de sensor concebida para medir o comprimento da peça não pode detetar falhas na superfície da peça.

A quarta maior utilização de sensores na robótica é determinar as posições e outras informações sobre vários objetos na célula de trabalho (por exemplo, peças de trabalho, equipamentos, pessoas, etc.). Para além de dados de posicionamento sobre um determinado objeto, a informação necessária para executar corretamente o ciclo de trabalho pode incluir a orientação do objeto, a cor, tamanho, e outras características.

3. Desenvolvimento de sensor anticolisão robótico

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento de um sensor anticolisão robótico mecânico. O sensor é projetado essencialmente para evitar danos graves em ferramentas de trabalho. O princípio de funcionamento do sensor está relacionado com o corte de corrente após a detenção de uma carga excessiva efetuada na ponta final do robô, carga esta que é afinada por intermédio de um sistema de molas. Após a carga efetuada

ultrapassar um valor de força estipulado, ocorre o corte de sinal de modo que o robô evite ou interrompa o movimento de colisão. Após a colisão do robô, o sensor rearmará de forma automática quando for removida a ferramenta do objeto que causou a colisão ou quando a rotação de torsão não exceder 30-35 graus. Com conformidade nos eixos X, Y e Z, este recurso proporciona um método mais seguro de realizar o rearme, pois torna desnecessária a presença de um operador na célula de trabalho do robô. O sensor foi idealmente projetado para trabalhar no robô KUKA KR 6 R1820.

De acordo com *Eppinger e Ulrich* [33] o desenvolvimento de produto é uma atividade complexa, pois, na produção de um projeto completo, é agregado diversas áreas, como por exemplo: marketing, *design* e manufatura no ciclo de vida do produto desde a produção até ao descarte. O processo de desenvolvimento de produto é importante além de outras razões, por possibilitar a garantia de qualidade e aperfeiçoamento do produto. A garantia da qualidade é possibilitada pelas fases do projeto e os pontos de verificação ao longo do caminho. Os mesmos autores referem ainda que existe 6 fases essenciais a considerar no projeto (Figura 21).



Figura 21 – Fases do projeto

1) Planeamento do projeto;

A atividade de planeamento é frequentemente referida como "fase zero", porque precede a aprovação do projeto e o lançamento do processo de desenvolvimento do produto real. Começa com a identificação de oportunidades, orientada pela estratégia empresarial e inclui avaliação da evolução tecnológica e dos objetivos de mercado. O resultado da fase de planeamento é a declaração de missão do projeto, que especifica o mercado-alvo para o produto, objetivos comerciais, pressupostos-chave e restrições.

2) Desenvolvimento do conceito;

Na fase de desenvolvimento do conceito, as necessidades do alvo são identificadas, conceitos alternativos de produtos são avaliados, e um ou mais conceitos são selecionados para desenvolvimento e teste posterior. Um conceito é uma descrição da forma, função e características de um produto e é geralmente acompanhado por um conjunto de



especificações, uma análise de produtos competitivos, e uma justificação económica do projeto.

3) Conceção ao nível do sistema

A fase de conceção a nível do sistema inclui a definição da arquitetura do produto, decomposição em subsistemas e componentes, conceção preliminar de componentes-chave, e atribuição de responsabilidade de conceção detalhada, tanto de recursos internos como externos. Os planos iniciais para o sistema de produção e planos finais montagem são normalmente definidas também durante esta fase. Os resultados da mesma são uma disposição geométrica do produto, uma especificação funcional de cada um dos subsistemas do produto, e um fluxograma preliminar do processo para a montagem final do processo.

4) Design do projeto

A fase de desenho detalhado inclui a especificação completa da geometria, materiais e tolerâncias de todas as peças únicas do produto e da identificação de todas as peças padrão a serem adquiridas aos fornecedores. A saída desta fase é a documentação de controlo do produto, os desenhos ou ficheiros informáticos descrevendo a sua geometria de cada peça e os instrumentos de produção, as especificações das peças adquiridas, e os planos de processo para o fabrico e montagem do produto. Existem três questões críticas consideradas ao longo do processo de desenvolvimento do produto:

- seleção de materiais;
- custo de produção;
- desempenho robusto.

5) Teste e refinamento

A fase de teste e aperfeiçoamento envolve a construção e avaliação de múltiplas versões de pré-produção do produto. Os protótipos são normalmente construídos com peças com a mesma geometria e propriedades materiais que as previstas para a versão de produção do produto, mas não necessariamente fabricadas com os processos reais a serem utilizados na produção. Os protótipos são testados para determinar se o produto irá funcionar como concebido e se este satisfaz as principais necessidades especificações do cliente. O objetivo dos protótipos é geralmente responder a perguntas sobre desempenho e fiabilidade para identificar as alterações de engenharia necessárias para o produto final.



6) Lançamento à produção

Na fase de arranque da produção, o produto é feito utilizando o sistema de produção pretendido. O objetivo da rampa é a formação da mão-de-obra para resolver quaisquer problemas remanescentes nos processos de produção. Os produtos obtidos durante a rampa de produção são por vezes fornecidos aos clientes preferidos e são cuidadosamente avaliados para identificar quaisquer falhas remanescentes. A transição da rampa de produção para a produção em curso é normalmente gradual. A certa altura, nesta transição, o produto é lançado e torna-se disponível para distribuição generalizada. Pode ocorrer uma revisão do projeto pouco tempo após o lançamento. Esta revisão inclui uma avaliação do projeto, tanto do ponto de vista comercial como técnico e destina-se a identificar formas de melhorar o processo de desenvolvimento para projetos futuros.

3.1. Planeamento

O planeamento do trabalho a ser executado é um passo essencial para o processo de desenvolvimento do produto, que consiste numa forma sistemática de conceção de um produto, para possibilitar a redução de tempo de lançamento, bem como a resolução rápida de problemas relacionado com o mesmo.

Durante o processo criativo de uma solução de robótica industrial, os vários sistemas constituintes são ainda desenvolvidos com o objetivo de desempenhar uma determinada função específica. A tecnologia tem vindo a conquistar o seu espaço de forma constante na vida do homem moderno, impondo-se cada vez mais como um elemento essencial na vida contemporânea, e como tal, é importante tirar a máxima vantagem dessa situação de tal modo que isso se torne um fator auxiliar no desenvolvimento do próprio homem.

3.1.1. Missão e objetivos do projeto

A missão principal do projeto é idealizar um sensor anticolisão robótico, capaz de detetar uma colisão antes ou durante uma colisão do robô e da sua ferramenta. Através da pesquisa bibliográfica realizada sobre o tema em epígrafe, percebeu-se que existe vários métodos que foram estudados ao longo dos anos, de modo a evitar contatos involuntários com os humanos. Os sistemas mais comuns para evitar esta colisão são sensores óticos, câmeras, sensores de pressão e sensores de torque/força tipicamente elétricos, o objetivo neste projeto passa por criar um sensor com um sistema essencialmente mecânico, que seja simples de entender, no entanto, mantendo um nível de precisão e exatidão elevado.



O sensor de colisão, consegue de um modo exato e preciso, afinar o esforço máximo ou mínimo que um robô ou braço robótico irá fazer num determinado movimento, bem como pará-lo de forma imediata, precavendo assim acontecimentos indesejados. Esta calibração de esforço é afinada por meio de 3 molas.

Os objetivos principais a alcançar com o projeto do sensor são os seguintes:

- **Alta repetibilidade:** Após uma colisão, o uso de componentes mecânicos precisos permite que o sensor rearme a volte à sua posição original.
- **Ampla Faixa de Movimento:** Durante uma colisão, o sensor tem de suportar cargas angulares, axiais ou de torção.
- **Capacidade de absorção de Energia:** A energia de impacto gerada durante uma colisão é absorvida por intermédio de 3 molas. Protegendo desta forma a ferramenta de danos por colisão. Após a absorção, essa energia é redirecionada para automaticamente rearmar o dispositivo quando este for removido do objeto que causou a colisão.
- **Rearme Automático:** Após uma colisão, o sensor irá auto-rearmar-se quando o robô remover o ferramenta da situação de colisão. Isso elimina a necessidade de se entrar na célula de trabalho do robô para rearmar o dispositivo de proteção de colisão.
- **Resposta Consistente de Corte:** A resposta de corte é semelhante a uma dada pressão independentemente da colisão ser angular, axial ou de torção.
- **Design simples e atrativo:** O sensor deverá ter um *design* atrativo, de modo a cativar a atenção dos clientes, no entanto, isso nunca deve comprometer o seu bom estado no funcionamento.

A realização deste projeto, permitiu assim o foco numa solução multidisciplinar dentro do que foi estudado no curso, e de aproveitar o conhecimento adquirido para o desenvolvimento de novas soluções mais eficazes.

3.1.2. Restrições no projeto

O sensor robótico apresenta algumas restrições na fase inicial do projeto, nomeadamente:

3.1.2.1. Projeto robusto

É necessário idealizar um sensor robusto, com recurso à utilização de materiais metal e polímeros resistentes. Esta exigência deve-se ao facto de ser uma ferramenta que pode

apresentar algum desgaste, uma vez que irá estar sujeito a esforços axiais e de corte. Outro aspeto importante é não saber exatamente qual o meio ambiente de trabalho, pode ser numa situação em que a temperatura ambiente esteja controlada, ou numa situação em que está sujeito a temperaturas elevadas, bem como poeiras e detritos de objetos. Realçar ainda o facto de quanto mais resistente o sensor for, maior será a sua durabilidade, evitando assim a sua substituição num curto espaço temporal.

3.1.2.2. Análise dimensional

No campo da análise dimensional houve a necessidade de ajustar o tamanho do sensor às características do robô KUKA KR 6 R1820, este robô foi o escolhido como padrão para ensaios, logo desde uma fase inicial que o tamanho dos componentes que constituem o sensor foram tidos em consideração.

O KR 6 R1820 (Figura 22) foi concebido para uma carga útil nominal de 6 kg, a fim de otimizar o desempenho dinâmico do robô. Com distâncias reduzidas do centro de carga, podem ser utilizadas cargas mais elevadas até à carga útil máxima.



Figura 22 – Robô KUKA KR 6 R1820

É um robô robusto, rápido e altamente eficiente na montagem de pequenas peças e no seu manuseio, proporcionando imediatamente máxima eficiência e economia. O robô contém 6 eixos, um alcance máximo de 1820 mm, uma repetibilidade de $\pm 0,04 \text{ mm}$, e é capaz de trabalhar em temperaturas ambiente entre os 5°C a 45°C . Referir ainda que o seu peso total sem carga é de 168 kg e tem proteção IP 54.

A Figura 23 representa o espaço de trabalho do robô, é possível observar que o alcance máximo vertical é de 2120 mm e o raio máximo percorrido é de 83 mm. É de facto importante compreender a sua área de trabalho, uma vez que assim é possível delinear o espaço de laboração evitando colisões com o ser humano e com o ambiente em redor.

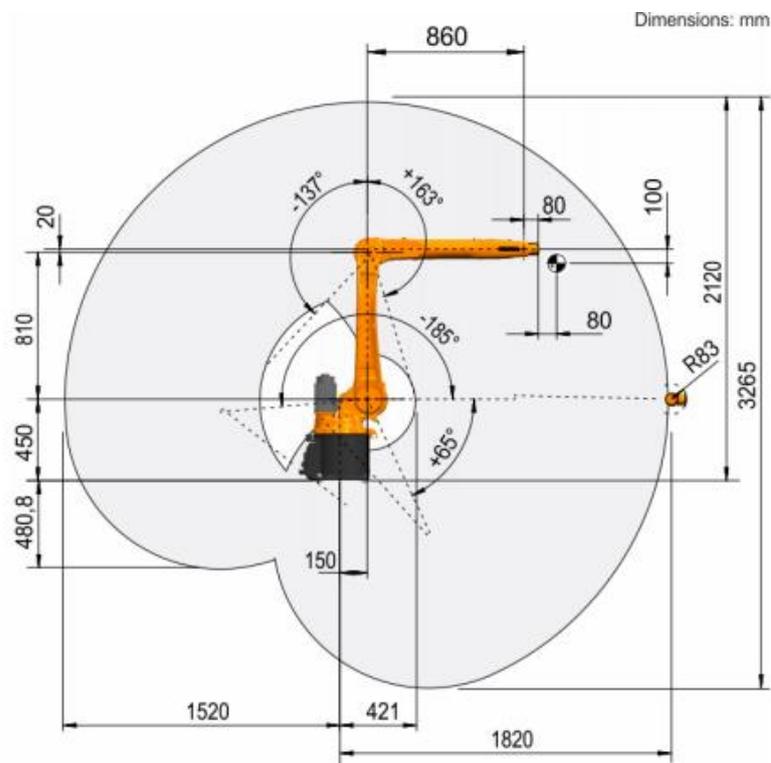


Figura 23 – Espaço de trabalho do KUKA KR 6 R1820

O controlador do robô é o *KR C4 smallsize-2* (Figura 24), a unidade de comando é a precursora para a automação nos dias de hoje. Esta reduz custos na integração, manutenção e conservação. Ao mesmo tempo aumenta a eficiência e a flexibilidade dos sistemas de forma sustentável, graças aos padrões industriais correntes e abertos.



Figura 24 – Controlador KR C4 smallsize-2

A KR C4 integra na sua arquitetura de *software Robot Control, PLC Control, Motion Control e Safety Control*. Todas as unidades de comando compartilham uma base de dados e infraestrutura comum. Assim a automação torna-se mais simples e eficaz. A opção de comando *KUKA.CNC* permite uma programação e operação direta dos robôs KUKA via G-Code. Ela também processa programas de alta complexidade de sistemas CAD/CAM e oferece máxima precisão através do planeamento da trajetória CNC. Assim a integração de robôs num mundo CNC existente ocorre de forma especialmente simples. Graças a mais funções específicas de robô em sistemas CAD/CAM pré-conectados, o robô pode intervir diretamente em processos de maquinação.

Outra restrição importante a considerar tem a ver com o facto da flange do robô (Figura 25) ter uma dimensão que tem de ser respeitada. O diâmetro do sensor não deverá ultrapassar em demasia o diâmetro da flange, quer para efeitos visuais, quer para efeitos funcionais, é ainda importante respeitar o local das furações, bem como o pino de posicionamento.

É igualmente importante ter a noção que na ponta do sensor anticolisão estará instalada uma garra ou outro objeto, objeto esse que acrescentará peso e comprimento. Após uma análise criteriosa decidiu-se optar por materiais de liga leve para as peças de maior desgaste e polímeros resistentes para a situação em que não há risco de rotura.

3.1.2.4. Custos

Em todos os projetos, um dos objetivos principais passa por ter o melhor rácio qualidade/custo, neste projeto isso não é exceção. É necessário perceber de forma concreta qual a melhor estratégia para a redução de custos, mantendo uma performance elevada, eficiente e altamente eficaz.

O custo está diretamente associado ao ciclo de vida do projeto, onde este pode-se entender como a série de fases pelas quais um projeto passa, desde seu início até a sua conclusão. Cada fase é composta por um conjunto de atividades, relacionadas ou encadeadas de maneira lógica, que termina com um ou mais entregáveis. Cada uma das fases tem prazo definido, com um ponto de início, fim ou controlo [33].

Os níveis de custo e de mobilização (e desmobilização) de recursos, normalmente, são baixos no início, aumentam à medida que o trabalho é executado e diminuem conforme o projeto é finalizado. A Figura 27, ilustra a curva dos níveis típicos de custo e pessoal.

