



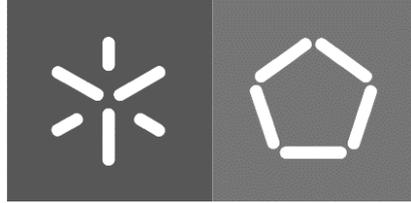
**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Rui Ferdinando Coelho Bessa

**Desenvolvimento de um Sistema Automático  
para o Fabrico de Camas de Agulhas para o  
Teste de PCBs**

4 de outubro de 2021



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Rui Ferdinando Coelho Bessa

**Desenvolvimento de um Sistema Automático  
para o Fabrico de Camas de Agulhas para o  
Teste de PCBs**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do

**Professor Doutor José Mendes Machado** e da

**Professora Doutora Maria Teresa Mesquita Cunha Machado  
Malheiro**

4 de outubro de 2021

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

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

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

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

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição**

**CC BY**

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

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **AGRADECIMENTOS**

À empresa, InsideLimits, um especial agradecimento pela oportunidade de realizar esta dissertação no âmbito de um estágio curricular na empresa.

Ao orientador, professor doutor José Machado, um especial agradecimento pela atenção, disponibilidade e dedicação demonstrada durante a realização deste projeto.

Agradeço também a todos os membros da equipa de projeto, em especial ao Luís Freitas e Rui Oliveira, por todo o conhecimento, experiência e atenção que dispensaram ao longo deste projeto, permitindo assim a minha integração no mesmo e a sua concretização.

Aos meus amigos, um especial agradecimento por terem feito parte deste percurso e por me terem apoiado incondicionalmente ao longo da minha vida académica.

Por fim, um agradecimento muito especial a toda a minha família, que durante esta caminhada universitária me apoiaram incondicionalmente para que chegasse a esta fase de conclusão do meu percurso com sucesso. Um muito especial obrigado à Ana Paula Afonso, por todo o apoio e motivação dada para a concretização de todos os objetivos definidos durante o meu percurso académico, assim como durante a execução desta dissertação.

A todos muito obrigado!

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

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

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

## RESUMO

Na atualidade, as máquinas de teste em circuito são dos sistemas mais importantes nas linhas de produção da indústria eletrónica. Os padrões de qualidade das placas de circuito impresso são cada vez mais elevados, pois com o aumento da sua complexidade, a necessidade de garantir um alto controlo na verificação dos diversos processos que envolvem o seu fabrico é crucial para se manter um alto nível de confiabilidade. Por outro lado, o processo de fabrico para as máquinas de teste em circuito, em particular das camas de agulhas, não acompanhou os avanços tecnológicos mais recentes da indústria. Este processo de fabrico ainda é um processo maioritariamente manual, o que resulta em problemas críticos de qualidade, devido à elevada repetibilidade e precisão necessária na tarefa, refletindo-se nas linhas de produção finais. Nesta dissertação propõe-se um novo processo de fabrico para a produção das camas de agulhas que visa reduzir o tempo de fabrico e as restrições do processo de fabrico, melhorando todos os respetivos parâmetros de qualidade. Ao longo desta dissertação é analisado este processo e são definidos os parâmetros do projeto, tais como os objetivos, os requisitos de engenharia e análise de funções. Por fim, é proposta uma solução concetual, devidamente detalhada para resolver o problema identificado.

## PALAVRAS-CHAVE

Automatização; Garra robótica; Máquinas de teste em circuito; Placas de circuito impresso; Projeto Mecatrónico.

## **ABSTRACT**

Today, In-Circuit-Test machines are one of the most important systems on production lines in the electronics industry. The quality standards of Printed Circuit Boards are increasingly high, and with the increase in their complexity, the need to ensure a high control in the verification of the various processes involved in their manufacture is crucial to maintain a high level of reliability. On the other hand, the manufacturing process for the In-Circuit-Test machines, in particular the bed of nails, has not kept up with the latest technological advances in the industry. This manufacturing process is still mostly manual, which results in critical quality problems, given the high repeatability and precision required in the task, which is reflected in the final production lines. This dissertation proposes a new manufacturing process to produce needle beds that aims to reduce manufacturing time and manufacturing process restrictions, improving all the respective quality parameters. Throughout this dissertation this problem is analysed, and project parameters are defined, such as objectives, engineering requirements and function analysis. Finally, a conceptual solution is proposed, duly detailed to solve the identified problem.

### KEYWORDS

Automation; Robotic gripper; Circuit test machines; Printed circuit boards; Mechatronic Project.

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas .....	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos .....	xiii
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento e motivação do projeto.....	1
1.2 A Empresa .....	2
1.3 Definição de objetivos.....	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	3
2 Pesquisa Bibliográfica .....	5
2.1 Projeto Mecatrónico .....	5
2.1.1 Engenharia Mecatrónica .....	5
2.1.2 Engenharia de projeto.....	7
2.1.3 Metodologia de Projeto .....	12
2.1.4 Processo de desenvolvimento de produto.....	12
2.2 Sistema de cama de agulhas para teste do PCB.....	16
2.3 Sistema para automatização de processos de manuseamento .....	19
2.3.1 Manipulador de posicionamento .....	21
2.3.2 Configurações de manipuladores .....	22
2.3.3 Sistemas de fixação .....	26
2.3.4 Método de fixação .....	28
2.3.5 Requisitos e características das garras .....	31
3 Projeto Concetual.....	33
3.1 Descrição do equipamento .....	33
3.2 Objetivos do projeto.....	36

3.3	Árvore de funções do mecanismo .....	37
3.4	Especificações do projeto .....	40
3.4.1	Toleranciamento.....	40
3.4.2	Força de Montagem.....	42
3.5	Soluções desenvolvidas .....	44
3.5.1	Sistema de fixação a vácuo.....	44
3.5.2	Sistema de fixação com dois cilindros pneumáticos.....	45
3.5.3	Sistema de fixação com um cilindro pneumático .....	47
3.5.4	Comparação dos diversos sistemas .....	55
4	Projeto Detalhado .....	58
4.1	Sistema desenvolvido .....	58
4.2	Constituintes da garra de fixação .....	61
4.2.1	Grupo estrutural .....	61
4.2.2	Grupo cinemático .....	63
4.2.3	Elementos de ligação.....	66
4.3	Funcionamento da garra de fixação .....	68
4.4	Desenvolvimento de protótipo – Validação de conceito.....	72
4.4.1	Funcionamento do protótipo .....	75
4.5	Aspetos a melhorar .....	76
5	Conclusão .....	77
A.1	Anexo A - Desenhos técnicos produzidos .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - <i>Inside Limits - Test Solutions</i> .....	2
Figura 2-1 - Esquematização dos Constituintes da Engenharia Mecatrónica. ....	6
Figura 2-2 - Fluxo presente no funcionamento de um Sistema Mecatrónico [1]. ....	6
Figura 2-3 - Fluxograma do modelo descritivo de 4 etapas [2]. ....	8
Figura 2-4 - Fluxograma do projeto de uma solução definido por French (1985) [2]. ....	9
Figura 2-5 - Diagrama do Modelo em "V" da VDI 2206 [1].....	11
Figura 2-6 - Fluxo do processo de projeto concetual [5]. ....	14
Figura 2-7 - Cama de Agulhas. ....	16
Figura 2-8 - Agulhas, camisa de agulhas e calcadores inseridos na cama de agulhas.....	17
Figura 2-9 - Ferramenta Ingun SW-KS-075G .....	17
Figura 2-10 - <i>Wiring</i> da cama de agulhas. ....	17
Figura 2-11 - Erro na picagem do PCB .....	18
Figura 2-12 - Fases do processo de manuseamento [6].....	20
Figura 2-13 - Constituição de um sistema de manuseamento [6].....	20
Figura 2-14 - Elementos principais que constituem um manipulador e as suas funções desempenhadas [6].....	21
Figura 2-15 - Modelo de Robô linear da KUKA [7].....	22
Figura 2-16 - Modelo KR4 Agilus da fabricante KUKA [7]. ....	23
Figura 2-17 - Modelo KR SCARA da fabricante KUKA [7].....	24
Figura 2-18 - Modelo de Robô DELTA da ABB .....	24
Figura 2-19 - Esquema de uma configuração cilíndrica .....	25
Figura 2-20 - Relação do custo da garra com a flexibilidade [6].....	28
Figura 2-21 - Princípios essenciais para estratégias de agarrar objetos, a) prensão de impacto direta em dois pontos, b) prensão de impacto de acordo com a forma do objeto, c) prensão com força atrativa por sucção a vácuo [12]. ....	31
Figura 2-22 - Classificação aproximada de objetos e atribuição de possíveis tipos de garra [12]. ....	32
Figura 3-1 - Desenho técnico de um recetáculo (KS-075 47 E03 Ingun) [13]. ....	34
Figura 3-2 - Tamanho do recetáculo e agulha [13].....	34
Figura 3-3 - Sistema de alimentação de recetáculos, imagem à esquerda e sistema de fixação e transporte, imagem à direita .....	36