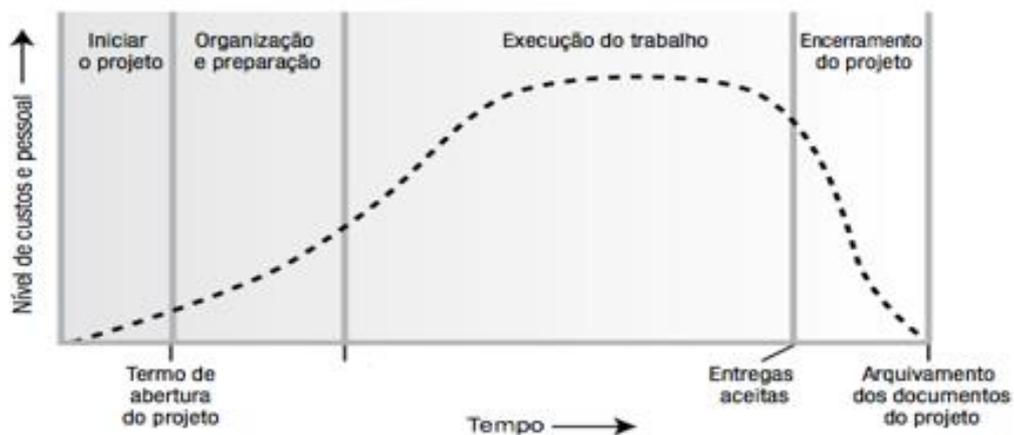


Figura 27 – Curva típica de custos e pessoal [33]

3.2. Desenvolvimento do produto

Esta etapa visa a enumerar os vários passos de desenvolvimento do produto ao longo do tempo, é descrito a estrutura, a qual foi realizado com modelação CAD no programa *SOLIDWORKS*. Entretanto, cabe salientar que para os domínios aqui descritos, foram consideradas todas as nuances abordadas no capítulo 3.1.

3.2.1. Análise da competitividade

A análise competitiva pode ser entendida como a identificação e a comparação das estratégias utilizadas dentro de um mercado. Por outras palavras, é descobrir o que os concorrentes diretos estão a desenvolver, avaliar os seus resultados em paralelo aos do produto desenvolvido e usar esse conhecimento para entender as mudanças na área, prevenir riscos e identificar novas requisições.

De uma maneira geral, a análise de competitividade permitiu compreender os seguintes critérios:

- situar-se no mercado da robótica;
- descobrir concorrentes que efetuam produtos semelhantes;
- identificar novas oportunidades de negócio;
- descobrir caminhos mais vantajosos para desenvolver o projeto e aproveitar as boas ideias.

A análise dentro da metodologia de desenvolvimento de produto contribuiu para o desenvolvimento do projeto, sendo considerada relevante para o trabalho aqui desenvolvido. É importante conhecer o mercado e perceber se os produtos desenvolvidos apresentam concorrência, e se porventura os produtos em desenvolvimento já estão patenteados. Por vezes, ao ter uma ideia, pode-se cometer o erro do produto em desenvolvimento ser semelhante a algo já patenteado.

Deste modo procedeu-se a uma pesquisa ao mercado de trabalho e foi possível constatar 3 empresas que fabricam sensores anticolisão, próximos do pretendido neste projeto. As empresas em questão são: *OnRobot*, *Robotiq* e *ATI*.

3.2.1.1. Sensor OnRobot

A empresa *OnRobot* [34] apresenta um sensor de força/binário de 6 eixos (Figura 28) proporcionam medidas de força e binário precisas ao longo dos eixos. A *OnRobot* refere ainda que este sensor garante um controlo preciso quando se trata de trabalhos difíceis de

montagem, polimento ou rebarbagem. Além disso, o *software* HEX inclui registo de percurso, controlo de força e recursos especiais para tarefas de inserção. Isto implica um tempo de integração reduzido para a linha de produção.



Figura 28 – Sensor OnRobot [34]

Ao analisar o *Datasheet* [34] (Figura 29) dos produtos, percebeu-se que existem dois modelos disponíveis no mercado, o HEX-E QC e HEX-H QC. Quando o sensor é utilizado em aplicações onde é necessária uma maior sensibilidade, é recomendado o modelo HEX-E QC, quando é necessária uma maior carga útil ou comprimento da ferramenta é recomendado o HEX-H QC.

General Properties	6-Axis Force/Torque Sensor				Unit
	Fxy	Fz	Txy	Tz	
Nominal Capacity (N.C)	200	200	20	13	[N] [Nm]
Single axis deformation at N.C (typical)	± 0.6 ± 0.023	± 0.25 ± 0.009	± 2 ± 2	± 3.5 ± 3.5	[mm] [°] [inch] [°]
Single axis overload	500	400	300	300	[%]
Signal noise* (typical)	0.1	0.2	0.006	0.002	[N] [Nm]
Noise-free resolution (typical)	0.5	1	0.036	0.008	[N] [Nm]
Full scale nonlinearity	< 2	< 2	< 2	< 2	[%]
Hysteresis (measured on Fz axis , typical)	< 2	< 2	< 2	< 2	[%]
Crosstalk (typical)	< 5	< 5	< 5	< 5	[%]
IP Classification	67				
Dimensions (H x W x L)	50 x 71 x 93 1.97 x 2.79 x 3.66				[mm] [inch]
Weight (with built-in adapter plates)	0.35 0.77				[kg] [lb]

General Properties	6-Axis Force/Torque Sensor				Unit
	Fxy	Fz	Txy	Tz	
Nominal Capacity (N.C)	200	200	10	6.5	[N] [Nm]
Single axis deformation at N.C (typical)	± 1.7 ± 0.067	± 0.3 ± 0.011	± 2.5 ± 2.5	± 5 ± 5	[mm] [°] [inch] [°]
Single axis overload	500	500	500	500	[%]
Signal noise* (typical)	0.035	0.15	0.002	0.001	[N] [Nm]
Noise-free resolution (typical)	0.2	0.8	0.01	0.002	[N] [Nm]
Full scale nonlinearity	< 2	< 2	< 2	< 2	[%]
Hysteresis (measured on Fz axis , typical)	< 2	< 2	< 2	< 2	[%]
Crosstalk (typical)	< 5	< 5	< 5	< 5	[%]
IP Classification	67				
Dimensions (H x W x L)	50 x 71 x 93 1.97 x 2.79 x 3.66				[mm] [inch]
Weight (with built-in adapter plates)	0.347 0.76				[kg] [lb]

Figura 29 – Especificações do sensor HEX-E QC e HEX-H QC [34]

O gráfico seguinte (Figura 30) mostra a extensão da carga útil e o comprimento da ferramenta que se pode utilizar juntamente com os sensores HEX-E e HEX-H em caso de aplicações que exijam precisão elevada.

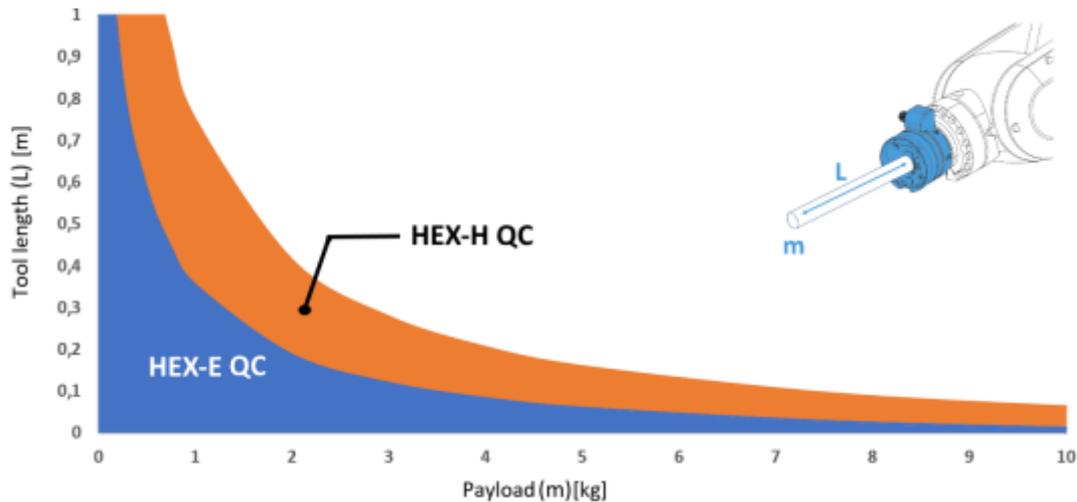


Figura 30 – Gráfico Força vs. Comprimento HEX-E e HEX-H [34]

Não foi possível compreender o funcionamento do sensor em detalhe, uma vez que o próprio fabricante não disponibiliza essa informação, no entanto, é possível através do *Datasheet* analisar as cargas em função do comprimento, a que o sensor pode estar sujeito, bem como as suas propriedades. É igualmente importante perceber o *design* do sensor, neste campo apresenta á primeira vista um layout simples e uma estrutura aparentemente robusta.

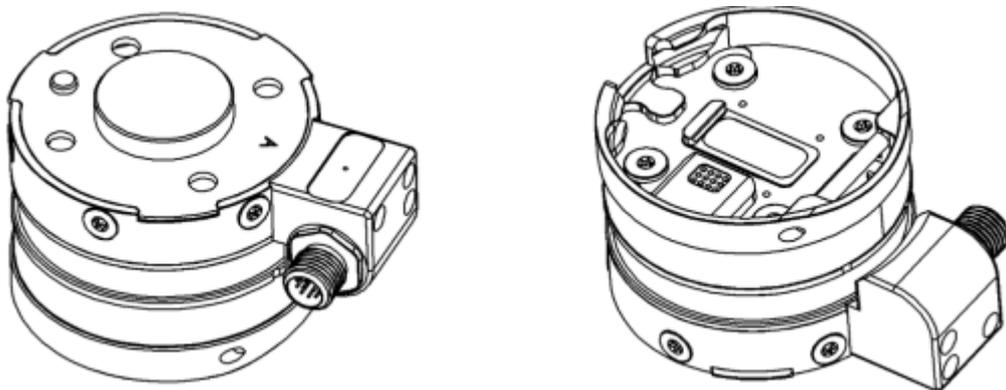


Figura 31 – Design do sensor HEX-E e HEX-H [34]

Após uma análise cuidada ao sensor, destaca-se os seguintes pontos:

- Precisão elevada em todos os eixos;
- Duas soluções capazes de responder á necessidade dos clientes;
- Dimensões relativamente pequenas para a sua função;
- Pode registar percursos complexos em minutos;
- Pode operar em ambientes com temperaturas elevadas;

- Regista um tempo estimado de duração de cerca de 30 mil horas, o que indica que o sensor é robusto e duradouro.

3.2.1.2. Sensor Robotiq

A empresa Robotiq apresenta um sensor de torque de força (Figura 32), que é um periférico robótico concebido para a aquisição de dados de força e torque em robôs. É instalado na flange da ferramenta robotizada com um acoplamento mecânico. É utilizado um cabo para alimentação e comunicações. O sensor é concebido para aquisição de dados (detecção de força e torque) para uma ferramenta de fim de braço num robô, destina-se a ser instalado num robô ou equipamento automatizado.



Figura 32 – Sensor de torque Robotiq [35]

Ao analisar o *datasheet* [35] percebe-se que a temperatura de funcionamento suportada varia entre os 5°C e os 45°C, tendo um peso aproximado de 442g, o que o torna um sensor bastante leve. Quanto ao funcionamento do mesmo, a marca não refere informações suficiente para compreender o funcionamento, no entanto, A Figura 33 mostra uma imagem com as peças constituintes do sensor.

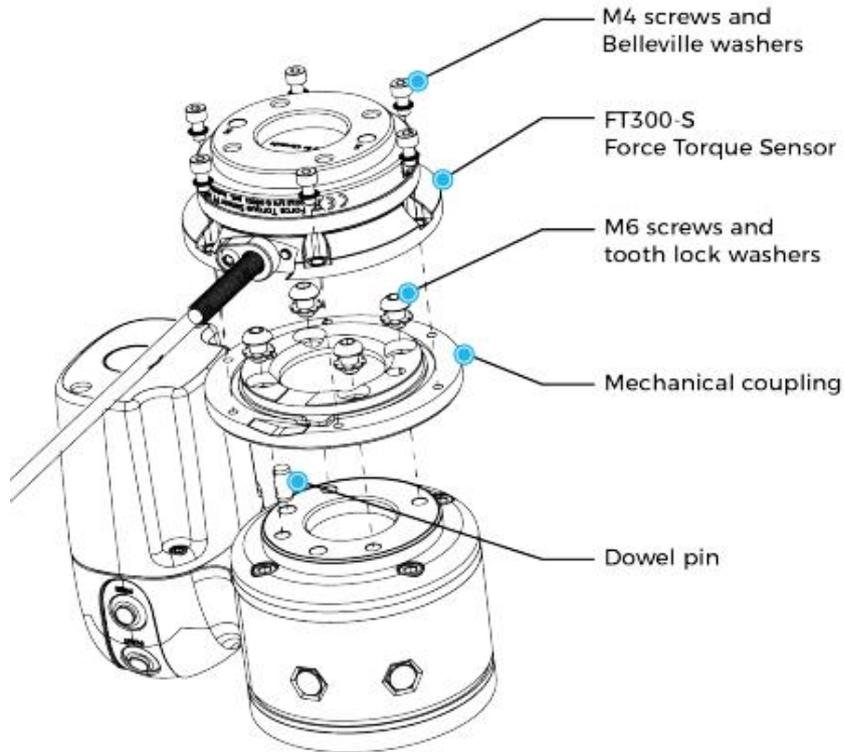


Figura 33 – Peças constituintes do sensor de torque Robotiq [35]

A Robotiq [35] realça que este sensor tem capacidade para realizar tarefas complexas da maneira mais fácil, o seu elevado índice de repetibilidade, capacidade para efetuar trajetórias complexas e ainda composição de metal rígido, isto tudo aliada a alta precisão. É ainda possível ver a flange do robô (Figura 34), o que elucida uma ideia das medidas praticadas.

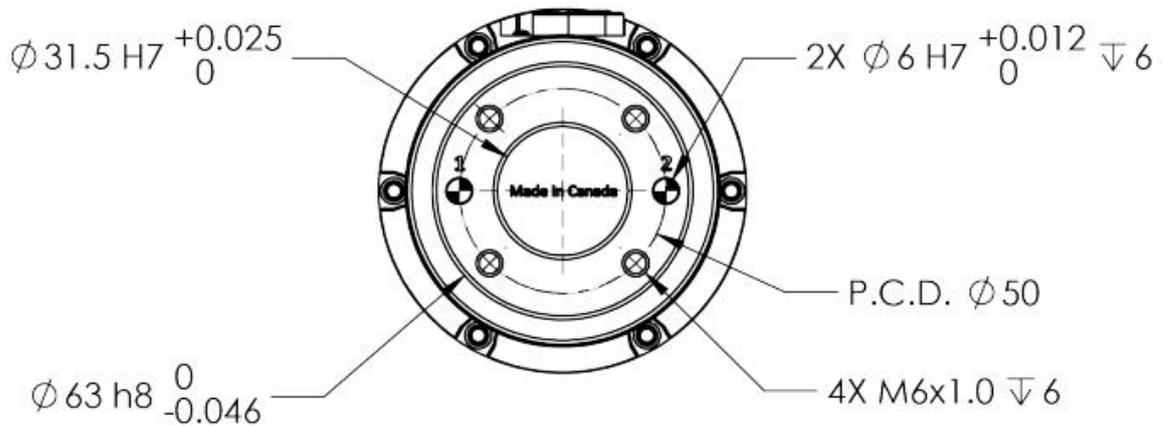


Figura 34 – Flange sensor Robotiq [35]

Infelizmente o fabricante não disponibiliza mais informação relevantes para o caso em estudo, no entanto, através do *datasheet* conseguiu-se obter algumas conclusões sobre o sensor, são as seguintes:

- É um sensor compacto e leve;
- Apresenta robustez aliada a precisão;
- Alcance de força em F_x , F_y , F_z de ± 300 N;
- É imune a qualquer tipo de ruído de sinal.

Quanto ao preço do sensor, a Robotiq não disponibiliza esta informação no seu site..

3.2.1.3. Sensor ATI

A empresa ATI apresenta um sensor de colisão robótico (Figura 35) projetado para evitar danos às garras robóticas resultantes de acidentes com robôs. As características do sensor incluem: *reset* automático, alta repetibilidade, rotação de grandes momentos, *design* robusto e baixo custo. A ATI [35] refere ainda que após a falha do robô, o sensor de colisão será automaticamente reiniciado quando o robô remover a ferramenta do objeto causador de colisão ou quando a torção não exceder 20-25 graus. A ATI refere ainda que a unidade foi testada para operar dez mil ciclos sem falhas.

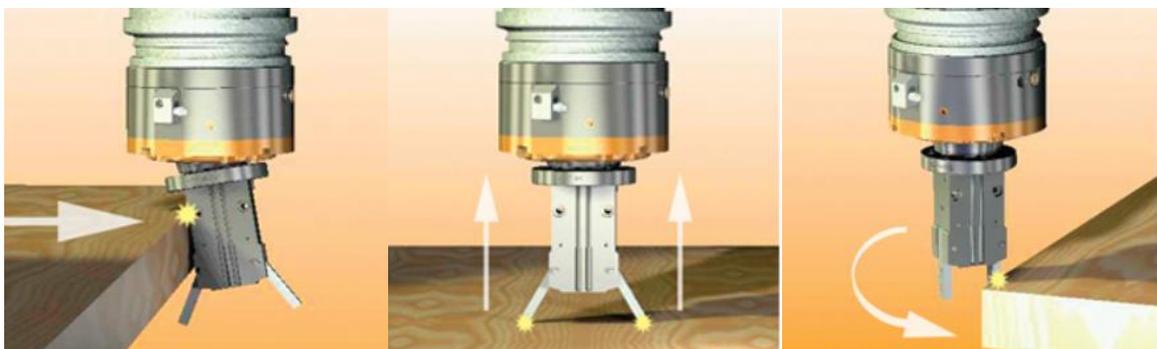


Figura 35 – Sensor de anticolisão ATI [35]

Juntamente com a conformidade angular superior do sensor, uma opção de mola fornece três configurações diferentes de momento de fuga. O sensor funciona com uma câmara pneumática que pode ser adicionada para aumentar a capacidade de momento para movimentos de alta inércia. A pressão pode ser liberada, contando apenas com a mola para movimentos de baixa inércia (Figura 36).

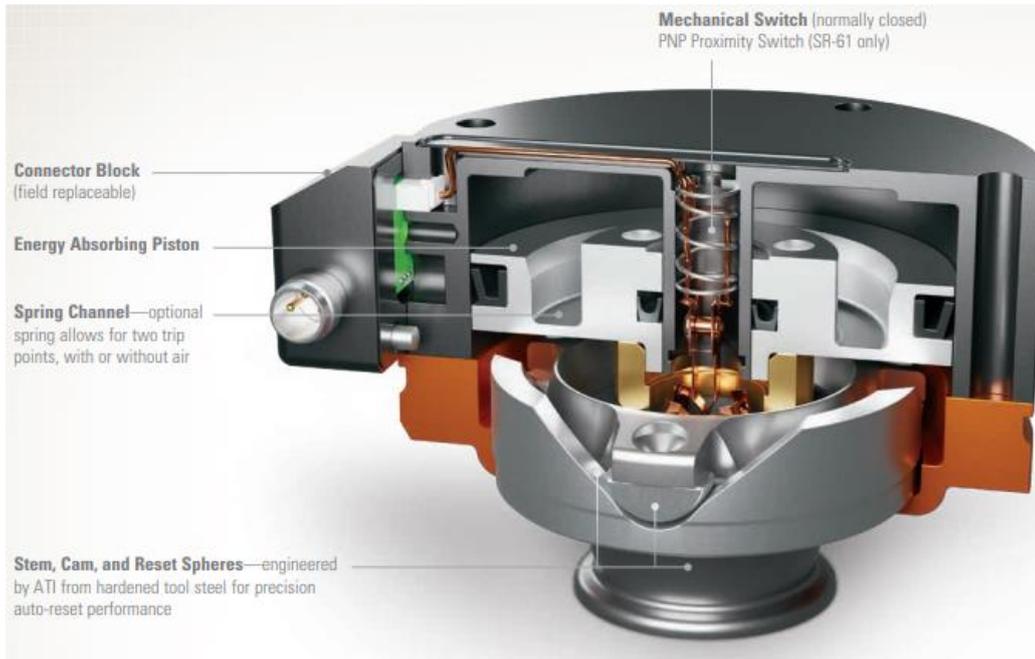


Figura 36 – Funcionamento sensor ATI [35]

Ao analisar o *datasheet* [35] percebe-se que a temperatura de funcionamento suportada varia entre os 5°C e os 50°C. Existem vários modelos disponíveis de sensor, a capacidade de precisão e exatidão não varia consoante o modelo, o que varia bastante são as suas dimensões e o peso, sendo que este último pode variar entre 0,249 kg e 11,4 kg.

De entre muitos pontos, a ATI destaca os seguintes pontos importantes do sensor:

- Alta Repetibilidade;
- Faixa generosa de movimento;
- *Reset* automático;
- Detecção de falha de resposta rápida;
- Resposta de rotura consistente;
- Classificação de proteção ambiental IP 65.

Não foi possível analisar as medidas e o custo do sensor, uma vez que o fabricante não especifica os mesmos.

Ao fazer a análise de competitividade foi possível sondar o mercado e perceber o tipo de sensores que as variadas marcas apresentam, deste modo, contribui para o *design* de produto apresentado no capítulo seguinte.



3.2.2. Design de produto

O *design* de produto fluiu de uma maneira mais eficiente após toda a análise efetuada nos capítulos anteriores. A descrição do sensor é realizada a partir do domínio mecânico através de modelagem CAD, no programa *SolidWorks*. O *SolidWorks* é um *software* desenvolvido pela *Dassault Systèmes SolidWorks Corp* e é uma das ferramentas CAD mais conhecidas. Apresenta uma vasta gama de funcionalidades como criar, simular, publicar e gerir dados associados ao produto. O *SolidWorks*, através da modelação 3D, possibilita a conceção virtual de peças ao mesmo tempo que estas podem ser visualizadas e melhoradas instantaneamente.

O *design* do produto foi definido em 3 fases essenciais, são elas as seguintes:

- Fase 1 – Esboço bidimensional;
- Fase 2 – Modelagem tridimensional em CAD;
- Fase 3 – Análise funcional e estética.

3.2.2.1. Esboço bidimensional

A fase do esboço bidimensional 2D foi o primeiro passo a efetuar neste capítulo, foi necessário começar a definir ideias e a esboçar as mesmas. Possivelmente é das fases mais importantes num projeto, pois permite discutir ideias com base nas pesquisas desenvolvidas nos capítulos anteriores, bem como chegar a um esboço final que serve de suporte para posteriormente passar à fase tridimensional. O desenho é apenas uma representação ou projeção sobre uma superfície bidimensional, onde a geometria, o rebatimento de pontos e a perspetiva podem tornar essa representação numa ilusão perfeita de um objeto tridimensional. A Figura 37, representa o primeiro esboço dimensional 2D, sem qualquer cota adicionada.

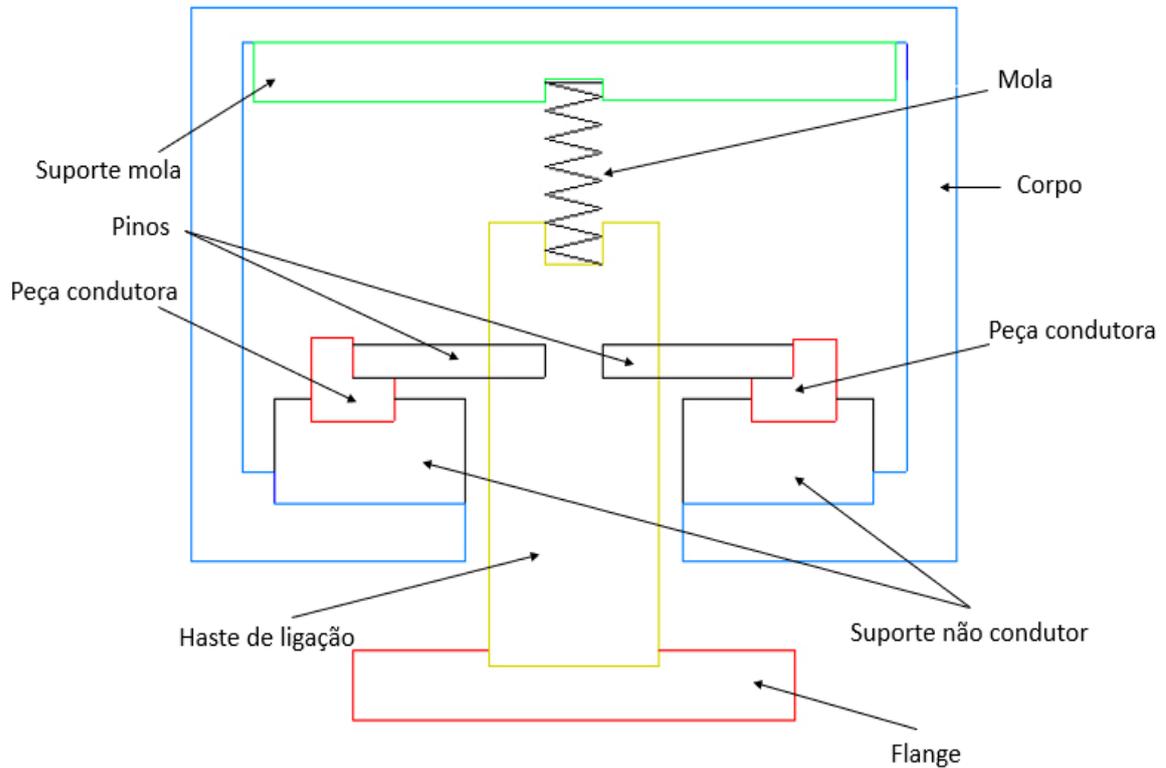


Figura 37 – Primeiro esboço bidimensional

Neste esboço esquematizou-se uma primeira ideia de sensor, em que o sistema funcionaria através de um pino retangular que entrava em contacto com 2 placas que conduziam a corrente elétrica, estes pinos contém corrente elétrica e são pressionados contra a peça condutora através de um sistema que contém uma mola ao centro. O pino faz a passagem da corrente elétrica para as placas, que por sua vez fecham o circuito (Figura 38). Quando é exercida uma pressão na flange, faz levantar os pinos da peça condutora e interrompe assim o circuito. Realçar que isto acontece apenas quando a pressão exercida na flange é superior à pressão exercida pela mola, no sentido contrário. Se a força exercida na flange for muito superior à força contrária exercida na mola, existe a probabilidade dos pinos saírem da sua posição original, por esse motivo o sensor idealizado no esboço não pode ser considerado como tendo rearme automático.

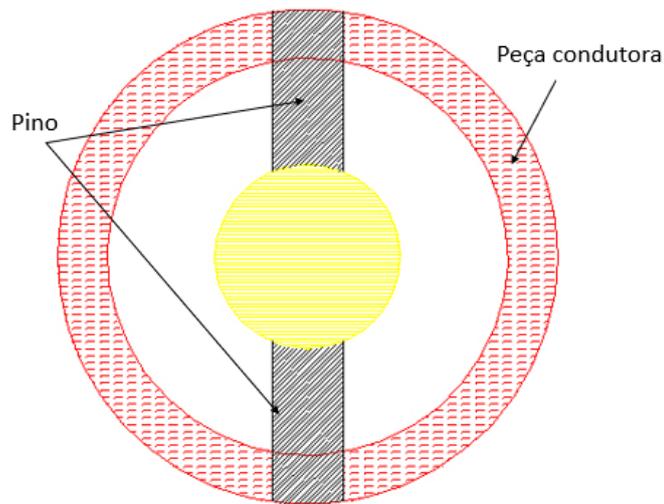


Figura 38 – Funcionamento do primeiro esboço

No entanto, ao observar o sistema com mais detalhe, percebeu-se que este teria uma restrição quanto ao sentido da aplicação da força na flange, o sensor apenas funcionaria quando são aplicadas cargas no sentido axial. Esta restrição não é de todo viável, uma vez que um dos seus objetivos é contabilizar não só cargas axiais, mas também cargas de torção e angulares.

No sentido de melhorar o primeiro esboço, foi efetuado um segundo esboço, para corrigir a restrição das cargas (Figura 39).

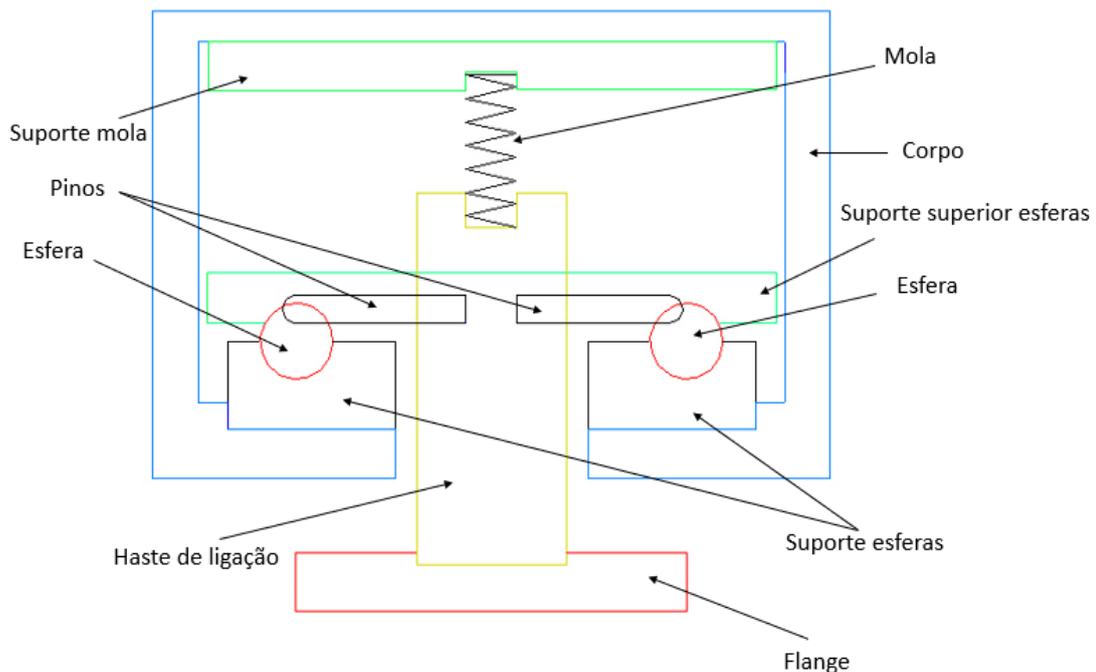


Figura 39 – Segundo esboço bidimensional

Ao observar a Figura 40 é possível perceber que o sistema do pino e da peça condutora apresentadas no primeiro esboço foi ligeiramente modificado. Idealizou-se um outro sistema, em que o princípio de funcionamento é o mesmo, no entanto, em vez da peça condutora, tem-se duas esferas estrategicamente posicionadas para permitir a passagem da corrente elétrica, desta forma a corrente não é fornecida pelo pino, pois este apenas fecha ou abre o circuito.