Figura 3-4 - Árvore de objetivos para o Sistema de Fixação. ....	37
Figura 3-5 - Diagrama de “Caixa Negra” com a função principal do sistema .....	38
Figura 3-6 - Diagrama de funções do sistema para automatização para o fabrico de cama de agulhas. .....	38
Figura 3-7 - Diagrama de funções do sistema de fixação e manipulação dos recetáculos. ....	39
Figura 3-8 - Placa de testes de força. ....	43
Figura 3-9 - Fluxo de ar presente no sistema de fixação a vácuo. ....	45
Figura 3-10 - Visão geral do sistema de fixação a vácuo. ....	45
Figura 3-11 - Subconjunto para a fixação dos recetáculos.....	46
Figura 3-12 - Mecanismo de posicionamento dos dedos da garra . ....	46
Figura 3-13 – Sistema de fixação por um cilindro pneumático montado no <i>robot</i> articulado (IRB 1200). .....	47
Figura 3-14 – Primeiro esquema desenvolvido com um cilindro pneumático.....	48
Figura 3-15 - Caminho percorrido pelos dedos da garra durante a abertura. ....	48
Figura 3-16 - Segundo esquema desenvolvido. ....	49
Figura 3-17 - Terceiro esquema desenvolvido. ....	50
Figura 3-18 - Mecanismo para fixação de recetáculos.....	51
Figura 3-19 - Quarto esquema desenvolvido. ....	51
Figura 3-20 - Deslocamento do cilindro pneumático em comparação à posição no esquema 4. ....	52
Figura 3-21 - Suporte central para estabilização do deslizador. ....	53
Figura 3-22 - Guias lineares (MGN5C1R60ZFC) para redução do atrito, do fabricante HIWIN. ....	53
Figura 3-23 - Alteração dos dedos do sistema de fixação. ....	54
Figura 3-24 - Última iteração desenvolvida para o sistema de fixação. ....	55
Figura 4-1 - Sistema de fixação atuado por um cilindro pneumático, à esquerda e acoplado ao robô artículo IRB 1200 da ABB, à direita.....	59
Figura 4-2 - Atravancamento do sistema de fixação. ....	59
Figura 4-3 - Vista explodida da garra legendada. Ver Tabela 4-1.....	60
Figura 4-4 - Suporte central da garra com os furos para a placa de fixação à esquerda e para o cilindro pneumático à direita. ....	61
Figura 4-5 - Placa de fixação com os furos representados à esquerda.....	62
Figura 4-6 - Braçadeira de 90° e o local da sua aplicação, imagem à direita. ....	62
Figura 4-7 - Suporte de guias lineares. ....	63

Figura 4-8 - Grupo cinemático na fase de inserção do recetáculo, à esquerda, e fixação, à direita. ....	64
Figura 4-9 - Deslizador desenvolvido na imagem à esquerda, e à direita colocado no suporte central, com o cilindro pneumático e o casquilho inserido. ....	65
Figura 4-10 - Conjunto de fixação de recetáculo, com dedos da garra, guias lineares e borracha de contacto. ....	65
Figura 4-11 - Parafuso ISO 4762 M4 de comprimento nominal de 30mm à esquerda, e M3 de comprimento nominal 12mm à direita. ....	66
Figura 4-12 - Casquilho autolubrificado sem flange A181SM do fabricante IGUS. ....	67
Figura 4-13 - Casquilho com rosca interna. ....	67
Figura 4-14 - Captação do recetáculo. ....	68
Figura 4-15 - Fixação do recetáculo. ....	69
Figura 4-16 - Aproximação do local de inserção. ....	69
Figura 4-17 - Libertação do recetáculo. ....	70
Figura 4-18 - Inserção do recetáculo. ....	70
Figura 4-19 - Análise do local de inserção do recetáculo. ....	71
Figura 4-20 - Afastamento do robô do local de inserção. ....	71
Figura 4-21 - Modelo CAD desenvolvido para a impressão 3D do protótipo. ....	72
Figura 4-22 - Resultado da impressão 3D. ....	73
Figura 4-23 - Cilindro pneumático Rexroth MSN-16-30 ....	73
Figura 4-24 - Modelo CAD do dedo da garra e suporte de guiamento para o protótipo. ....	74
Figura 4-25 - Superfície de guiamento para os dedos da garra. ....	74
Figura 4-26 - Furo para alocação da ferramenta de inserção. ....	75
Figura 4-27 - Protótipo com cilindro pneumático e ferramenta de inserção, recuado na imagem à esquerda e acionado na imagem à direita. ....	76

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Comparação entre configurações robóticas. ....	26
Tabela 2-2 - Classificação de garra de acordo com o seu princípio físico de operação [12]. ....	30
Tabela 3-1 – Lista de dimensões e respectivas tolerâncias. ....	41
Tabela 3-2 - Pressão e respetiva força de montagem para cada tipo de furo. ....	43
Tabela 3-3 - Comparação entre as diferentes soluções desenvolvidas- ....	56
Tabela 4-1 - Legenda da Figura 4-3. ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Projeto assistido por computador)
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i> (Engenharia assistida por computador)
ICT	<i>In-Circuit-Test</i> (Teste em circuito)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PPM	Partes por Milhão
SCARA	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i> (Braço robótico de montagem de conformidade seletiva)
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação de Engenheiros Alemães)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação foi realizada durante o ano letivo 2020/2021 como projeto final para atribuição do grau de mestre do aluno Rui Bessa do curso Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Esta dissertação foi realizada em âmbito empresarial, com a empresa *Inside Limits*, na qual se pretende que seja desenvolvido um trabalho de cariz científico-técnico.

Neste capítulo descreve-se o enquadramento e motivação do projeto e a empresa.

### 1.1 Enquadramento e motivação do projeto

Com a nova era da automação industrial, caracterizada por conceitos no domínio da Indústria 4.0, um novo paradigma está a impulsionar o desenvolvimento de equipamentos industriais, em que os denominados sistemas ciberfísicos são desenvolvidos e adaptados para estes novos desafios industriais. Estes sistemas devem ser preparados para se conectar e comunicar entre si, nas diversas áreas em que são realizadas tarefas na empresa industrial, de forma a coletar dados e informações úteis para permitir a progressão do trabalho realizado.

A produção tecnológica cresce diariamente a um ritmo vertiginoso, forçando os produtores de equipamentos eletrónicos a uma corrida pelo fornecimento de componentes eletrónicos a um ritmo e nível de qualidade cada vez mais elevados. Os *Printed Circuit Boards*, doravante denominadas por PCB, são um desses componentes eletrónicos, amplamente utilizados em toda a indústria e especialmente importantes para este projeto. A complexidade dos PCBs tem aumentado de forma a adaptá-los aos diversos desafios que surgem, o que por sua vez leva a uma necessidade de redução do tamanho do lote de PCBs a produzir, de forma a aumentar o controlo de qualidade do mesmo. Um dos principais problemas que afetam a cadeia de produção de PCBs é a sua fase de teste de qualidade elétrica, também denominado por *In Circuit Test Systems – ICT Systems*, que muitas vezes leva à estagnação da produção do PCB. O PCB em si é fabricado em fornecedores externos, onde são instalados os diversos componentes nele soldados, formando um PCBA, que posteriormente é testado nestes sistemas.

Parte destes problemas não estão relacionados com o PCB, mas com falhas no fabrico dos testes de sistemas ICT dado que estes são maioritariamente fabricados manualmente. Com o aumento da complexidade dos PCBs, vem um aumento do número de pontos de testes, o que torna o sistema ICT

mais complexo, mantendo a necessidade de atingir altos padrões de qualidade que a indústria exige. A chave para evitar parte dos problemas durante a fase de teste é evitar falhas no fabrico dos sistemas ICT.

Esta dissertação concentra-se no desenvolvimento de um sistema automatizado para a fase mais crítica do sistema de produção das ferramentas de teste (cama de agulhas), a inserção do recetáculo da agulha. Este tipo de sistemas de montagens não existem, o que acresce à dificuldade inerente a este projeto.

## 1.2 A Empresa

A *Inside Limits*, com o logótipo apresentado na Figura 1-1, é uma empresa especialista na criação de soluções de teste industriais.



Figura 1-1 - *Inside Limits - Test Solutions*

Atualmente constituída por uma pequena equipa, marca a sua presença no mercado pela sua experiência e elevado *know-how*, encontrando-se representada em diversos projetos. Está inserida na produção de soluções de teste a produtos eletrónicos em ambiente industrial, apresentando diversas soluções na área como:

- Fixtures de teste ICT e FCT;
- Programação flash;
- *FrameScan / TestJet*;
- Programas de teste para ICT;
- Testes funcionais;
- *Boundary scan*;
- Teste de LED.

A empresa desenvolve soluções que são implementadas nas configurações atuais, sendo que algumas destas são soluções padrão para a indústria e referência para outros fabricantes de camas de agulhas.

Devido à natureza dos testes produzidos, a empresa trabalha geralmente com projetos customizados que correspondem aos requisitos do cliente e às especificações inerentes do produto.

As ferramentas de testes (cama de agulhas) são projetadas e montadas nas instalações da empresa, com o apoio do engenheiro responsável pelo projeto, garantindo assim a qualidade e tempo de execução.

### **1.3 Definição de objetivos**

Com esta dissertação pretende-se apresentar um resumo dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento do projeto de um sistema automático para a colocação de recetáculos, tendo em conta todos os requisitos propostos para o fabrico, montagem e manutenção. O objetivo principal a que o autor se propõe é o desenvolvimento de um sistema para a fixação dos recetáculos e agulhas, que garanta a segurança dos mesmos para o transporte e inserção, sendo este um objetivo global para o projeto. Este sistema é desenvolvido para ser acoplado a um manipulador robótico que realiza o respetivo movimento. Contudo, os objetivos propostos para esta dissertação foram: 1- Estudo do estado de arte dos sistemas de manipuladores industriais; 2- Estudo das diferentes configurações para os sistemas de fixação; 3- Seleção de uma configuração; 4- Desenvolvimento do sistema desenvolvido através da aplicação dos princípios técnicos para o projeto concetual e projeto detalhado; 5- Construção e teste de um protótipo físico. Estes objetivos são as diretrizes principais para este trabalho, sendo específicos ao mesmo.

Relativamente a uma projeção global para o projeto, o sistema a desenvolver trata-se de um sistema de transporte, inserção e fixação de recetáculos em camas de agulhas para o fabrico de sistemas ICT e/ou FCT.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos. Para atingir os objetivos propostos, a dissertação foi organizada da seguinte forma:

#### **Capítulo 2**

No capítulo 2 são apresentadas as diversas temáticas que permitem o desenvolvimento deste sistema, em que este foi dividido em três temas. Inicialmente aborda-se conceitos teóricos relacionados com o projeto mecatrónico, nomeadamente filosofias de projeto, fases do projeto e descrição de cada fase. Posteriormente, aborda-se questões de vertente mais prática, onde é analisado o processo de fabrico atualmente utilizado para a manufatura das placas de sistemas ICT. Finalmente, introduz-se as diversas

soluções de sistemas para a automatização do processo de fabrico, de forma a descrever a panóplia de soluções disponíveis para o projeto.