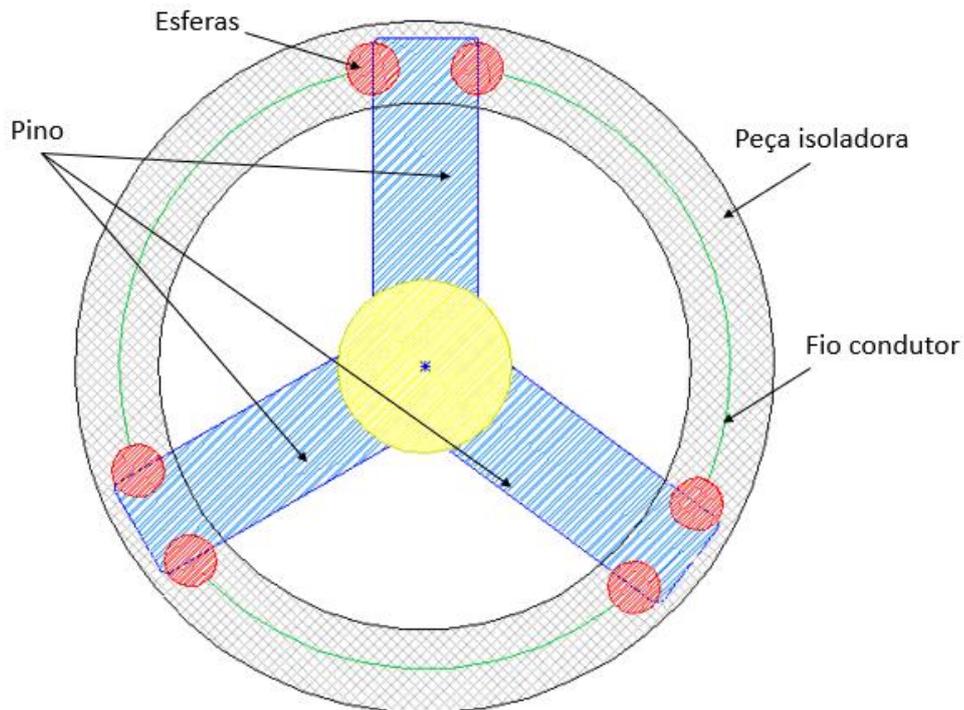


Figura 40 – Funcionamento do segundo esboço

Os pinos ficam posicionados de modo a fazer contacto em cada meia esfera, fechando assim o circuito e permitindo a passagem da corrente, sempre que há uma carga excessiva no sentido axial, estes levantam ligeiramente do contacto com as esferas, interrompendo o circuito e provocando o corte geral do mecanismo. Deste modo, é possível prevenir cargas excessivas no sentido axial, angular e cargas de torção. É um método bastante preciso e repetitivo, uma vez que basta haver um desencosto ao nível das centésimas, e o sistema fica imobilizado automaticamente.

3.2.2.2. Modelagem Tridimensional em CAD

O Sistema CAD, do inglês *Computer-Aided Design* (Desenho ou Projeto Assistido por Computador), é o nome geral dos sistemas computacionais utilizados pela engenharia, arquitetura, e *design* industrial para executar projetos e desenhos técnicos. Estes são *softwares* que permitem a criação de geometria em formato vetorial. Executam desenhos automáticos de conjuntos de peças, validam e verificam um *design* segundo as especificações e regras determinadas, criam desenhos técnicos e listas de materiais, permitem a saída direta de um modelo para máquinas de protótipos rápidos.

Com o CAD é ainda possível gerar automaticamente desenhos bidimensionais a partir de modelos sólidos, modelar superfícies, importar e exportam dados com formatos de diferentes programas, calcular propriedades de massa (entre outras) das peças e conjuntos criados, possuem funções paramétricas tridimensionais para modelagem de sólidos, facilitam na modificação do *design* do modelo e produção de múltiplas versões, mantêm uma biblioteca de peças e conjuntos criados, simulam mecanismos sem a necessidade de um protótipo físico, verificam a cinemática e interferência em peças e conjuntos e auxiliam a visualização com o uso de sombras, rotação, remoção de partes, efeitos de transparência e textura, permitindo a execução de imagens com acabamento fotográfico, antes da construção de um modelo físico [36].

O primeiro passo a efetuar na modelação é observar o esboço bidimensional e tentar replicar a ideia, olhando sempre para parâmetros de projeto e ajustando-as ao longo do mesmo. A Figura 41 mostra a vista geral do projeto e o seu aspecto final, a descrição dos componentes do sensor neste capítulo será feita de modo reverso, ou seja, primeiro dar a conhecer o aspeto final do sensor e os seus componentes, e posteriormente falar de cada componente e do seu mecanismo.

A Figura 42 mostra as dimensões gerais do sensor. Destacar o comprimento máximo de 100 mm, o que reflete um sensor relativamente compacto, no entanto, bastante robusto e com garantias de qualidade elevada.

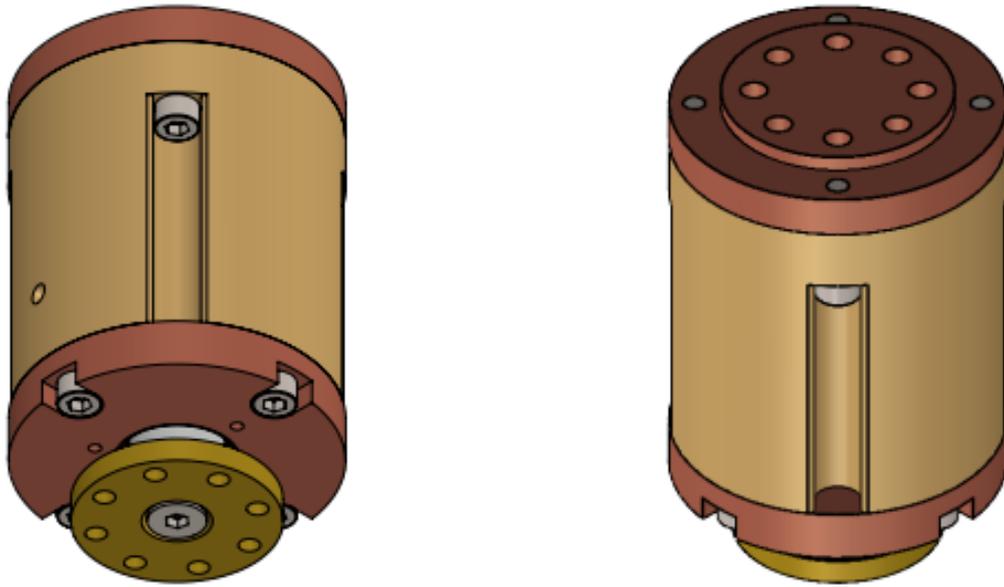


Figura 41 – Visão geral do projeto

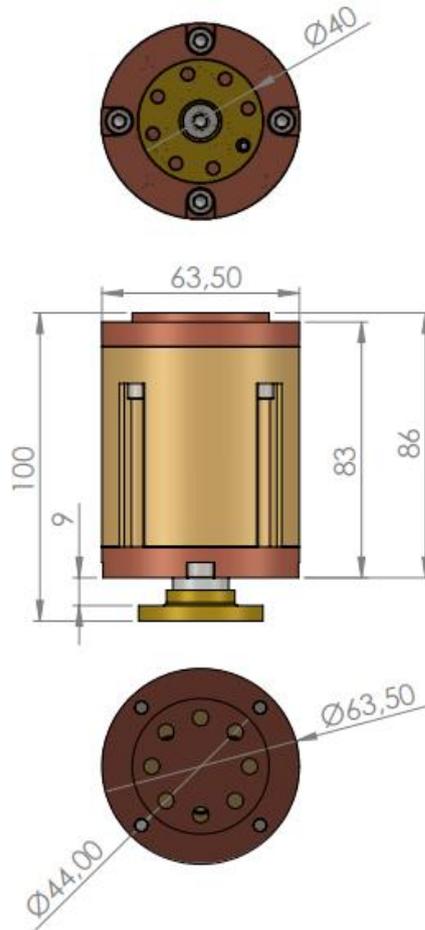


Figura 42 – Dimensões gerais do sensor

A Figura 43 mostra a vista explodida do sensor, bem como todas as peças que o constituem. No total o sensor é constituído por 20 componentes mecânicos que garantem a eficácia e eficiência do mesmo. Este é constituído essencialmente por 3 partes, são as seguintes:

- Corpo;
- Mecanismo de Funcionamento;
- Ligas utilizadas.

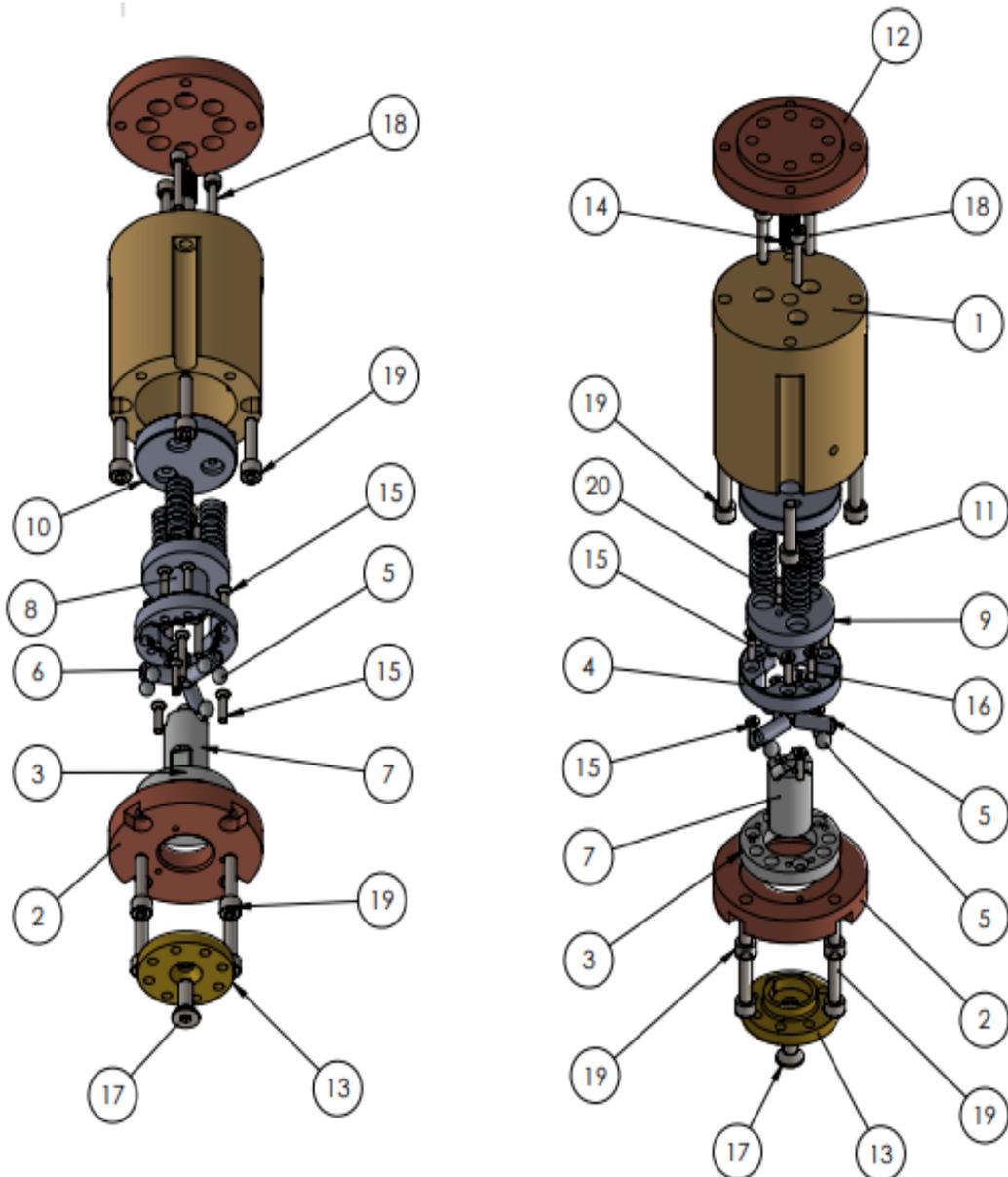


Figura 43 – Vista explodida do sensor

A Tabela 1 mostra a lista de componentes presentes no sensor, bem como a sua descrição e quantidades.

Tabela 1 – Lista de componentes do sensor

Item	Descrição	Qtd.
1	Corpo do Sensor	1
2	Base Inferior	1
3	Base Inferior Esferas	1
4	Base Superior Esferas	1
5	Esfera Ø6 mm	6
6	Pino Esférico Ø6 mm	3
7	Embolo	1
8	Cabeça do Embolo	1
9	Prato Suporte Molas	1
10	Prato Suporte Molas Superior	1
11	Molas	3
12	Flange Superior	1
13	Flange Inferior Ø40 mm	1
14	Perno – M10 x 30 mm	1
15	Parafuso ISO 10642 - M3 x 12 mm	10
16	Parafuso ISO 10642 - M3 x 20 mm	3
17	Parafuso ISO 10642 - M6 x 16 mm	1
18	Parafuso ISO 4762 M4 x 20 mm	3
19	Parafuso ISO 4762 M5 x 20 mm	8
20	Cavilha ISO 2338 h6 x 10 mm	3

3.2.2.2.1. Corpo do Sensor

A primeira peça a ser idealizada foi o corpo, este componente tem um tamanho de 65 mm, um diâmetro externo de 63,5 mm, um diâmetro interno de 42 mm e uma profundidade da caixa de cerca de 55 mm. Estas dimensões devem-se sobretudo ao facto de obedecer a um tamanho criterioso, devido à estrutura do robô KR 6 R1820, mostrada no capítulo 3.1.2.2. O corpo do sensor apresenta 4 furos de Ø5 mm no topo, de modo a permitir o acoplamento de uma flange, que posteriormente é conectada ao robô. Ainda na parte inferior, apresenta também 4 furos roscados M5, que permitem acoplar a base inferior, de modo a obter um sistema fechado. O furo roscado M10 serve para adicionar um perno que irá regular a compressão da mola, de modo a ajustar a sua força, este será explicado nos capítulos seguintes.

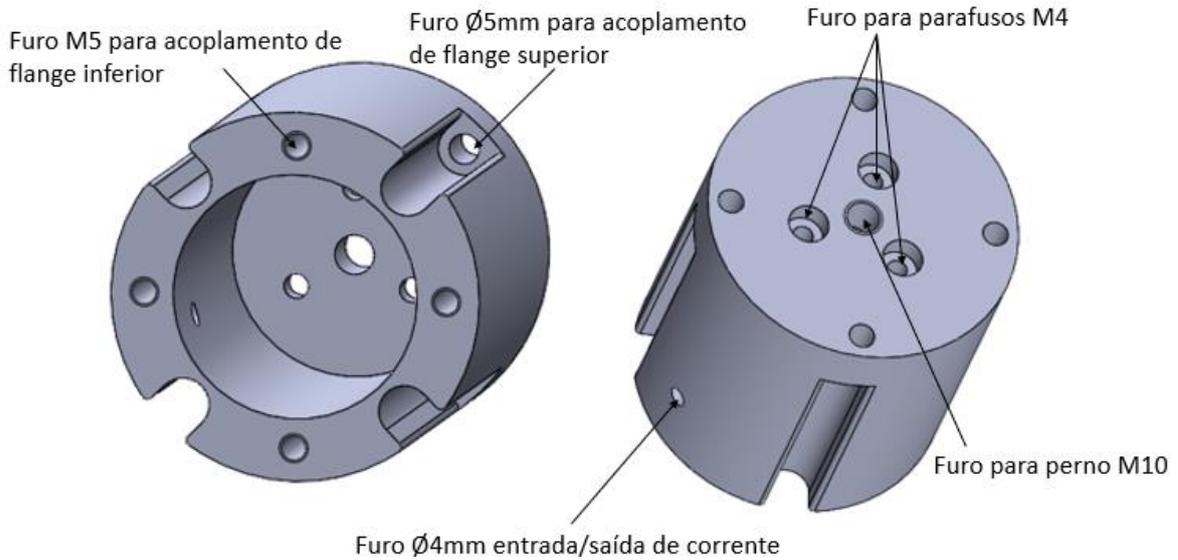


Figura 44 – Corpo do sensor

3.2.2.2.2. Mecanismo de funcionamento

O mecanismo de funcionamento irá trabalhar internamente dentro do corpo do sensor, este é constituído por 8 peças mecânicas, parafusos, esferas, pinos esféricos e um perno de afinamento da força das molas. A Figura 45 mostra a constituição do mesmo.

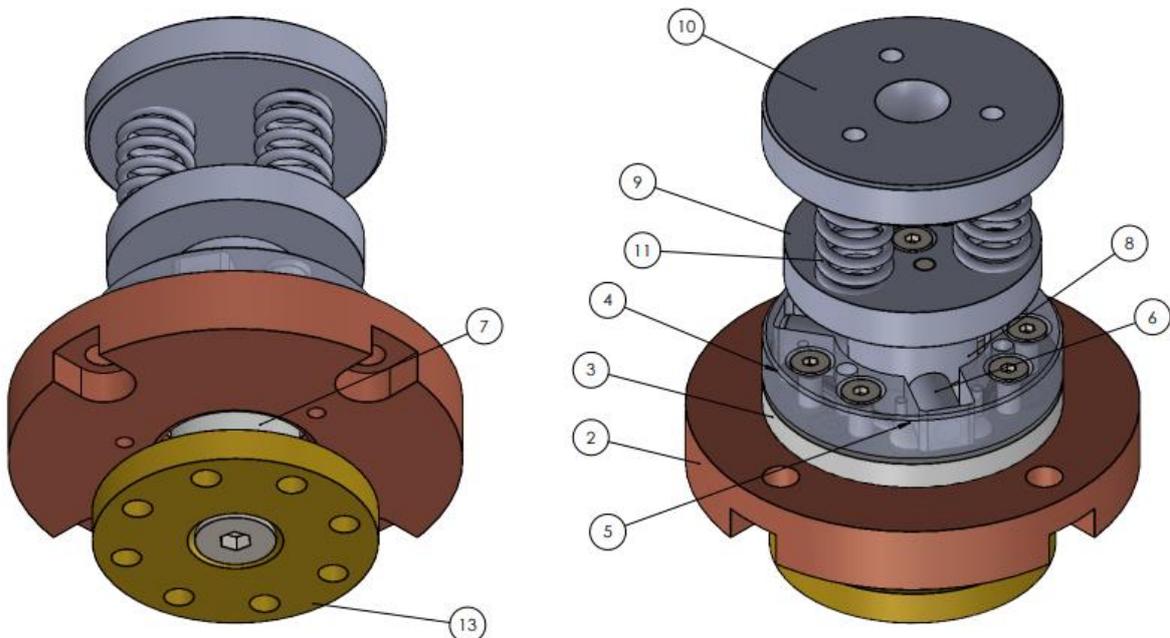


Figura 45 – Mecanismo do sensor

Na Figura 46 é possível observar o mecanismo num zoom efetuado. A base inferior que liga ao corpo do robô, suporta um prato isolante que contém 6 esferas metálicas, estas estão ligadas por um pino que está em contacto com meia esfera, também ele metálico. Estes pinos estão posteriormente ligados a um embolo que é constituído por duas peças isolantes.

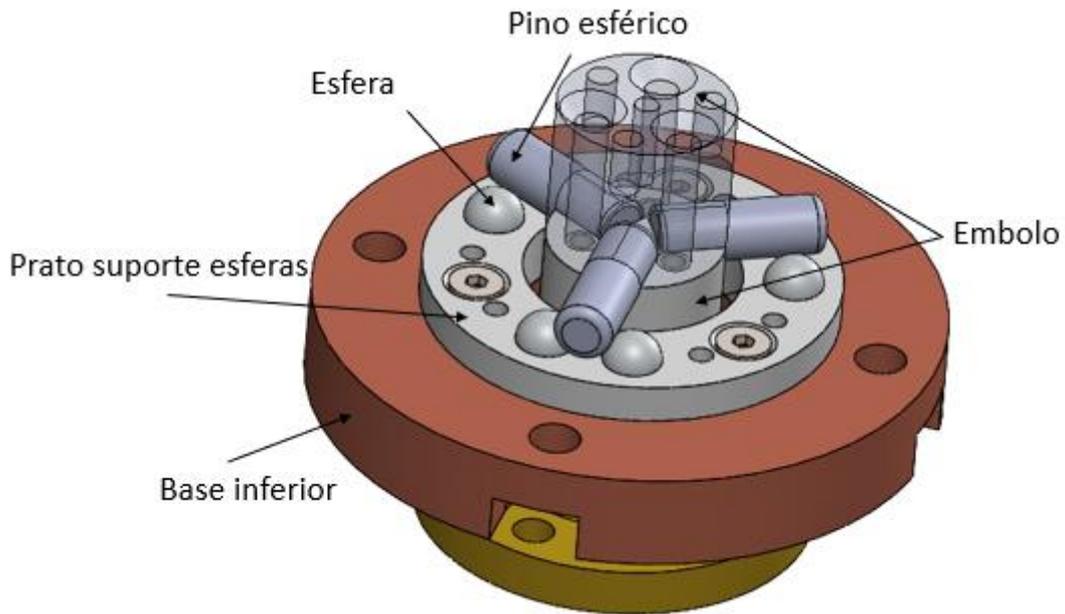


Figura 46 – Zoom do mecanismo

O embolo não entra em contacto com a base inferior, apenas está suspenso pelo contacto com as esferas, tem um movimento independente. A Figura 47, mostra o contacto mais detalhado dos pinos com as esferas.

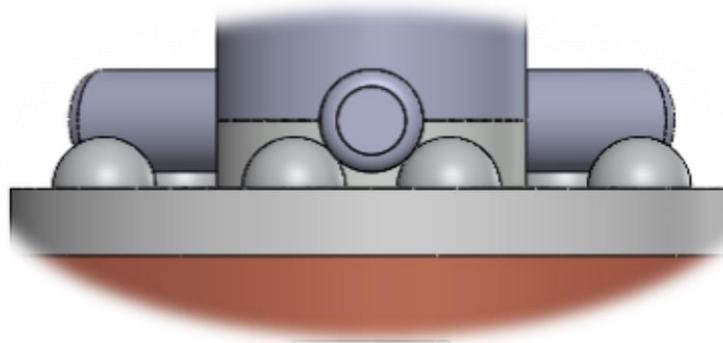


Figura 47 – Contacto do pino com as esferas

Posteriormente é adicionado um outro prato superior (Figura 48) que irá ser ligado ao prato inferior de suporte das esferas. O prato tem o objetivo de fazer a condução elétrica

entre as esferas, de forma a permitir que o circuito feche quando as esferas estão em contacto com os pinos esféricos.

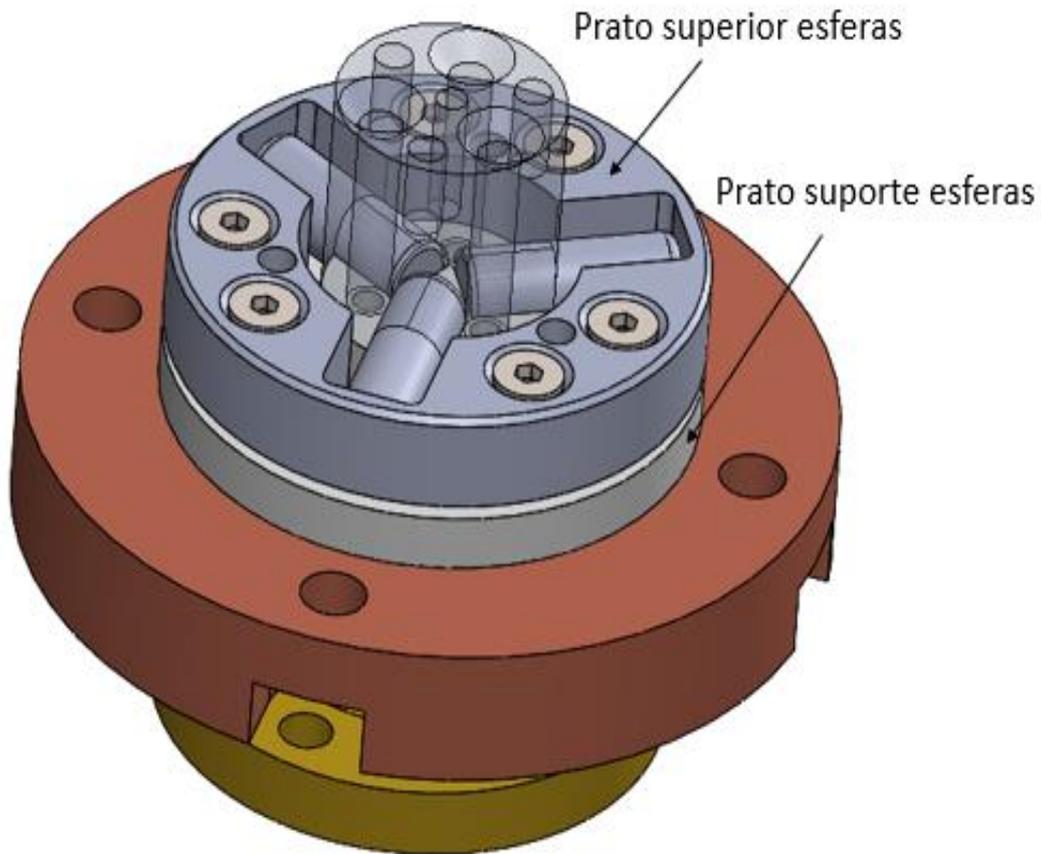


Figura 48 – Sistema com prato superior das esferas

A Figura 49 mostra o prato superior das esferas em pormenor, observado através da vista inferior, é possível visualizar que este contém cavidades para o alojamento das esferas, sendo este componente pressionado contra as esferas por intermédio de parafusos M3. O componente contém cavidades que permitem a passagem de fios condutores (Figura 50), fazendo a ligação entre as esferas, no entanto, para o circuito efectuar a passagem de corrente, é necessário o contacto perfeito com os pinos esféricos. A peça contém ainda aberturas para a passagem dos pinos, de modo a terem espaço de manobras para efectuar a sua devida função.

Cavidade de alojamento da meia esfera

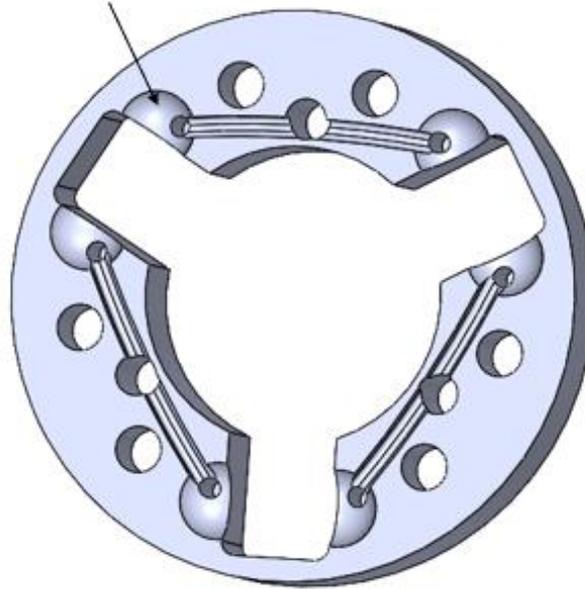


Figura 49 – Prato superior das esferas

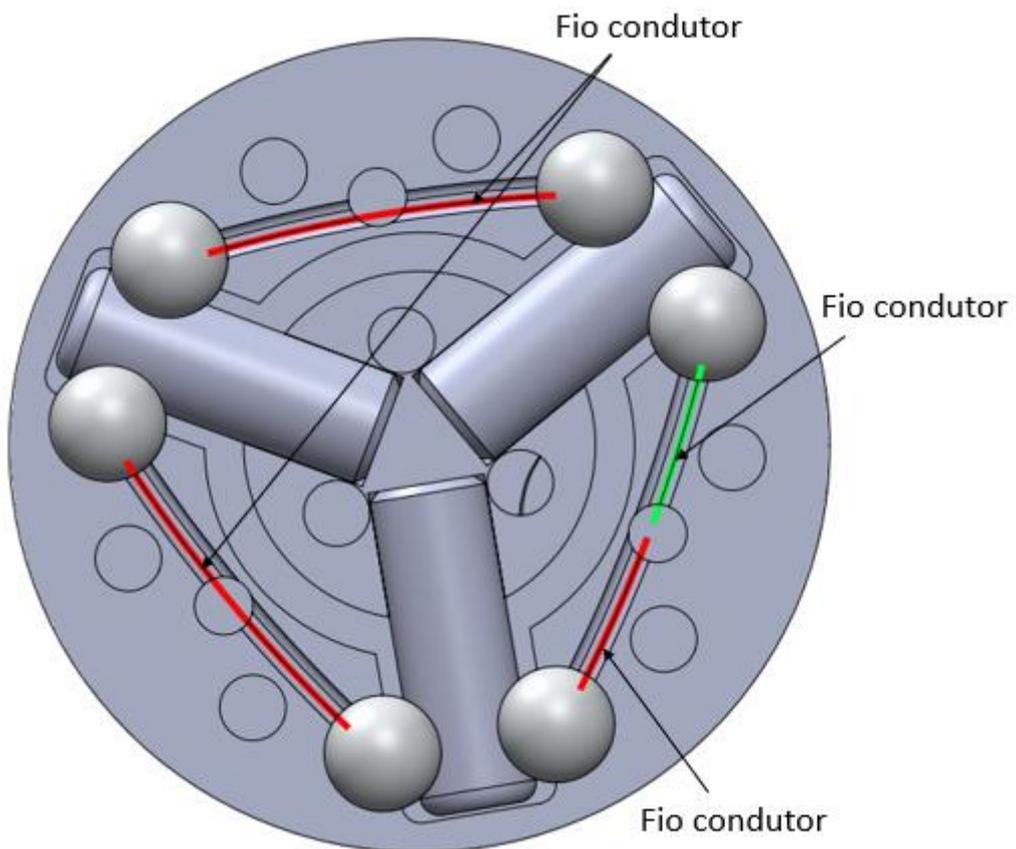


Figura 50 – Condução elétrica pelas esferas

Posteriormente ligada á face inferior do embolo, está uma flange de acoplamento (Figura 51), idêntica à flange do robô KR 6 R1820, o embolo entra dentro da flange e tem uma face maquinada, que impede a sua rotação, e restringe a sua colocação a um só posicionamento. A flange apresenta furos roscados M5 e é fixa por intermédio de um parafuso M6, na zona inferior, é nesta flange que vão ligar garras ou objetos que sejam possíveis de acoplar ao sensor.