### **Capítulo 3**

No capítulo 3 aborda-se a fase do projeto concetual do equipamento, em que se analisa o equipamento pretendido, define-se objetivos e funções do mesmo, apresentando diferentes soluções desenvolvidas para cumprir as diversas funções e, finalmente, realiza-se uma avaliação destas soluções para se definir qual a que se irá detalhar.

### **Capítulo 4**

No capítulo 4 apresenta-se o projeto detalhado do equipamento desenvolvido, em que será apresentado o produto final, idealizado para realizar a tarefa proposta e pronto a ser inserido no sistema de automatização do processo de fabrico. Neste capítulo são analisadas as diversas componentes que constituem o produto final e será caracterizado o seu funcionamento no sistema. Por fim é apresentado o resultado final construído, onde serão apresentadas fotos do equipamento após fabrico e montagem.

### **Capítulo 5**

Por fim, no capítulo 5, apresenta-se as principais conclusões obtidas e contribuições da presente dissertação, salientando aspetos que podem ser melhorados no futuro.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão abordados os conceitos teóricos que fundamentam o trabalho desenvolvido no decorrer do projeto e da dissertação. Este encontra-se dividido por três subcapítulos, projeto mecatrónico, sistema de cama de agulhas para teste de PCB e sistema para automatização de processos de fabrico de testes. No subcapítulo dedicado ao projeto mecatrónico apresenta-se uma introdução à Engenharia Mecatrónica, assim como a abordagem à metodologia geral a aplicar no projeto. No segundo subcapítulo será esclarecido o produto principal a ser fabricado pelo sistema a desenvolver, e como irá atuar este para o seu fabrico. Por fim, serão abordados os diversos conceitos que constituem a solução para o sistema a desenvolver, analisando o estado de arte das diversas partes deste, assim como diferentes configurações para cada.

#### **2.1 Projeto Mecatrónico**

Neste subcapítulo será abordado o projeto e aquilo que servirá como base para este, apresentando a área em que se enquadra, assim como as metodologias adotadas. Inicialmente será introduzida a Engenharia Mecatrónica, e com esta, as abordagens para o desenvolvimento do projeto, com os modelos e metodologias a aplicar neste.

##### **2.1.1 Engenharia Mecatrónica**

A Engenharia Mecatrónica é uma área da engenharia na qual existe uma integração coordenada e simultânea entre a Engenharia Mecânica, a Engenharia Eletrónica, a Engenharia Elétrica e a Engenharia de Sistemas. O resultado desta integração permite a criação de sistemas complexos, com funções mecânicas desempenhadas por sistemas eletrónicos, que através da teoria de controlo e a ciência da computação, é possível controlá-los e com isto otimizar as suas funções.

A mecatrónica deriva de uma grande dinâmica na procura pela inovação, com o objetivo do aumento da qualidade, desempenho, diminuição de custos e com estes, o cumprimento dos requisitos do cliente. Na Figura 2-1 encontram-se representadas as áreas que integram a mecatrónica, assim como exemplos do que cada contribui para esta.

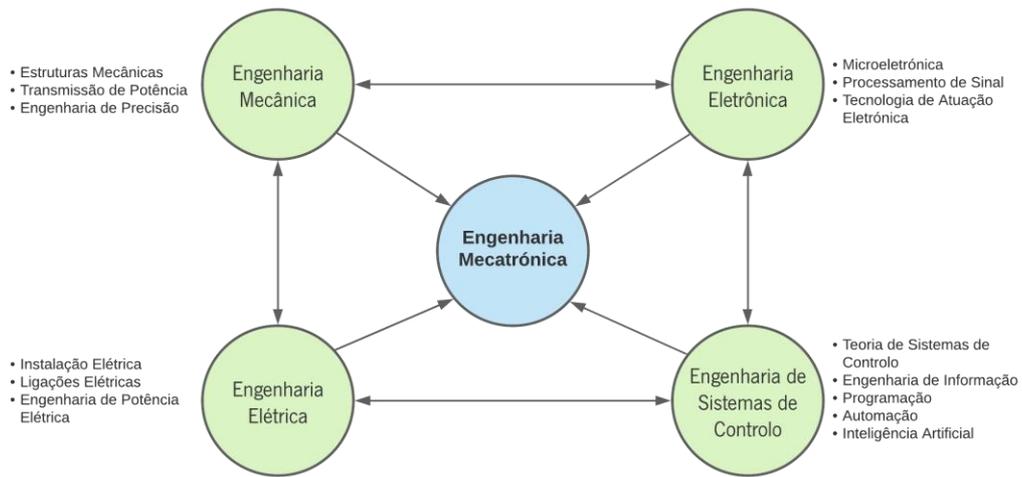


Figura 2-1 - Esquematização dos Constituintes da Engenharia Mecatrônica.

[1]

Com as ligações desenvolvidas entre as quatro áreas, foi possível otimizar e melhorar soluções já existentes, adaptando estas com sistemas de controlo em malha fechada, permitindo a monitorização do processo que tais equipamentos desempenham através de, por exemplo, sensores. Com base no sinal que é transmitido por estes como valor de entrada ou *input*, o controlador irá definir as alterações a efetuar no sistema, de forma que o comportamento deste obedeça ao pretendido no programa desenvolvido. As alterações necessárias são então efetuadas por base de atuadores, e que mais uma vez, através da utilização de sensores, a informação sobre elas será passada ao controlador. Essa informação é dada com base no sinal transmitido pelos sensores para o valor de saída ou *output*, gerado por uma alteração no sistema. Este fluxo encontra-se representado esquematicamente na Figura 2-2.

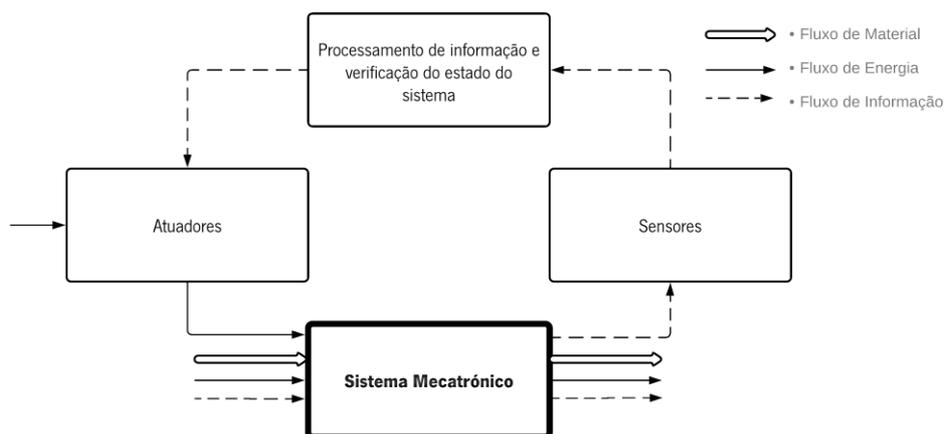


Figura 2-2 - Fluxo presente no funcionamento de um Sistema Mecatrónico [1].

Segundo [1], a mecatrónica demonstra diversas vantagens em relação a sistemas mecânicos, nos quais, através dela é possível desenvolver equipamentos capazes de executar novas funções, melhorando o seu comportamento pela monitorização e controlo empregados nestes sistemas. Com isto, é possível que o equipamento funcione sem intervenção externa, e também aumentar os limites do sistema aplicado, criar mecanismos automáticos para o diagnóstico de falhas e reduzir o erro durante a operação, otimizando assim a produção.

Todavia, os sistemas mecatrónicos apresentam desvantagens associadas, como por exemplo, na eventual falha de uma das componentes, serão gerados novos sinais e valores fora do comportamento normal, o que compromete o controlo e com isto o funcionamento do sistema, não permitindo este realizar a sua função. Em sistemas com funcionamentos mais simples, o custo associado à introdução de um equipamento para automatização deste pode ser bastante elevado para a função desempenhada, pelo que a relação custo-benefício deve ser sempre considerada no desenvolvimento de um produto mecatrónico.

### 2.1.2 Engenharia de projeto

Com o aumento crescente na procura do desenvolvimento de produtos, surgiu a necessidade de desenvolver guias e modelos que pudessem guiar o projetista no desenvolvimento e projeto de um equipamento. Estes modelos permitem descrever a sequência de atividades que ocorrem tipicamente durante o processo do projeto, enquanto outros procuram abordar, de forma aprofundada, as diversas atividades que o constituem. Através da sistematização dos procedimentos no desenvolvimento do produto, será possível para o projetista a adaptação ao aumento da complexidade dos equipamentos, cumprindo as exigências de aumentar a eficiência do projeto, e com isto reduzir os custos e riscos associados a este.

Os modelos desenvolvidos podem ser agrupados em dois tipos, os descritivos e os prescritivos. De acordo com [2], os modelos descritivos, geralmente tentam gerar mapas ou modelos do projeto, realçando a necessidade de produzir uma solução concetual no início do projeto. Este conceito é então analisado, avaliado, refinado e desenvolvido. Através da análise e avaliação, é possível identificar falhas ou erros fundamentais no início da conjectura do conceito, levando ao abandono de determinada solução e, com isto, gera-se um novo conceito, iniciando de novo o ciclo. Este tipo de modelo pode ser designado como heurístico, no qual é aplicada a experiência obtida e as diretrizes gerais que permitem conduzir o trabalho do projetista numa determinada direção, certa ou errada, na qual, com os erros cometidos poderá enriquecer essa experiência, melhorando o próximo conceito a ser desenvolvido.

No final deste modelo, surge a comunicação de um conceito, sujeito na mesma a uma avaliação em relação aos objetivos, restrições e critérios do problema proposto. Através deste método, da procura contínua pela solução concetual, será possível ao projetista explorar melhor o espaço do problema, delineando os seus limites assim como o percurso a tomar para que seja possível gerar o desejado conceito.

Com isto, pode-se verificar que este modelo, com os quatros estágios a desenvolver: exploração, conceção, avaliação e comunicação, é um modelo simples, com uma sequência natural para o desenvolvimento do produto. Estas quatro etapas encontram-se representadas no fluxograma na Figura 2-3.