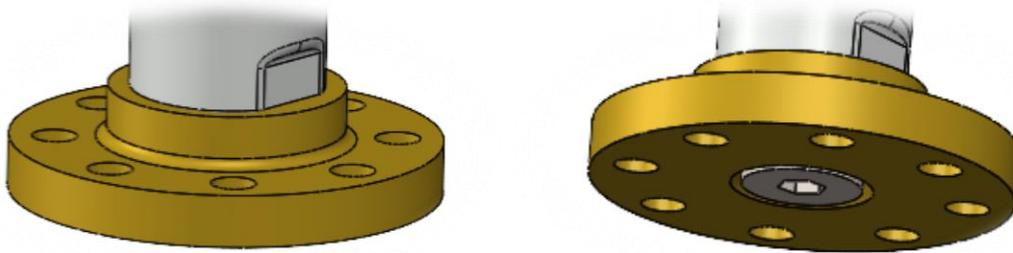


Figura 51 – Flange de acoplamento inferior

Na zona da cabeça do embolo, é colocado um prato (Figura 52) que é posicionado através de 3 cavilhas de $\varnothing 3$ mm e um parafuso, este componente contém 3 cavidades, cujo objetivo final é servir de suporte para a colocação de 3 molas helicoidais de compressão. Estas molas têm o objetivo de garantir a força suficiente de forma a manter os pinos esféricos posicionados contra as esferas, e apenas permitir que estes levantem das mesmas quando a carga efetuada na flange inferior é superior à força resultante das molas.

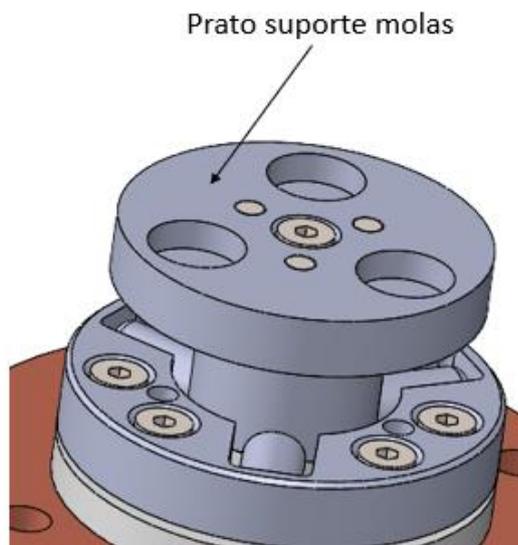


Figura 52 – Prato suporte de molas

As molas estão ligadas a um novo prato (Figura 53), que contém uma cavidade na sua base, onde a mola entra, de modo a prevenir a flambagem da mesma. Este prato por sua vez, no topo, contém furos roscados M4, e uma cavidade cilíndrica que servirá para ajustar a força das molas. Referir que no esboço bidimensional, apenas estava idealizada uma mola ao centro, no entanto, no decorrer do projeto, essa ideia sofreu uma alteração, e passou a figurar 3 molas estrategicamente colocadas.

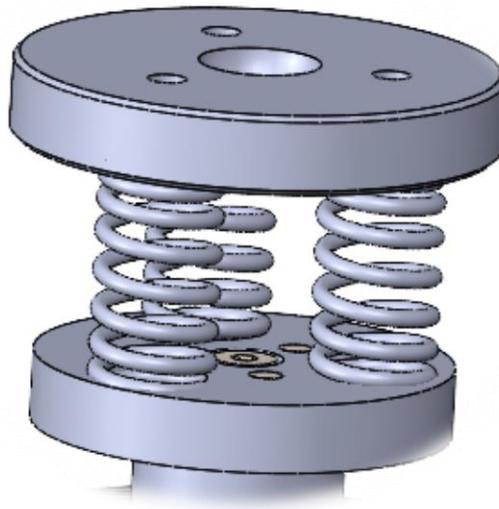


Figura 53 – Prato suporte de molas superior

A Figura 54, mostra o funcionamento do perno de ajuste, e permite perceber que os parafusos M4 apenas funcionam para estabilização do prato, evitando que este se mova involuntariamente.

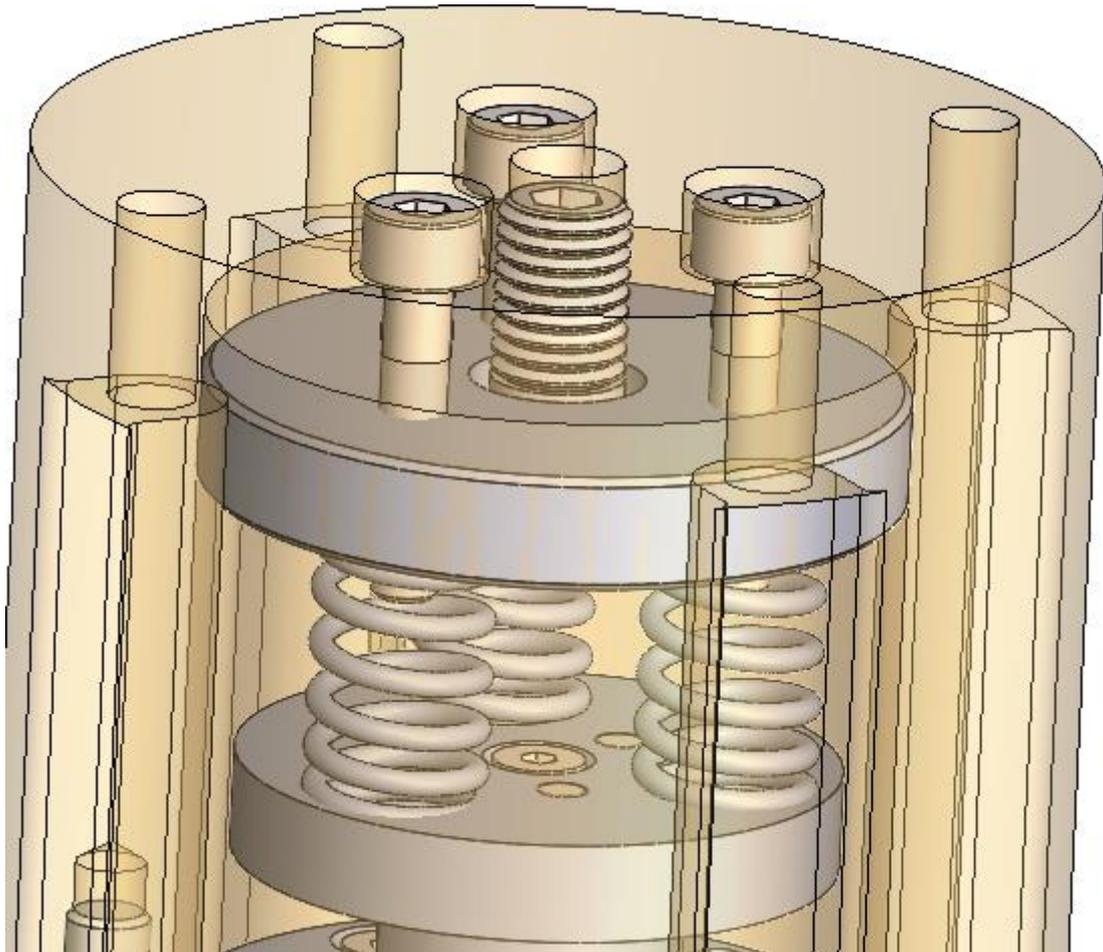


Figura 54 – Funcionamento do perno de ajuste

O sistema cumpre os requisitos delineados no início do projeto, ao aplicar uma carga axial F_1 (Figura 55) na flange, os pinos irão levantar das esferas se $F_1 > F_2$, interrompendo assim o circuito de passagem de corrente, provocando a paragem do robô, para prevenção de danos as ferramentas. Por outro lado, se for efetuada uma força lateral $F_3 > F_2$, um dos pinos irá levantar e também impedir a passagem da corrente.

Se for efetuada uma torção superior para vencer a força da mola, o pino irá levantar de uma das esferas e interrompe o circuito (Figura 56).

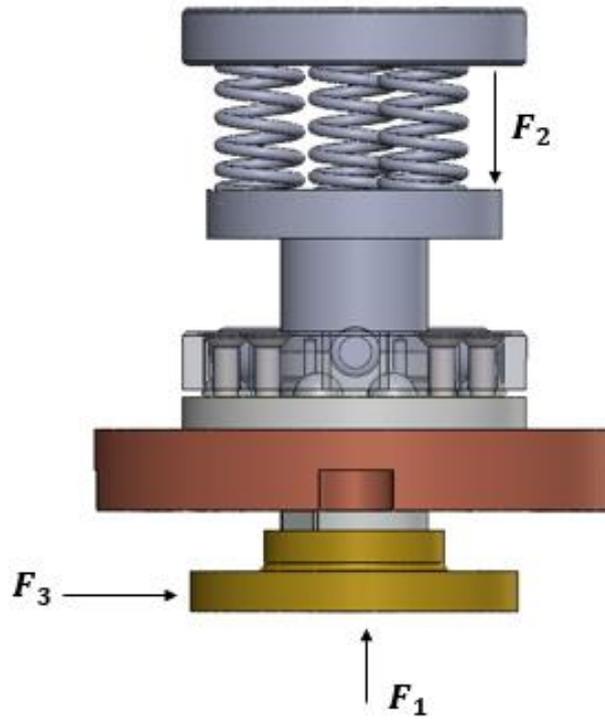


Figura 55 – Carga axial e angular

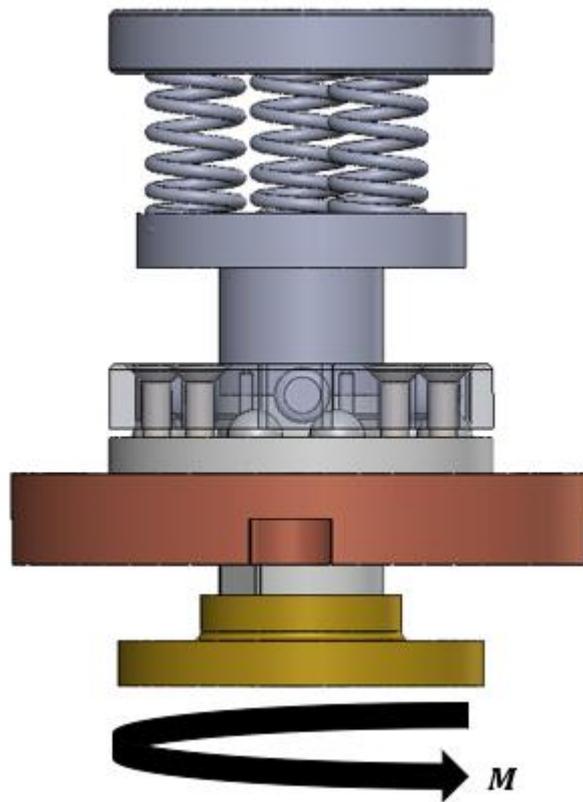


Figura 56 – Carga rotacional



A mola a utilizar varia consoante o espaço de trabalho e a sua aplicação, no projeto em questão calculou-se a mola ideal. A constante da mola helicoidal é dada pela equação 35.

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (35)$$

Onde,

d – Diâmetro do arame (mm);

G – Módulo de corte (GPa);

D – Diâmetro da mola (mm);

N_a – Número de espiras ativas.

Por sua vez o número de espiras ativas varia consoante o tipo de extremidade da mola (Tabela 2). A extremidade escolhida foi esquadrada e esmerilhada.

Tabela 2 – Tipos de extremidade de molas

Tipos de extremidades de molas				
Termo	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espiras de extremidade	0	1	2	2
Espiras totais, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Comprimento livre, L_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Comprimento indefletível, L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Passo, p	$(L_0 - d)/N_a$	$L_0/(N_a + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_a$	$(L_0 - 2d)/N_a$

Como tal N_a é dado por,

$$N_a = \frac{(L_0 - 2d)}{p} \quad (36)$$

De modo a efetuar a escolha da mola optou-se por escolher entre molas padrão, no site da FANAMOL. Após uma seleção criteriosa houve 3 molas que preencheram os critérios de aceitação, critérios esses que foram escolhidos devido á limitação no espaço do sensor, deste modo a mola não deveria ter um diâmetro superior a $\varnothing 10,5$ mm, e um comprimento livre superior a 22 mm. As características das molas são representadas na Tabela 3, em milímetros. O material das molas é Inox AISI 302 ($G=77,2$ GPa).



Tabela 3 – Características das molas

Molas helicoidais				
Modelo da mola	L_0	D_e	d	p
S-261	21,5	10,3	1,245	4
S-1383	22	9	1,473	3
S-1998	20,5	8,6	1,651	3

Deste modo, através das equações 35 e 36, obteve-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da constante das molas

Molas helicoidais			
Modelo da mola	K (N/mm)	Deflexão da mola (mm) F=20N	Deflexão da mola (mm) F=40N
S-261	4,46	4,47 mm	8,95 mm
S-1383	9,81	2,03 mm	4 mm
S-1998	19,66	1 mm	2 mm

Após os cálculos efetuados, a escolha da mola recaiu sobre o modelo S-1383, esta escolha deveu-se ao facto de o robô nunca levantar pesos superiores a 6kg, no máximo iria comprimir 6 mm, no entanto uma vez que estamos a falar de 3 molas em paralelo, o prato apenas irá comprimir 2 mm, o que é suficiente para desativar o sistema e entrar em segurança. Por outro lado, ao ajustar o perno, consegue-se comprimir previamente a mola e aumentar o K caso seja necessário.

Houve ainda a necessidade por questões de segurança de verificar a flambagem da mola, esta é dada pela equação 37.

$$L_0 < 5,26 D_e \quad (37)$$

Embora a flambagem dificilmente acontece-se no caso em questão, uma vez que as molas estão dentro de caixas, verificou-se na equação 37 que $22 \text{ mm} < 47,34 \text{ mm}$, o que garante que não ocorre flambagem.



3.2.2.2.3. Ligas utilizadas

É necessária uma escolha assertiva do material a utilizar no sensor, esta escolha tem a ver com as características mecânicas dos mesmos. Sendo que existe um fator bastante importante a considerar, a densidade mássica, quanto menor densidade mássica tiver o material, melhor para o projeto, no entanto, há que olhar para as características mecânicas em função do peso e perceber qual satisfaz as necessidades do projeto.