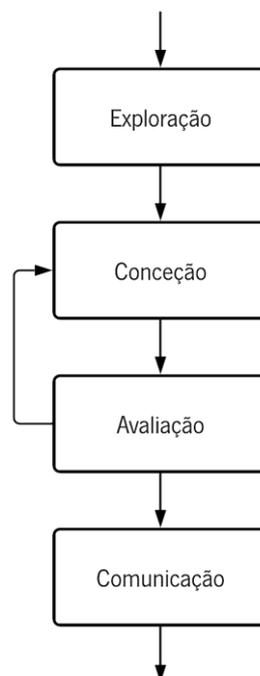


Figura 2-3 - Fluxograma do modelo descritivo de 4 etapas [2].

Assim, como já foi mencionado anteriormente, este modelo representa o fluxo mais simples para o procedimento a tomar no projeto. Ao longo dos anos, diversos autores publicaram modelos que abordam este com maior detalhe, por exemplo em [3], desenvolve-se um modelo mais detalhado, que se inicia com a necessidade para o projeto/solução. De seguida, temos a análise do problema, que permite identificar os constrangimentos, os critérios e as especificações deste. Esta pequena parte é indicada por French [3] como uma das mais importantes no desenvolvimento do produto, pois é através desta que o espaço de trabalho do problema será definido, permitindo ao projetista explorar todas as suas fronteiras. Com a definição do projeto e com o trabalho conjunto das diversas áreas que envolvem a

engenharia, são geradas soluções, que mais tarde são avaliadas e selecionadas em forma de esquemas. Estes esquemas são trabalhados de forma detalhada, pelo que, devido à existência de mais do que uma solução, surge a necessidade de tomar a decisão final sobre o qual o conceito a adotar. Por fim, com a decisão tomada, este conceito será ainda mais aprimorado. Com isto, é possível definir a solução final, que de acordo com a qualidade do trabalho desempenhado, resultará o sucesso da mesma e a comunicação da mesma às partes interessadas. O fluxo para o modelo desenvolvido por French encontra-se representado na Figura 2-4.

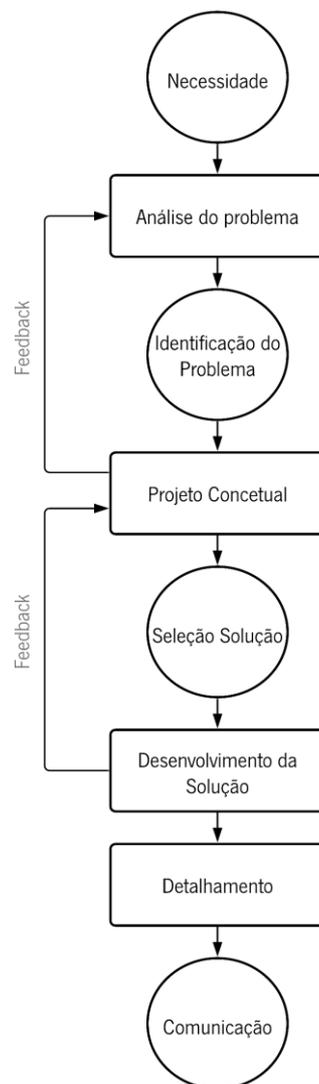


Figura 2-4 - Fluxograma do projeto de uma solução definido por French (1985) [2].

Segundo [2], existem modelos que adotam um processo heurístico no projeto, e por outro lado, foram construídos os modelos prescritivos que adotam um processo diferente para o projeto. Estes procuram persuadir o projetista a adotar formas aprimoradas do trabalho, através de um procedimento mais sistemático e algorítmico.

Os modelos prescritivos enfatizam a análise que precede a geração da solução concetual. Com isto garantem que o problema é totalmente definido, identificando todos os elementos, tornando o problema mais real.

Este tipo de modelo é constituído por três estágios, definidos por [4], sugerindo assim uma estrutura mais básica. Os três estágios são:

- Análise: Listagem de todas os requisitos para o projeto, reduzindo este a um conjunto lógico relacionado com o desempenho das especificações;
- Síntese: Determinação das soluções possíveis que cumpram as especificações de desempenho, e com estas, construir um produto completo;
- Avaliação: Avaliação das soluções alternativas, de forma a saber se estas cumprem os requisitos de desempenho, custo e venda, antes da seleção da solução concetual final.

Este modelo promove a criação de diversas soluções, que através de uma avaliação a estas, possibilita a escolha da solução final.

Outros modelos mais complexos foram propostos, que seguem estruturas como a mencionada anteriormente, optando por um maior nível de detalhe em cada fase. A sociedade profissional de engenheiros da Alemanha, em [1], produziu uma série de guias para o “processo” do projeto. Entre os quais desenvolveram o guia para o projeto mecatrónico, a VDI 2206 – *Design methodology for mechatronic system*, que será abordado na próxima subsecção, dado que estas diretrizes serão utilizadas no decorrer da dissertação

#### 2.1.2.1 VDI 2206 – Metodologia de projeto para Sistemas Mecatrónicos

A VDI 2206 é uma diretriz que visa fornecer um suporte metodológico para o desenvolvimento de sistemas mecatrónicos, que se concentra no projeto do sistema, analisando os procedimentos, métodos e ferramentas a adotar neste [1]. O resultado deste projeto é o conceito de sistema mecatrónico, no qual é estabelecida uma solução após a sua verificação e validação. Este guia tem a intenção de complementar a VDI 2221 e a VDI 2422.

Segundo a diretriz VDI 2206, o desenvolvimento de um produto mecatrónico segue um modelo em “V”, que descreve o procedimento genérico para o projeto de sistemas mecatrónicos. Na Figura 2-5 encontra-se representado um esquema ilustrativo deste modelo, que inicia com a transformação das necessidades dos clientes em requisitos, que por sua vez se transformam em especificações, sendo que através destas serão definidas as características métricas que o produto terá de satisfazer.

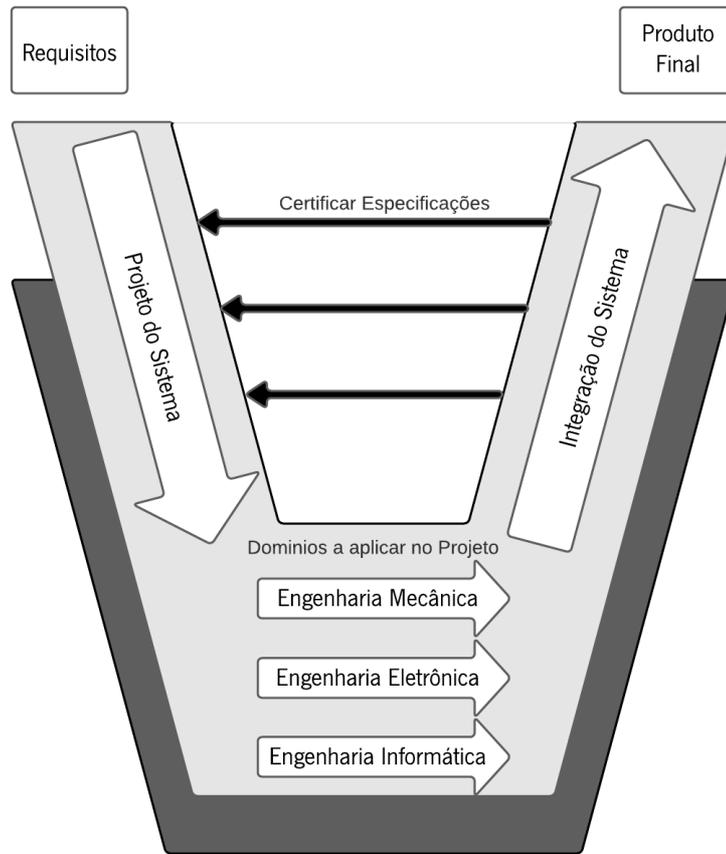


Figura 2-5 - Diagrama do Modelo em "V" da VDI 2206 [1].

O passo seguinte é o projeto do sistema que consiste em dividir o produto numa estrutura de funções, que pode ser dividida em subfunções, para as quais serão geradas soluções, que no final, permitem gerar a solução global. Para a estrutura das funções do sistema, é necessário identificar os *inputs* e *outputs* do sistema, e com estes, aquilo que é necessário para que com os *inputs* se obtenham os *outputs* desejados, sendo esta transformação a função do sistema. De forma a analisar as funções do sistema, deve-se criar um fluxo, assim como se pode encontrar na Figura 2-2, que represente o fluxo de informação, energia e material do sistema e as funções necessárias a serem desempenhadas pelo sistema. Com isto, inicia-se o processo de procura de soluções para cada subfunção, sendo este um processo iterativo e moroso.

Com o desenvolvimento das subsoluções e com a interligação destas é possível obter uma solução concetual, que engloba todas as vertentes do projeto. Com esta solução global, inicia-se a fase da integração no sistema, na qual são juntas todas as partes e eliminadas todas as incompatibilidades. Nesta fase é avaliada a solução através de testes de comportamento, segurança, análise estrutural, controlo de qualidade e também é projetado o fabrico das componentes do sistema, permitindo assim, no final desta avaliação, certificar o produto desenvolvido.

A VDI constitui assim uma diretriz que guia o projetista, mediante etapas bem definidas do projeto mecatrónico, assim como as relações entre elas.

### 2.1.3 Metodologia de Projeto

O conjunto de todos os procedimentos, técnicas ou ferramentas que o projetista pode utilizar e combinar entre si constituem a metodologia de projeto. Alguns dos métodos propostos são meramente procedimentos normais e convencionais. No entanto, com o desenvolvimento tecnológico e a crescente competição no mercado, foram criados novos métodos que permitem um procedimento racional no projeto. A formalização do procedimento permite alargar o problema e com isto, conceder ao projetista novas soluções para além daquelas que possam ter ocorrido numa análise inicial ao problema.

Este conjunto de métodos pode ser agrupado em dois grandes grupos, os métodos criativos e os métodos racionais [2].