No caso das peças não isolantes considerou-se uma análise efetuada a 3 materiais, Al 7075-T6, Al 6061-T6 e CK45. No caso dos componentes que têm de apresentar um material isolante, considerou-se para análise o POM e Nylon 101, as características mecânicas dos materiais encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Características mecânicas dos materiais

Características mecânicas	Materiais				
	Metais			Polímeros	
	Al 7075-T6	Al 6061-T6	CK45	POM	Nylon 101
Módulo elástico ($\frac{N}{mm^2}$)	72000	69000	210000	2600	1000
Coeficiente de Poisson	0,33	0,33	0,28	0,3859	0,3
Módulo de corte ($\frac{N}{mm^2}$)	26900	26000	79000	932,8	-
Densidade mássica ($\frac{kg}{m^3}$)	2810	2700	7800	1390	1150
Tensão de rotura ($\frac{N}{mm^2}$)	570	310	750	71,5	79,29

Ao observar as características mecânicas dos materiais a escolha nas ligas metálicas recaiu sobre o Al 7075-T6, embora a densidade mássica seja 4% superior ao Al 6061-T6, apresenta umas características mecânicas superiores em tudo o resto, a diferença de peso não irá ser notório no funcionamento do sistema. O CK45 apesar de ser um aço relativamente barato e fácil de maquinar, apresenta de facto características mecânicas superiores exceto na densidade mássica, que de facto aqui tem um papel principal.

No caso dos materiais isolantes a escolha recaiu sobre o POM, embora o nylon apresentava melhores propriedades a nível de densidade mássica, no entanto, muitas das restantes propriedades são inferiores. Em questões de peso, o nylon apresenta uma redução de 20% face ao POM, mas há aqui um fator bastante importante a acrescentar, em termos de maquinação, o POM é um material mais fácil de maquinar e que resiste a temperaturas



elevadas, que surgem precisamente na maquinação. Acrescentar ainda que possivelmente o custo do nylon ficaria mais caro devido à maquinação ter de ser bastante mais cuidada.

A Tabela 6 evidencia o peso dos componentes do sensor, sem contabilizar os parafusos e as molas.

Tabela 6 – Peso dos componentes do sensor

Item	Descrição	Al 7075-T6 (g)	POM (g)
1	Corpo do Sensor	310,15	-
2	Base Inferior	66,45	-
3	Base Inferior Esferas	-	7,36
4	Base Superior Esferas	-	6,51
5	Esfera Ø6 mm	-	-
6	Pino Esférico Ø6 mm	1,33	-
7	Embolo	-	8,44
8	Cabeça do Embolo	-	8,73
9	Prato Suporte Molas	13,54	-
10	Prato Suporte Molas Superior	24,81	-
11	Molas	-	-
12	Flange Superior	71,8	-
13	Flange Inferior Ø40 mm	17,1	-

No total, é possível constatar que o peso dos componentes sem parafusos e molas é de cerca de 530g, com consumíveis adicionados chega aos 560g, valores relativamente baixos e que estão de acordo com as linhas do projeto iniciais.

Quanto ao custo dos componentes, é difícil avaliar, uma vez que são peças maquinadas, algumas com complexidade e de elevado grau de minuciosidade, por esse motivo não foi possível contabilizar o preço estimativo.

3.3. Análise funcional

Devido às restrições do projeto, tais como materiais, maquinação e experiência do projetista, foi desenvolvido apenas um modelo de protótipo utilizando uma impressora 3D com material plástico PLA (Ácido Poliláctico). A fim de verificar o desenvolvimento do sensor robótico, será demonstrado os materiais que são utilizados para desenvolver o mesmo, tal como a impressora 3D utilizada para prototipação do projeto.

O PLA é biodegradável, compostável, proveniente de milho, mandioca, beterraba, etc. e facilmente reciclável, desde que essa reciclagem ocorra com plásticos de PLA puro ou



na proporção de até 1% de PLA, com 99% de resinas convencionais. Existem muitos fabricantes de filamento PLA, mas no geral este produto costuma apresentar características semelhantes, são as seguintes:

- Precisão: $\pm 0,02$ mm;
- Densidade: $1,24\text{g/cm}^3$;
- Temperatura de impressão: 190°C a 230°C ;
- Temperatura da Mesa : 60°C ;
- Tg (temperatura de cristalização): 60°C ;
- Tm (temperatura de fusão): 180°C .

Destaca-se algumas vantagens do PLA em relação aos demais materiais:

- Facilidade de impressão: Este filamento normalmente imprime bem em qualquer tipo de impressora 3D e com temperatura mais baixas (180°C), sendo mais fácil de configurar para alcançar bons resultados.
- Baixo custo: se considerarmos a diversidade de materiais, o PLA é um dos mais baratos. É uma ótima opção para peças simples que não exigem propriedades mecânicas especiais.
- Ausência de vapores: O PLA não solta gases tóxicos quando é aquecido, bastante diferente dos filamentos derivados do petróleo, como o ABS e PETG. Pode ser utilizado mesmo em ambientes pouco ventilados sem o uso de máscara.

No entanto, umas das desvantagens do PLA é ser um material que tem pouca resistência à flexão, sobretudo quando utilizado em Impressoras 3D, ou quando comparado com outros materiais, tais como o ABS ou PETG. Apesar disso, é incomum que peças cotidianas necessitem propriedades mecânicas específicas. Outra desvantagem é o facto da temperatura de fusão ser baixa, o que é uma vantagem na hora de imprimir, mas acaba por ser uma desvantagem quando utilizado para peças que ficam expostas ao sol ou temperaturas mais elevadas.

De modo que fosse possível imprimir os protótipos, foi necessário a utilização de uma impressora 3D. A máquina utilizada para tal função foi uma Anet A8, que pode ser observada na Figura 57 e foi disponibilizada pela Escola Superior de Tecnologia de Abrantes. O *software* usado para a compilação dos dados para a impressora 3D é o *Ultimaker Cura*.

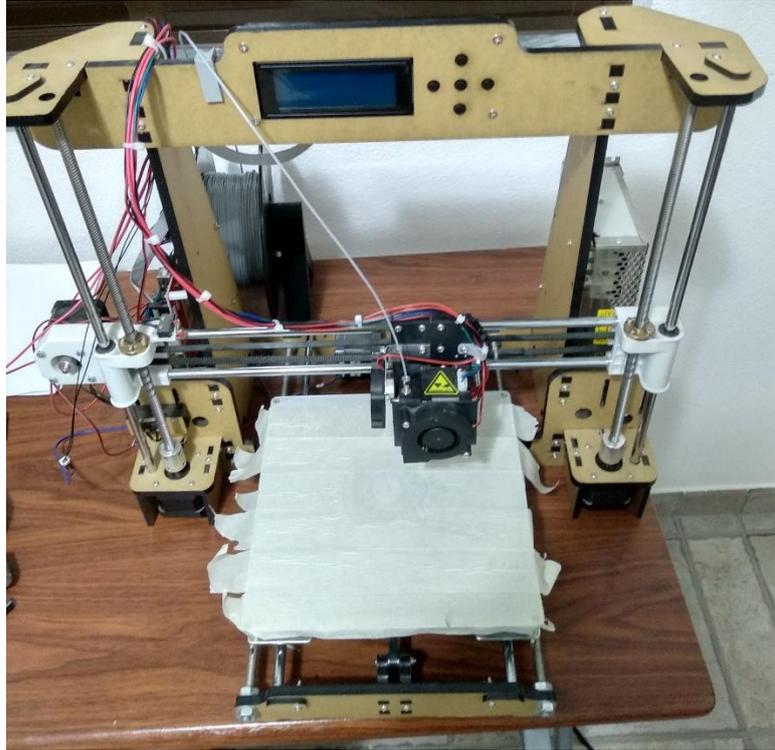


Figura 57 – Anet A8

Após a afinação da impressora começou por ser impresso o protótipo do sensor. Numa fase inicial foi impresso o prato das molas e o embolo que é a constituição de duas peças, a impressão apresenta boa qualidade, como mostra a Figura 58.



Figura 58 – Impressão 3D prato das molas e embolo

Posteriormente foi impresso o sistema que é constituído pela base inferior, base inferior das esferas e base superior das esferas. Na Figura 59, é possível observar o sistema conjugado, já com as esferas no devido local e os fios condutores colocados.

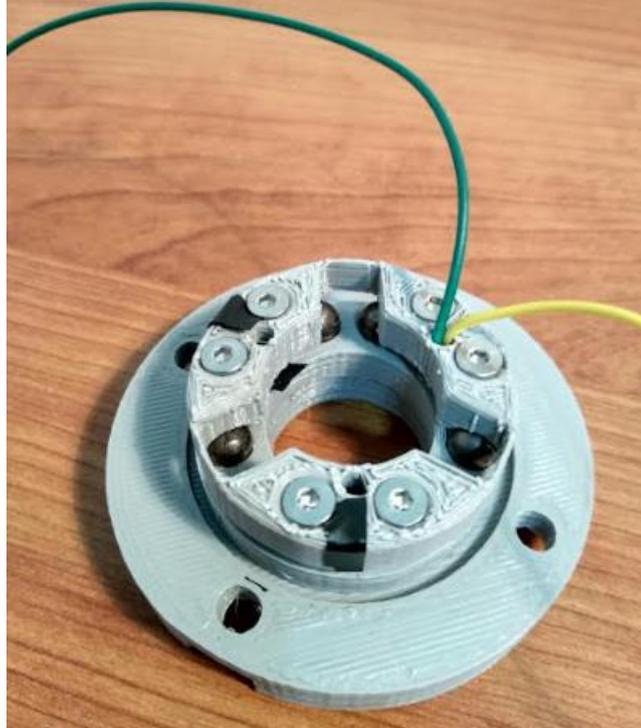


Figura 59 – Impressão 3D base inferior, base inferior/superior esferas

A Figura 60 e Figura 61, mostram o sistema conjugado do embolo e dos pinos no posicionamento correto sobre as esferas, bem como a flange inferior já impressa e colocada, exatamente como idealizado no projeto.

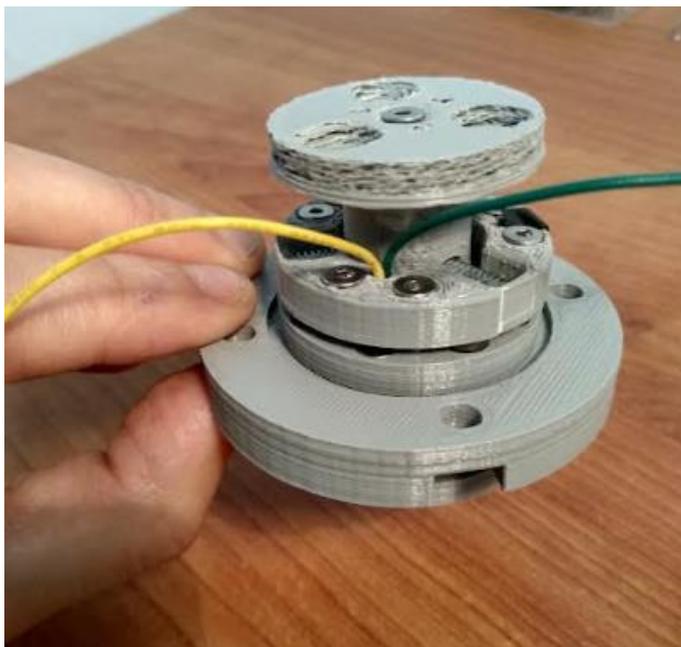


Figura 60 – Sistema conjugado do embolo 1

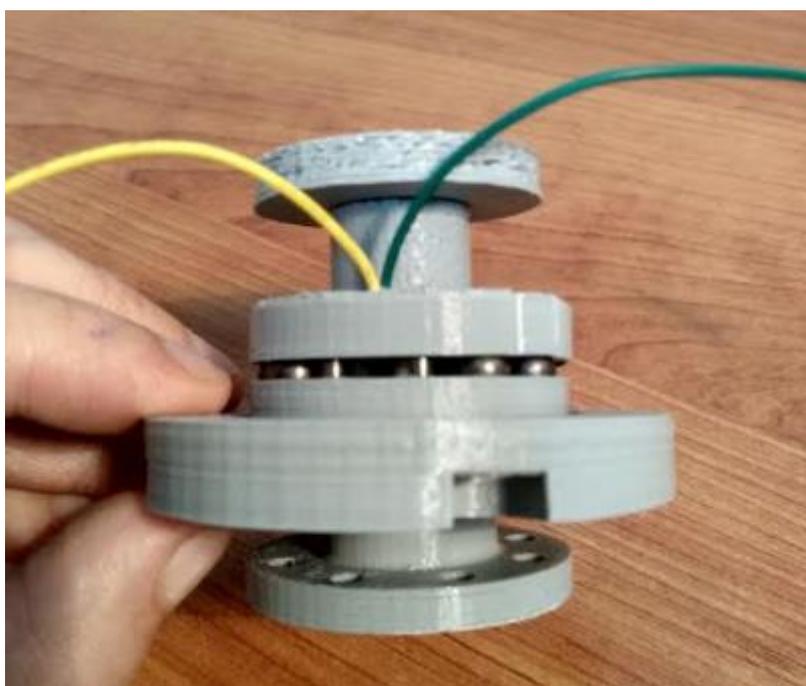


Figura 61 – Sistema conjugado do embolo 2

Por fim foi impresso o corpo do sensor e a flange superior (Figura 62), todo o sistema foi devidamente conjugado, colocadas as molas e o prato de suporte de molas superior.



Figura 62 – Corpo sensor e flange

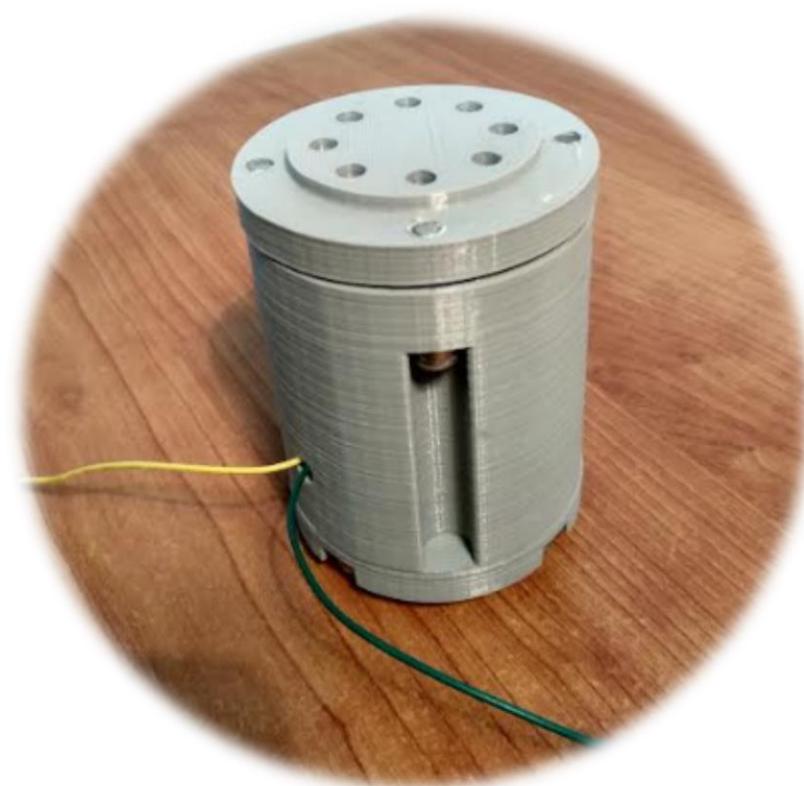


Figura 63 – Ensaio sensor



O sistema desenvolvido foi posteriormente testado e analisado, onde se verificou que tudo funcionou de acordo com o espectável. Com recurso a um multímetro, foi testado o circuito e verificou-se que existia a passagem de corrente quando os pinos estavam em contacto com as esferas, em situação de repouso. Foi ainda testado a aplicação de uma força no sentido axial, angular e de torção. O sistema comportou-se tal como previsto, sendo que não foi possível produzir o teste com bastante precisão, uma vez que os componentes foram impressos em PLA e este material não apresenta uma consistência sólida para a realização de testes precisos.