Os métodos criativos utilizam e estimulam o pensamento criativo do projetista para a procura de soluções. Através da remoção de bloqueios mentais, este consegue aumentar o fluxo de ideias, desinibindo a sua criatividade. Os métodos criativos podem ser os seguintes:

- *Brainstorming*;
- Sinética, que se baseia na transformação do estranho em familiar e vice-versa;
- Teoria para a Resolução de Problemas Inventivos.

Relativamente aos métodos racionais, os seus objetivos são idênticos aos dos métodos criativos. No entanto, eles são os que definem, geralmente, a metodologia de projeto, promovendo a utilização de uma abordagem sistemática. Existem diversos métodos racionais que abordam os aspetos de projeto, no entanto o fluxo destes métodos pode ser ordenado pelos seguintes tópicos:

1. Clarificação e estabelecimento dos objetivos do projeto;
2. Estabelecimento da estrutura de funções do projeto;
3. Estabelecimento das especificações do produto;
4. Criação de soluções alternativas;
5. Avaliação das soluções alternativas;
6. Aperfeiçoamento de detalhes.

### 2.1.4 Processo de desenvolvimento de produto

O processo pode ser descrito como uma sequência de passos que transformam um conjunto de *inputs* num conjunto de *outputs*. No processo de desenvolvimento de produto temos então uma sequência de

atividades que uma empresa adota de forma a conceber, projetar e comercializar um produto. Estas atividades, por vezes são apenas a um nível intelectual e da organização, de forma a definir e seguir um processo detalhado. Cada processo deve ser adaptado ao contexto real em que se encontra, isto tendo em conta as necessidades do produto em si a ser desenvolvido. Por exemplo, no caso do desenvolvimento do avião *Boeing 777*, o processo a adotar é mais detalhado, com um maior número de membros na equipa de trabalho, maior orçamento alocado para o custo de desenvolvimento, maior número de componentes do que no caso do desenvolvimento de uma impressora. Cada empresa deve adequar o processo ao produto a ser desenvolvido, sendo este diferente para cada organização, e mesmo dentro destas, podemos ter produtos que necessitem de um processo que siga um caminho diferente. De acordo com Ulrich (2012) [5], o processo de desenvolvimento de produto genérico consiste em 6 fases:

0. Planeamento;
1. Projeto Concetual;
2. Projeto a Nível de Sistema;
3. Projeto Detalhado;
4. Teste e Detalhe;
5. *Ramp-up* de Produção.

O planeamento é geralmente referido como “fase zero”, porque antecede a aprovação e o lançamento do projeto, inicia-se com a identificação de oportunidades de acordo com a estratégia da organização, avaliando os desenvolvimentos tecnológicos e objetivos de mercado. Relativamente a este processo, pode-se esperar que sejam declarados os objetivos e a missão do projeto, especificando o mercado-alvo para o produto, assim como as principais premissas e restrições [5].

Na fase do projeto concetual é desenvolvido o conceito, identificadas as necessidades do mercado-alvo e são gerados um ou mais conceitos para desenvolvimento e teste. O conceito é entendido como a descrição da forma, função e características de um produto, acompanhado por um conjunto de especificações e a justificação económica do projeto. Esta é uma das fases mais exaustivas do projeto, exigindo uma maior coordenação. A fase de desenvolvimento do projeto concetual, é designada por Ulrich como o processo de *front-end*. Na Figura 2-6 temos uma representação do fluxo deste processo e as diversas etapas que o integram.

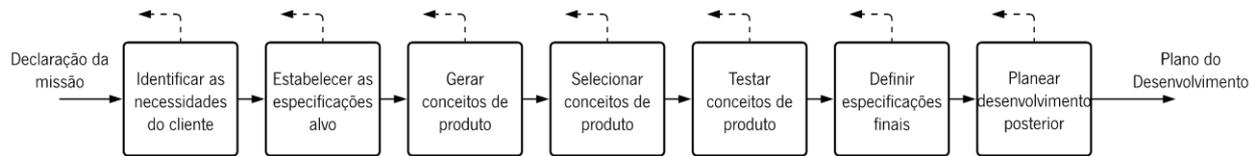


Figura 2-6 - Fluxo do processo de projeto conceitual [5].

A fase do projeto conceitual, geralmente não segue uma forma puramente sequencial, sendo que na prática, as atividades do *front-end* podem ser sobrepostas no tempo sendo crucial para esta etapa a iteração dos diversos conceitos desenvolvidos. Como se pode verificar na Figura 2-6, as setas a tracejado refletem a natureza incerta do progresso no desenvolvimento do produto, em que em qualquer estágio, com novos *inputs* ou informações as decisões tomadas inicialmente devem ser reconsideradas, levando por vezes à necessidade da reiniciação do projeto conceitual. A repetição da análise de novas informações com as possíveis alterações no desenvolvimento do projeto é também conhecida como iteração, e o reconhecimento da sua importância no projeto é o que permite o crescimento do mesmo e a obtenção de um produto melhor e mais otimizado para responder às necessidades propostas [5].

A fase do desenvolvimento do projeto a nível de sistema inclui a definição da arquitetura do produto, na qual são analisados os subsistemas e componentes que constituem este, com o projeto preliminar de componentes importantes, assim como a responsabilidade no detalhe do projeto das restantes partes. Na arquitetura do produto ocorre uma correlação entre os elementos funcionais e físicos do sistema, a qual pode também ser designada por arquitetura modular. A arquitetura modular tem as seguintes propriedades:

- Blocos, que implementam um ou mais elementos funcionais na sua totalidade;
- Interações entre blocos bem definidas, fundamentais para as funções primárias do produto.

Nesta etapa são desenvolvidos e definidos os planos iniciais para a produção das componentes assim como para a sua montagem final. Daqui espera-se obter um *layout* do produto, com uma especificação funcional de cada um dos subsistemas do produto e um diagrama do fluxo de processo da montagem final.

Com a seleção de uma solução conceitual para o produto, é possível avançar para a etapa dedicada ao detalhe da mesma, definindo-se as especificações da geometria, materiais e tolerâncias de todas as partes e identificam-se aquelas que são normalizadas para serem adquiridas através de fornecedores. Para esta fase deve ser definido um plano de processo, e as ferramentas são escolhidas para o sistema de fabrico de cada parte projetada. Desta fase espera-se obter um documento de controlo de produto,

com desenhos técnicos ou ficheiros de computador que descrevam a geometria de cada parte, e as ferramentas de produção necessárias, com os planos de processo para a fabricação e montagem, assim como as especificações das partes adquiridas externamente e a cadeia de fornecedores para a produção. Com a atividade de detalhe do projeto espera-se definir e finalizar três questões críticas que são consideradas no decorrer do mesmo, mas finalizadas nesta etapa:

- Seleção de materiais;
- Custo de produção;
- Desempenho robusto.

Com o detalhe do projeto, através de novas iterações e novas alterações vocalizadas a adaptar o projeto à indústria em que se encontra e ao meio-ambiente, inicia-se a fase seguinte, na qual ir-se-ão realizar testes ao produto, refinando este ainda mais. Esta etapa procura iniciar a construção dos primeiros protótipos (alfa), geralmente constituídos por peças com intenção de serem aplicadas na sua produção, com geometria, materiais e propriedades idênticas para a versão final do produto. Isto possibilita a análise das soluções produzidas, em que mesmo não sendo necessariamente fabricados com os processos reais a serem utilizados, os protótipos alfa permitem determinar se o produto funcionará conforme projetado, e se este atende às necessidades definidas pelo cliente ou pelo projetista [5]. Com a análise realizada a estes protótipos, inicia-se a avaliação de protótipos beta, geralmente construídos com peças fornecidas pelos processos de fabrico projetados para tal. Estes são amplamente avaliados internamente e pelo cliente no ambiente próprio a ser utilizado, pretendendo com isto verificar o seu desempenho e confiabilidade, identificando mudanças necessárias para o produto final. A construção e utilização de protótipos é importante para o processo de desenvolvimento do projeto, dado que é através destes que o projetista irá pela primeira vez analisar o produto numa escala real, permitindo transformar aquilo que tinha sido imaginado em papel em algo tangível e material.

Por fim, na fase de *ramp-up* da produção, o produto é construído através do sistema de produção projetado, treinando com isto a força de trabalho, resolvendo quaisquer problemas destes. Durante esta etapa há uma constante avaliação dos produtos fabricados pelo cliente, de forma a verificar a existência de falhas nos mesmos. A produção deste produto aumenta gradualmente, e num determinado ponto deste aumento, o mesmo será lançado para o mercado, ficando disponível para distribuição. Nesta fase são feitas revisões para avaliar o projeto tanto do ponto de vista comercial quanto técnico, e com o objetivo de identificar formas de melhorar o processo de desenvolvimento para projetos futuros [5].

## 2.2 Sistema de cama de agulhas para teste do PCB

Nesta seção será abordado o produto principal em que se insere o sistema a desenvolver. Referir-se-á o processo de construção das camas de agulhas, descrevendo todas as partes que constituem esta, assim como as falhas verificadas na sua construção e com isso, a necessidade da melhoria a implementar com o novo sistema.

A cama de agulhas permite efetuar o contacto físico entre a interface, onde se analisa os testes efetuados, e um PCB, conduzindo os sinais elétricos de modo a estimular o componente ou o conjunto de componentes a testar. Ela é constituída por uma caixa e estrutura, base e interface comum a todas as camas de agulhas fabricadas. Na Figura 2-7 encontra-se representada uma cama de agulhas, na qual é possível visualizar as diversas camisas e agulhas colocadas nas respetivas posições, respeitando as coordenadas definidas inicialmente para que seja realizado o teste do PCB.