Inicialmente houve algumas dificuldades com a impressão, uma vez que a impressora apresentava algumas discrepâncias nas peças com medidas mais reduzidas em relação ao modelo idealizado em CAD. Foi necessário efetuar alguns ajustes de modo que as cotas ficassem em conformidade com o desenho. Outra complexidade que surgiu, foi a abertura de rosca no PLA, sendo este um material macio e que aquece bastante com o atrito, o ponto de fusão baixo contribui para que ao efetuar um movimento que cause calor, o material comece a derreter e porventura não fique a rosca perfeita, estragando muitas das vezes a utilidade da peça.



4. Conclusão

O desenvolvimento do projeto possibilitou a projeção de um sensor anticolisão robótico mediante metodologia de desenvolvimento de produto conforme os requisitos definidos ao longo do mesmo. O trabalho baseou-se numa proposta de baixo peso e alta eficiência, utilizando materiais de fácil aquisição no mercado nacional. Através do desenvolvimento do sensor, além de uma pesquisa efetuada dentro da área, foi possível realizar a impressão do sistema e posteriormente uma análise funcional.

A nível de revisão bibliográfica, esta permitiu compreender de um modo mais clarificado, a importância da robótica na indústria e a crescente aplicação da mesma ao longo dos anos. Percebeu-se ainda que as instalações de robôs industriais na Europa diminuíram 8% em 2020 face ao ano de 2019. Este foi o segundo ano de declínio, após um pico de 75.560 unidades em 2018. Por outro lado, a Alemanha, que pertence aos cinco maiores mercados de robôs do mundo (China, Japão, EUA, Coreia, Alemanha) tem uma quota de 33% do total de instalações de robôs na Europa.

Através do estudo sobre a cinemática de robôs foi possível compreender a movimentação dos mesmos, bem como os cálculos associados aos vários graus de liberdade que permitem o robô executar um movimento. Estes cálculos podem ser realizados na cinemática direta ou inversa. Sendo que o resultado da cinemática direta provém da equação do braço, para cada tipo de robô, conforme a configuração do mesmo, já na cinemática inversa, envolve a determinação da posição das juntas ativas a partir da posição generalizada do órgão terminal.

No campo dos robôs colaborativos tem havido uma incidência de crescimento, no entanto, em 2019, apenas 16.000 dos mais de 373.000 robôs industriais instalados eram *cobots*. A explicação dos problemas que ainda persistem nos dias de hoje em relação aos robôs colaborativos, é a segurança que demonstram para com o colaborador. É um campo difícil de combater, uma vez que os robôs são programados para executar determinadas tarefas, seguindo linhas de orientação pré-definidas. Foi ainda elaborada uma pesquisa em relação, onde foi possível identificar um estudo realizado por Sebastian Blankemeyer *et al.* [31], que investigou um método para a avaliação de risco dos *cobots*.

No capítulo dos sensores, Segundo *Groover* [23] os mais utilizados na robótica principalmente para interação com o ambiente, podem ser divididos nas categorias de sensores táteis, proximidade e de alcance, sensores diversos e sistemas baseados em sensores



e por último sistemas de visão mecânica. Uma das aplicações importantes da tecnologia de sensores no fabrico automático é o controlo da segurança ou dos riscos que concomitantemente com a proteção do ser humano trabalhadores que trabalham nas proximidades do robô ou outro equipamento.

Em relação ao desenvolvimento do sensor anticolisão robótico, o princípio de funcionamento do sensor está relacionado com o corte de corrente após a detenção de uma carga excessiva efetuada na ponta final do robô, carga esta que é afinada por intermédio de um sistema de molas. Após a carga efetuada ultrapassar um valor de força estipulado, ocorre o corte de sinal de modo que o robô evite ou interrompa o movimento de colisão. O sensor foi idealmente projetado para trabalhar no robô KUKA KR 6 R1820. Através da pesquisa bibliográfica realizada sobre o tema em epígrafe, percebeu-se que existe vários métodos que foram estudados ao longo dos anos de modo evitar contatos involuntários com os humanos.

O primeiro passo para o desenvolvimento do sensor foi identificar as restrições que o projeto continha, estas restrições foram definidas pelo projetista. Após identificação das mesmas, foi analisada uma análise da competitividade, procedeu-se a uma pesquisa ao mercado de trabalho e foi possível constatar 3 empresas que fabricam sensores anticolisão próximos do pretendido neste projeto. As empresas em questão são: *OnRobot*, *Robotiq* e *ATI*. O segundo passo passou pelo esboço bidimensional, foi necessário começar a definir ideias e a esboçar as mesmas. Foi das fases mais importantes no projeto, pois permitiu discutir ideias com base nas pesquisas desenvolvidas ao longo do projeto, bem como chegar a um esboço final que serve de suporte para posteriormente passar à fase tridimensional. O esboço dimensional teve 2 fases, em que a segunda surgiu principalmente para corrigir erros identificados na primeira. O terceiro passo foi a modelagem tridimensional em CAD, deste modo foi possível a partir de um desenho 2D, idealizar e desenhar em 3D, de forma a projetar o sistema ideal, bem como calcular propriedades de massa (entre outras) das peças e conjuntos criados. Neste capítulo foi analisado em detalhe o mecanismo de funcionamento do robô e a escolha dos materiais que constituem os vários componentes. A Figura 64 ilustra o sensor desenvolvido, aplicado em formato 3D no robô KUKA KR 6 R1820.

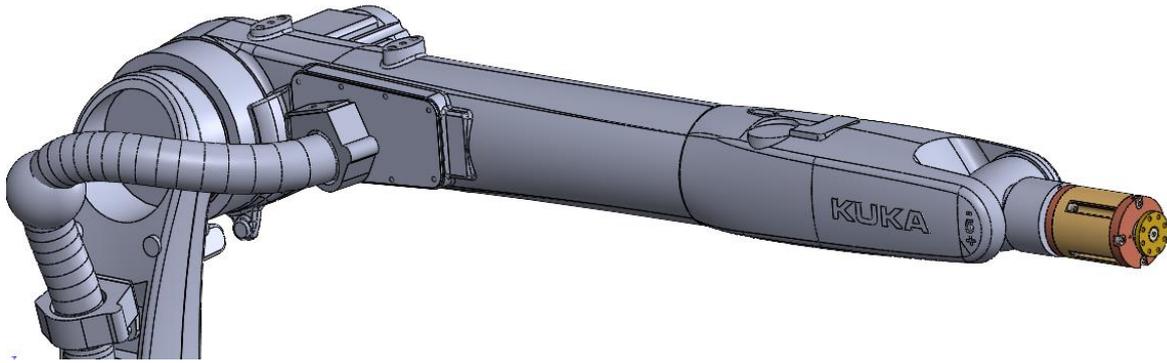


Figura 64 – Sensor anticolisão robótico aplicado no robô KUKA KR 6 R1820

Por último foi efetuado uma análise funcional ao sistema, devido às restrições do projeto, tais como materiais, maquinação e experiência do projetista (autor), foi desenvolvido apenas um modelo de protótipo utilizando uma impressora 3D com material plástico PLA (Ácido Poliláctico). Verificou que tudo funcionou de acordo com o esperado. Com recurso a um multímetro, foi testado o sensor, quando aplicada uma força no sentido axial, angular e uma força de torção, verificou-se que quando esta força era superior às forças das molas, havia o corte da passagem de corrente, que era garantido quando os pinos estavam a tocar nas esferas, numa situação de repouso. Não foi possível fazer o teste com bastante precisão, uma vez que os componentes foram impressos em PLA e este material não apresenta uma consistência sólida para a realização de testes precisos.

Recomendações

Como trabalho futuro sugere-se ainda simulação das forças aplicadas através do método de elementos finitos. Seria importante realizar ainda testes com o sensor implementado no robô, e posteriormente compará-los com os resultados da simulação numérica. Sensor este que teria de ser previamente fabricado com os materiais idealizados no projeto.

Um outro ponto importante seria realizar um estudo sobre a possibilidade de otimizar o sensor quanto ao sistema de afinação da força, um sistema que continha uma câmara isobárica, que fosse possível regular a pressão em tempo real através de um sistema computacional, deste modo a força que seria necessário para vencer o sistema podia ser ajustada com uma precisão mais elevada.



Referências bibliográficas e webgráficas

- [1] W. Li, Y. Han, J. Wu, and Z. Xiong, “Collision Detection of Robots Based on a Force/Torque Sensor at the Bedplate,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 5, pp. 2565–2573, 2020, doi: 10.1109/TMECH.2020.2995904.
- [2] “ISO 8373:2012 Manipulating industrial robots – Vocabulary.” 2012.
- [3] B. Roth, “‘Principles of Automation,’ Future Directions in Manufacturing Technology,” *Unilever Res.*, 1983.
- [4] J. Craig, *Introduction to ROBOTICS mechanics and control*, 4th ed. Kirby Street, London, 2018.
- [5] World Robotics, “Executive Summary - World Robotics (Industrial & Service Robots) 2016,” *World Robot. Rep. - Exec. Summ.*, pp. 11–18, 2016.
- [6] A. S. Bisen and H. Payal, “Collaborative robots for industrial tasks: A review,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.263.
- [7] A. . Leite, T. Antonio, P. From, and L. Hsu, “Control and obstacle collision avoidance method applied to human-robot interaction,” *IEEE Int. Work. Adv. Robot. its Soc. Impacts*, pp. 1–8, 2015.
- [8] S. Kunh and D. Henrich, “Fast vision-based minimum distance determination between known and unknown objects,” *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 2186–2191, 2007.
- [9] R. Dahiya, P. Mittendorfer, M. Valle, G. Chang, and V. . Lumelsky, “Directions Toward Effective Utilization of Tactile Skin: A Review,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 11, pp. 4121–4138, 2013.
- [10] A. Cirillo, F. Ficucuello, C. Natale, S. Pirozzi, and L. Villani, “A Conformable Force/Tactile Skin for Physical Human Robot Interaction,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 1, pp. 41–48, 2016.
- [11] Y. Han, J. WU, and Z. Xiong, “A new method for sensorless collision detection on the servo level,” *2017 IEEE Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, pp. 553–558, 2017.
- [12] M. Geravand, F. Flacco, and A. D. Luca, “Human-robot physical interaction and collaboration using an industrial robot with a closed control architecture,” *2013 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4000–4007, 2013.
- [13] S. Niku, *Introduction To Robotics Analysis, Control, Applications*, 2nd ed. Danvers,



- EUA, 2011.
- [14] International Federation of Robotics, “Robot History - Timeline.” <https://ifr.org/robot-history>.
- [15] G. Imahara, *Empowering Innovation Together*, 2nd ed. 2018.
- [16] MARCELO DE OLIVEIRA CARDOSO, “INDÚSTRIA 4.0: a quarta revolução industrial,” Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2016.
- [17] R. Drath e A. Horch, “Industrie 4.0 – Hit or Hype?,” *EEE Ind. Electron. Mag.*, pp. 56–58, 2014.
- [18] Ramachandran Nagarajan, *Introduction to industrial robotics*. Tamil Nadu, India, 2016.
- [19] T. R. Kurfess, *Robotics and Automation Handbook - Thomas R. Kurfess*. Boca Raton, Florida., 2005.
- [20] International Federation of Robotics, “Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots,” *World Robot. Rep.*, pp. 15–24, 2020.
- [21] International Federation of Robotics, “Robot Sales 2017,” *Exec. Summ. World Robot. 2018 Ind. Robot.*, pp. 13–22, 2018, [Online]. Available: https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf%0D.
- [22] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca, and A. Bicchi, “An atlas of physical human-robot interaction,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 43, no. 3, pp. 253–270, 2008, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003.
- [23] M. P. Groover, M. Weiss, R. Nagel, N. Odrey, and A. Dutta, *Industrial Robotics Technology Programming And Applications (second edition)*, 2nd ed. West Patel Nagar, New Delhi, 2012.
- [24] K. M. Lynch and F. Park, *Modern robotics mechanics, mechanics, planning, and control*. EUA, 2017.
- [25] J. A. Marvel and R. Norcross, “Implementing speed and separation monitoring in collaborative robot workcells,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 44, pp. 144–155, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2016.08.001.
- [26] S. El Zaatari, M. Marei, W. Li, and Z. Usman, “Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 116, pp. 162–180, 2019, doi: 10.1016/j.robot.2019.03.003.



- [27] F. Vicentini, “Terminology in safety of collaborative robotics,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 63, no. November 2019, p. 101921, 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101921.
- [28] “ISO 12100:2010, Safety of machinery,” 2010.
- [29] X. Sun *et al.*, “Design of a large-range torque sensor with variable resolutions,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 174, no. November 2020, p. 109032, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109032.
- [30] P. Segura, O. Lobato-Calleros, A. Ramírez-Serrano, and E. G. Hernández-Martínez, “Safety assurance in human-robot collaborative systems: A survey in the manufacturing industry,” *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 740–745, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.055.
- [31] S. Blankemeyer *et al.*, “A method to distinguish potential workplaces for human-robot collaboration,” *Procedia CIRP*, vol. 76, pp. 171–176, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.02.008.
- [32] S. Haddadin, A. De Luca, and A. Albu-Schäffer, “Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 33, no. 6, pp. 1292–1312, 2017, doi: 10.1109/TRO.2017.2723903.
- [33] K. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product Design and Development*, 6th ed. New York, EUA., 2016.
- [34] On Robot, “DATASHEET HEX-E/H QC,” pp. 1–6, 2022.
- [35] Robotiq, “Ft 300 Force Torque Sensor,” 2018.
- [36] F. D. M. Silva, “O CAD APLICADO AO PROJETO DO PRODUTO: O PONTO DE VISTA DOS DESIGNERS INDUSTRIAIS,” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.



Anexos A

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 1 – Vista geral Sensor anticolisão

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 2 – Vista explodida

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 3 – 2D Detalhe do mecanismo do sensor

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 4 – 2D Corpo do sensor



(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 5 – 2D Base Inferior

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 6 – 2D Base inferior das esferas

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 7 – 2D Base superior das esferas

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 8 – 2D Pino 6 mm

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 9 – 2D Embolo

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 10 – 2D Cabeça do embolo

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 11 – 2D Prato suporte molas



(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 12 – 2D Flange superior

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 13 – 2D Flange inferior

(FIGURA PROTEGIDA, CONTÉM DADOS CONFIDENCIAIS)

Figura A 14 – 2D Perno M10