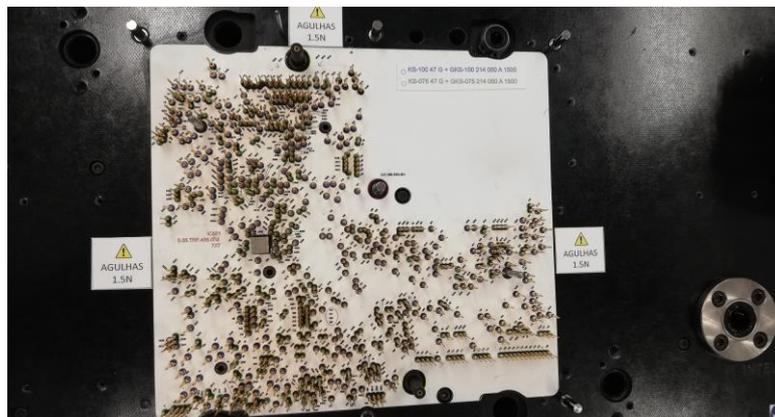


Figura 2-7 - Cama de Agulhas.

Na cama de agulhas podem ser aplicados vários tipos de agulhas e com diferentes forças. Em algumas situações, por vantagens de uniformização, utiliza-se dois níveis de força, a 3N na maioria dos casos e a 1.5N nos casos onde há uma elevada concentração de pontos de teste numa área reduzida,. Esta distinção advém da necessidade de alguns PCB terem um menor ou maior número de pontos de teste e de medição. Estes pontos são locais nos circuitos eletrónicos utilizados para monitorizar o estado do circuito ou para injetar sinais de teste, permitindo a verificação do funcionamento correto do circuito recém-montado ou de um circuito usado, possibilitando a perceção sobre os pontos de reparação necessários no dispositivo.

O processo de fabrico das camas de agulhas começa com a colocação manual do respetivo recetáculo, ou camisa da agulha, num determinado ponto definido, até uma dada cota, e de seguida a colocação da agulha dentro da camisa. As agulhas têm uma mola interna que permite o ajuste da sua altura de acordo com a componente a ser testada de forma a prevenir que ambas sejam danificadas. Para além deste

conjunto camisa-agulha, são ainda colocados calcadores no topo da cama de agulhas e transmitem a força do cilindro para empurrar a PCB contra as agulhas que estão em baixo, de forma que estas comprimam a cerca de 2/3 do seu curso. Na Figura 2-8 encontram-se representados estes componentes, colocados na cama de agulhas.

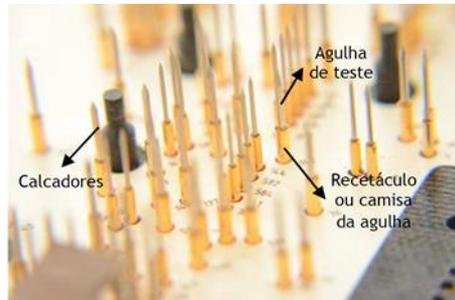


Figura 2-8 - Agulhas, camisa de agulhas e calcadores inseridos na cama de agulhas

Estas agulhas têm um diâmetro mínimo de 0,8mm, por isso é necessário a utilização de uma ferramenta adaptada à colocação das mesmas, apresentada na Figura 2-9, que irá ajudar o técnico a pressionar a camisa e a agulha até à sua posição final, dada pelo fim de curso da ferramenta. Este processo é repetido para todos os pontos designados para a colocação destas componentes.



Figura 2-9 - Ferramenta Ingun SW-KS-075G

Com a colocação das camisas e das respetivas agulhas, é efetuado o *wiring* das mesmas, no qual é lido um ficheiro que indica a posição da agulha para que um fio condutor elétrico, indicado ao técnico por este ficheiro, seja ligado à interface. Na Figura 2-10 encontra-se representado o aspeto do final do processo de *wiring* da cama de agulhas.



Figura 2-10 - *Wiring* da cama de agulhas.

Este processo é realizado de forma manual, o que faz com que a competência do técnico tenha uma grande influência na qualidade do produto final. Se acrescentarmos a isto a minúcia e precisão com que este processo é feito, temos um trabalho que se aproxima mais de um artesão do que um processo industrial.

Com o aumento da complexidade dos PCB e a redução do seu tamanho, é também aumentado o número de agulhas necessárias assim como a proximidade entre si, o que dificulta ainda mais o processo de colocação das mesmas. As características do sistema, como o diâmetro e tamanho das agulhas e das respectivas camisas, levam a que o processo de colocação e manuseamento das mesmas seja desafiante, dado que é necessária uma precisão na ordem das centésimas de milímetro.

Estes fatores implicam que o processo de fabrico da cama de agulhas seja demorado, podendo levar a uma semana para PCBs mais complexos, sendo um processo bastante repetitivo e exaustivo para o técnico. Para tal é necessário muita experiência e sensibilidade do técnico para conseguir manter a concentração exigida para a colocação de centenas de agulhas, com a precisão exigida.

A correta colocação das agulhas e camisas é vital para o correto funcionamento de todo o sistema de teste. Para além do posicionamento num ponto de coordenadas X, Y e Z, é também importante garantir a perpendicularidade entre o eixo da camisa e da placa, sendo esta uma das características mais difíceis de garantir no processo manual. Um pequeno erro na colocação pode fazer com que o ponto de contacto não seja o correto e que a medição efetuada seja errada. Enquanto o posicionamento e a concentricidade do recetáculo são dados pelo furo efetuado na placa, a perpendicularidade final da agulha é dada pela perpendicularidade da ferramenta com a placa de teste, algo difícil de garantir de forma manual.

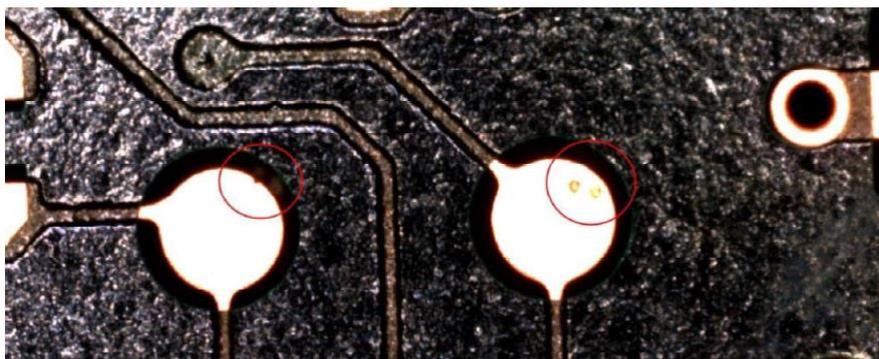


Figura 2-11 - Erro na picagem do PCB

Deve-se referir que, caso a agulha seja mal colocada, além de ser muito complicado a deteção visual destes erros, como se pode verificar na Figura 2-11, a cama de agulhas pode passar a validação interna e a falha apenas ser detetada quando estiver na linha de produção.

Finalmente, sendo um processo produtivo de elevado volume, pode ser necessário duplicar algumas das camas de agulhas, algo que, devido à baixa repetibilidade do processo manual, é difícil de garantir mesmo que seja o mesmo técnico a efetuar a montagem.

### **2.3 Sistema para automatização de processos de manuseamento**

Nesta seção será desenvolvido teoricamente o sistema a elaborar. Este sistema é constituído por duas partes principais, o manipulador de posicionamento, que irá realizar os movimentos de transporte e posicionamento da segunda parte, o sistema de fixação de componentes, que irá segurar, transportar e inserir as camisas e/ou agulhas.

O processo de manuseamento de peças ou componentes de trabalho na produção é frequentemente subestimado como algo simples ou até mesmo trivial.

Do ponto de vista da produção, a componente não aumenta de valor durante o seu processo de manuseamento. Desta forma, este processo é secundário para o processo de fabrico, separando-se o tempo necessário para a produção do tempo de manuseamento. Os intervalos de tempo que ocorrem antes ou depois das operações de trabalho sobre a peça, nos quais se inserem as operações de manuseamento devem ser reduzidos para valores mínimos, através do planeamento de produção, que tem com objetivo sincronizar o tempo de manuseio com o tempo de maquinação de forma a evitar que processos de manuseio demorados ocupem tempo valioso de trabalho na máquina, ou manter este tempo no valor mínimo, movendo tantas peças quanto possível por unidade de tempo.

O processo de manuseamento pode ser basicamente caracterizado pela contagem de componentes movidas por unidade de tempo. No entanto esta característica não especifica a quantidade de requisitos técnicos para a obtenção de um tempo por ciclo desejado. A complexidade das peças assim como as diversas condições ambientais em que se realizam as tarefas de manuseamento, tornam a simples tarefa de mover uma peça de um ponto A para B um processo extremamente complexo. Por exemplo, os seres humanos são naturalmente equipados com “técnicas de preensão” extremamente flexíveis, “sensores” eficientes e um “processamento de dados” altamente complexo e, portanto, tendem a subestimar tais tarefas. Na Figura 2-12 encontram-se esquematizadas, de forma genérica, as tarefas desempenhadas por um sistema de manuseamento.

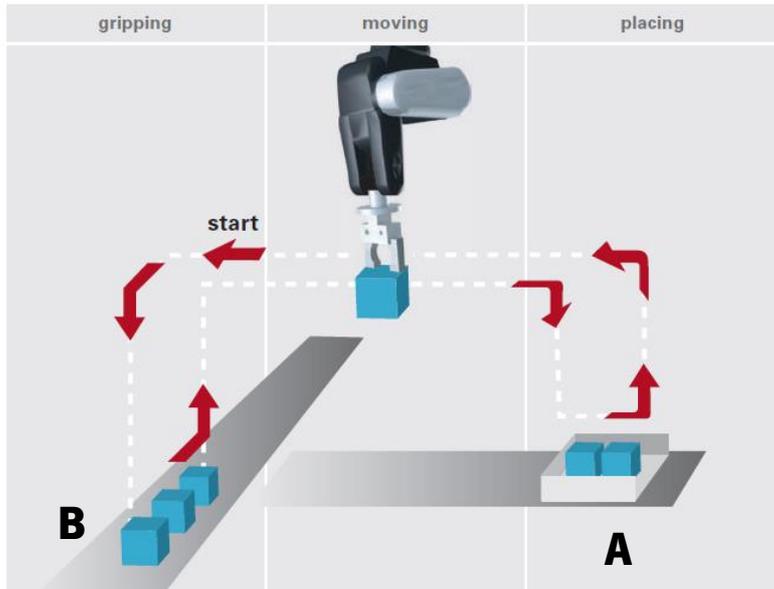


Figura 2-12 - Fases do processo de manuseamento [6].

De forma a mover a peça de trabalho do ponto A para o ponto B, é necessário que estes sistemas desempenhem funções de transporte e prensão. Estes sistemas são constituídos por diversas componentes, que podem ser divididas em grupos, assim como se encontram representados na Figura 2-13.

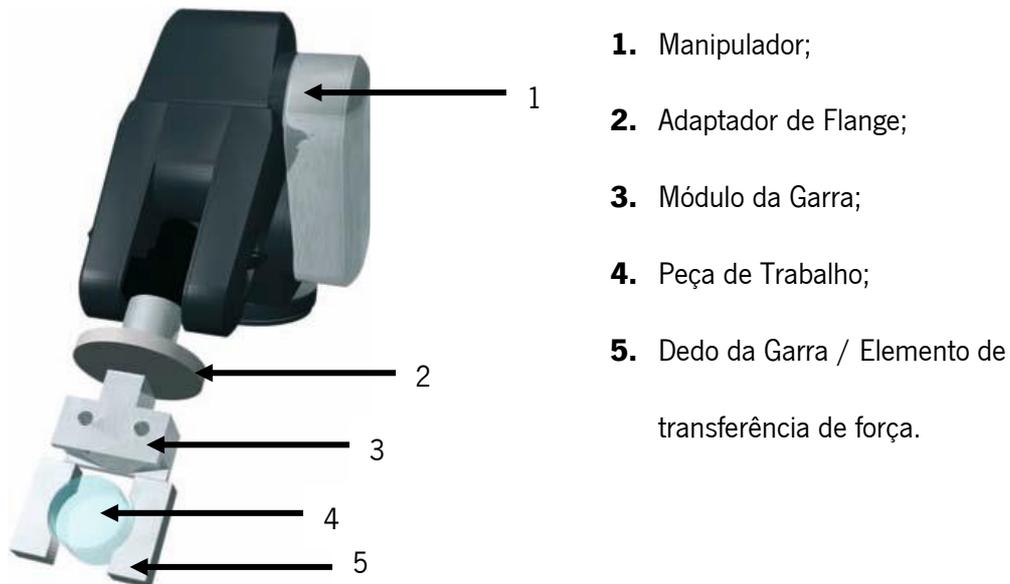


Figura 2-13 - Constituição de um sistema de manuseamento [6].

### 2.3.1 Manipulador de posicionamento

Os manipuladores são dispositivos mecanicamente concebidos para posicionar e orientar no espaço o seu órgão terminal, por exemplo uma garra ou uma ferramenta. Este consiste num conjunto de corpos ligados entre si por juntas, que formam cadeias cinemáticas que definem uma estrutura mecânica.

O manipulador é constituído por atuadores, que agem sobre a estrutura mecânica, modificando o seu aspeto e configuração, e pela transmissão, que liga os atuadores à estrutura mecânica. Estes sistemas possuem também sensores, internos que permitem fornecer informação sobre o estado do manipulador, como por exemplo a posição, velocidade ou aceleração deste, e externos, que fornecem informação sobre o ambiente, por exemplo sensores de momento, força ou câmaras de vídeo para a deteção de um determinado ponto.

Estes sistemas necessitam também de um controlador, um dispositivo que controla o movimento do manipulador. Este controlador é muito importante para que o manipulador desempenhe as tarefas propostas de forma correta, e para tal utiliza modelos do manipulador e do ambiente, e com a informação fornecida pelo operador e pelos sensores, efetua as operações algébricas de cálculo necessárias, enviando de seguida os sinais de controlo aos atuadores, conseguindo realizar a tarefa proposta. Para além disso, este sistema necessita também de uma unidade de potência, que proporciona energia aos atuadores. Na Figura 2-14 encontra-se esquematizado a comunicação que ocorre entre os diversos subsistemas do manipulador, assim como as funções desempenhadas por cada parte para o funcionamento deste.

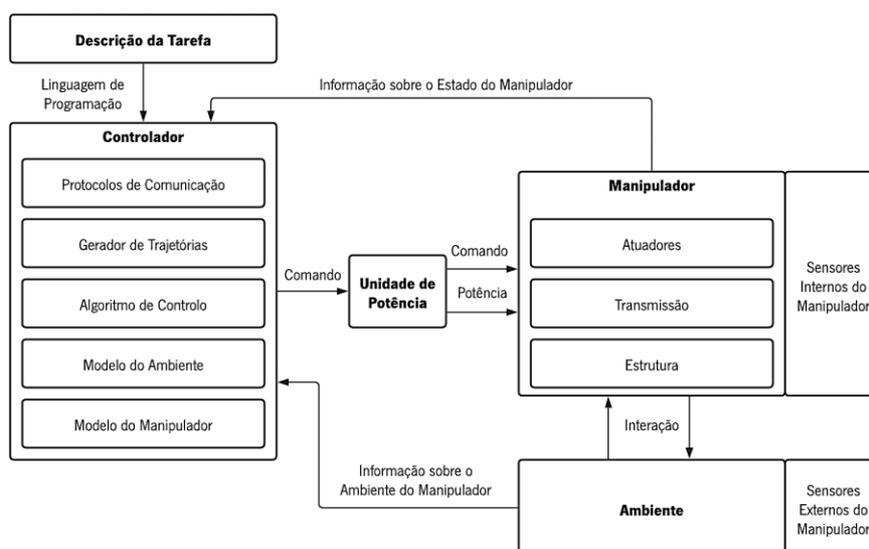


Figura 2-14 - Elementos principais que constituem um manipulador e as suas funções desempenhadas [6].

### 2.3.2 Configurações de manipuladores

Com o avanço tecnológico foram desenvolvidas diversas configurações para os manipuladores. Estas configurações robóticas tendem a adaptar-se melhor que outras em diferentes tarefas, das quais podem-se encontrar tipicamente 5 configurações:

- Configuração cartesiana;
- Braço articulado;
- SCARA (Selective Compliance Automatic Robot Arm);
- Configuração cilíndrica;
- Configuração em Delta.

A configuração cartesiana realiza o seu trabalho através de movimentos nas três direções ortogonais (OX, OY e OZ, em que O é a origem), por intermédio das suas articulações prismáticas. Nesta configuração o eixo de coordenadas X representa o movimento para a esquerda/direita, o eixo de coordenadas Y o movimento para a frente/trás e o eixo de coordenadas Z o movimento para cima/baixo. Na Figura 2-15 está representado um sistema deste tipo.



Figura 2-15 - Modelo de Robô linear da KUKA [7].

O movimento desta configuração é realizado lineamente nas três direções, o que representa uma vantagem já que facilita o seu modelo cinemático, simplificando a sua visualização e por sua vez o controlo deste manipulador. Outra vantagem associada a este manipulador é a sua estrutura, que permite um alto grau de precisão e repetibilidade de movimento e para além disso, a sua rigidez leva uma alta capacidade de carga de forma consistente dentro do seu volume de trabalho. No entanto, a sua estrutura também acarreta algumas desvantagens devido à sua natureza, como por exemplo, a necessidade de um amplo espaço físico sendo que para um determinado volume de trabalho é necessário um tamanho de robô maior. Outras desvantagens desta configuração são a necessidade de

proteger as suas barras de transmissão para evitar a acumulação de pó nas mesmas e o perigo de colisão com objetos no interior do seu volume de trabalho [8].

A configuração robótica de braço articulado é semelhante a um braço humano. Estes robôs possuem juntas rotativas as quais conferem um grau de liberdade. Os graus de liberdades deste robô podem variar de 4 a 7 e graças à sua estrutura altamente flexível, consegue atingir qualquer posição e orientação dentro do seu espaço de trabalho, permitindo o alcance em área sob e sobre objetos, evitando a colisão com eventuais obstáculos. Na Figura 2-16 encontra-se ilustrado o modelo KR4, de configuração braço articulado, fabricado pela marca KUKA [7].



Figura 2-16 - Modelo KR4 Agilus da fabricante KUKA [7].

Estes robôs são vastamente utilizados na indústria devido à sua flexibilidade para a realização de diversas tarefas, cobrindo um volume de trabalho bastante largo em comparação ao tamanho do robô e ao espaço de chão utilizado, que é mínimo. No entanto, para atingir a sua flexibilidade máxima, é necessário o aumento do número de graus de liberdade, o que aumenta a sua complexidade e com isto é dificultada a sua visualização e programação, aumentando também o seu custo.

Como uma opção mais simples e de custo mais baixo surge a configuração SCARA este é um tipo especial de configuração de braço articulado, no qual os seus eixos verticais são utilizados para juntas de ombro e cotovelo de forma que sejam compatíveis com movimentos na direção horizontal, o que leva um volume de trabalho horizontal. A ferramenta nesta configuração move-se para cima ou para baixo, o que facilita a realização de tarefas para a inserção de componentes verticalmente [9]. Na Figura 2-17 encontra-se representado o modelo KR, de configuração SCARA produzido pela marca KUKA [7].



Figura 2-17 - Modelo KR SCARA da fabricante KUKA [7].

Devido às suas características, esta configuração realiza movimentos rápidos e com alta precisão, tornando esta a mais adequada para realizar movimentos de ponto a ponto. A sua capacidade de inserir peças verticalmente facilita a realização de tarefas de montagem com tolerâncias apertadas, mantendo uma alta rigidez na direção vertical. Por outro lado, a velocidade e precisão, com que realiza os seus movimentos limita a variedade destes, não permitindo o controlo total das diversas orientações da peça a manipular. Uma consequência negativa é a menor flexibilidade nas posições próximas da base do robô. Relativamente aos manipuladores de configuração Delta, estes consistem em três braços unidos a uma base por juntas universais. Cada braço possui o seu próprio motor, que pode ser acoplado diretamente ao eixo ou através de um sistema de transmissão. Esses braços “bíceps” são conectados a hastes de ligação leves e dispostos em paralelogramos para restringir o movimento de torção e assim aumentar a sua robustez. Esses braços são conectados a uma plataforma inferior central onde a ferramenta é montada, podendo ser acrescentado um quarto eixo de rotação na sua extremidade. Um exemplo de um robô com esta configuração pode ser visto na Figura 2-18 [8][10].



Figura 2-18 - Modelo de Robô DELTA da ABB

Esta estrutura permite a redução de peso dos braços e do manipulador e, conseqüentemente, possibilita o uso de maiores acelerações e velocidades. No sentido oposto, esta falta de robustez limita o uso do robô a aplicações de baixa carga.

A configuração cilíndrica menos usual, pode ser bastante eficiente para operações de montagem, manuseio de máquina-ferramenta, soldadura por pontos e tratamento em máquinas de fundição sob pressão. Estes manipuladores consistem numa combinação de eixos lineares e de rotação, onde tipicamente a base possui rotação, seguida de um eixo vertical e horizontal, como se pode ver na Figura 2-19. A sua principal vantagem é a sua robustez e facilidade de visualização e programação. Tal como os robôs SCARA, a sua geometria não permite chegar a posições muito próximas da base, assim como se encontra representado na Figura 2-19, na qual é possível verificar que quando se aproxima do seu eixo de rotação impossibilita a manipulação de objetos nessa área [11].

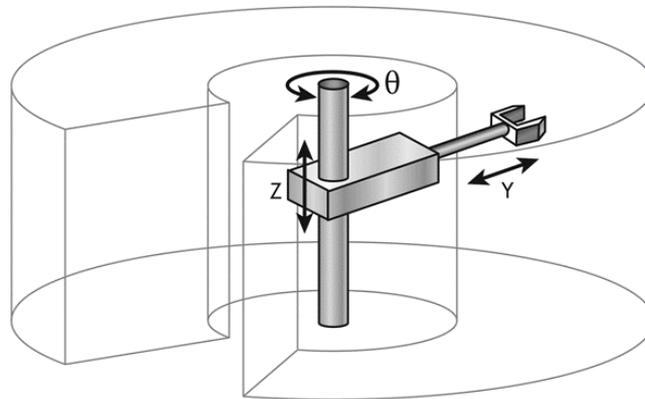


Figura 2-19 - Esquema de uma configuração cilíndrica

Com a escolha de uma destas configurações robóticas, encontra-se também a necessidade de verificação de que o robô seja colaborativo, ou *cobot*, permitindo o trabalho lado a lado com humanos e a partilha de tarefas, facilitando o trabalho do operador humano. A coabitação é possível devido aos recentes desenvolvimentos na área, na qual os robôs são equipados com mecanismos sofisticados de segurança suportados por um controlo da força aplicada nos seus movimentos e pelos diversos sensores, que permitem uma monitorização do ambiente ao seu redor. A principal vantagem associada a este robô prende-se à sua baixa capacidade de carga útil e à sua velocidade de trabalho inferior em comparação aos restantes tipos de robôs, isto para garantir o ambiente de trabalho seguro para o operador humano [10].

Existem diversos fabricantes de robôs manipuladores no mercado, destacando-se neste variado leque a KUKA [7], na qual, as suas linhas de produtos são variadíssimas, possuindo robôs de configuração cartesiana, braço articulado e SCARA. Nos diversos catálogos dispostos pelos *websites* dos diversos

fabricantes disponíveis, existem inúmeros robôs que poderiam ser indicados para a tarefa proposta, sendo que não é uma tarefa de alta exigência a nível da velocidade do robô, assim como a capacidade de carga não será relevante pois tanto as agulhas como as camisas são objetos de pouco peso. Para o projeto, devem ser contactados os diversos fabricantes de forma a poder perceber o custo dos diversos robôs desenvolvidos por estes, e após isto tomar a decisão sobre o manipulador e a configuração a adotar, procurando a melhor relação entre a qualidade desta, para a realização da tarefa pelo custo do manipulador.

A Tabela 2-1 sumariza as principais características, para este projeto, de cada configuração de robô descrita anteriormente. Na tabela são comparadas diversas características de forma qualitativa e comparativa através da utilização de estrelas, em que um maior número de estrelas implica um melhor desempenho na respetiva característica. Além dos atributos tradicionais, foi adicionado um quinto atributo que se relaciona com a flexibilidade permitida para a ferramenta/garra a utilizar.

Tabela 2-1 - Comparação entre configurações robóticas.

	<b>Cartesiana</b>	<b>Braço Articulado</b>	<b>SCARA</b>	<b>Delta</b>	<b>Cilíndrica</b>
Capacidade de Carga	***	**	**	*	***
Repetibilidade	***	**	***	***	**
Alcance	*	***	**	*	**
Velocidade	**	**	***	***	*
Ferramenta	**	***	*	**	**

### 2.3.3 Sistemas de fixação

Os sistemas de fixação, também conhecidos como *garra* ou *grippers*, são subsistemas de mecanismos de manipulação, atuando como uma barreira física que interliga o equipamento manipulado com a peça de trabalho, atuando com os seus dedos no objeto a ser manipulado.

De acordo com [12], as funções desempenhadas por estes dependem das aplicações em que são incluídos, sendo estas por exemplo:

- Manutenção temporária de uma posição e orientação definida da peça de trabalho relativa à garra e ao manipulador;
- Retenção de forças estáticas (peso), dinâmica (movimento, aceleração, desaceleração), específicas ao processo e momentos;

- Determinação da mudança de posição e orientação do objeto relativa ao manipulador através do eixo do pulso;
- Realização de operações técnicas específicas com a garra.

A tarefa desempenhada pela garra é influenciada principalmente pela peça a manipular, na qual as características da peça, tal como as suas propriedades geométricas e físicas, determinam o tipo ou o princípio da operação realizada. Para além disto, o estado da peça de trabalho também é um fator crucial, no qual a informação sobre a posição e orientação da mesma, dentro do espaço de trabalho, deve ser considerada para que esta seja controlada de forma segura.

As garras não são necessárias apenas para utilização em manipuladores industriais, estas são um componente universal na automação, podendo operar em diversos cenários. O elevado número de requisitos, a diversidade das peças de trabalho e a adaptação da garra para um funcionamento viável levaram ao desenvolvimento de diversas configurações, de forma a responder a estas necessidades. A otimização da garra no desempenho da sua tarefa é um fator que influencia a eficiência económica dos sistemas de montagem automática. Para tal, é necessário que as garras sejam flexíveis, pois a montagem de componentes não se relaciona apenas com a preensão e manipulação de objetivos, mas também com operações de pressão, encaixe e junção de peças [12].

A preensão da peça de trabalho é alcançada através da produção de uma força pela garra e de acordo com o objeto a ser manipulado, esta preensão pode ser atingida de diversas formas. Para tal, deve ser analisado o objeto de forma a definir o método de preensão a utilizar, no qual as características do movimento também devem ser consideradas para que este seja estável, livre de colisões e para que o objeto a ser manipulado se encontre alinhado da forma projetada. Em certos casos, a força de preensão apenas precisa de ser transmitida através de fricção superficial, com pressão aplicada na superfície da peça de trabalho. Por outro lado, em peças que reagem à pressão, em que a sua superfície facilmente se deforma ou danifica, é necessário definir um máximo de pressão a aplicar. Por razões de segurança, a pressão máxima a aplicar durante a preensão da peça de trabalho deve ser menor do que a pressão aprovada para o respetivo material.

Para a adição da garra ao sistema manipulador deve-se ter em consideração a flexibilidade necessária para que esta desempenhe a sua tarefa. A flexibilidade da garra define a capacidade desta de realizar diferentes tarefas e processos, em que quanto maior a gama de aplicações em que esta se insere, maior será a sua flexibilidade, o que por sua vez leva ao aumento do seu custo. Na Figura 2-20 encontra-se representada a variação do custo com o aumento da flexibilidade, na qual pode-se verificar que a solução mais complexa e capaz de manipular diferentes objetos é a mais cara.

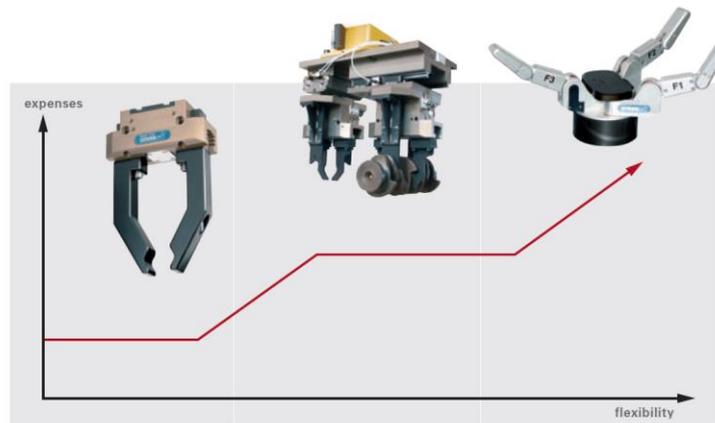


Figura 2-20 - Relação do custo da garra com a flexibilidade [6].

Naturalmente para determinadas operações de automação simples, uma garra menos flexível e mais barata é suficiente, no entanto para outras aplicações mais exigentes é necessário optar por uma construção especial capaz de responder à tarefa ou conjunto de tarefas propostas. Em aplicações que não permitam a troca da garra, e que necessitam da manipulação de diferentes peças de trabalho, é necessário o investimento numa garra mais complexa, com maior flexibilidade e com isto um maior custo.

#### 2.3.4 Método de fixação

Os sistemas de fixação baseiam-se na ação de agarrar, o que denota o movimento fundamental que consiste na apreensão e retenção do objeto. A forma com que estes sistemas abordam o objeto varia pelo tipo de procedimento, as condições e a força a aplicar para agarrar o mesmo. De acordo com [12], o procedimento de agarrar o objeto pode ser dividido em quatro fases:

- Preparação para o contacto, através de uma orientação apropriada no objeto, seguida do movimento padrão predefinido. Nesta fase pode ser necessário a utilização de restrições para forçar o objeto a atingir a posição predefinida, como por exemplo, através da utilização de um tapete rolante ou de um sistema de alimentação;
- Apreensão é estabelecida através do contacto entre o objeto e a superfície do sistema de fixação, em que o objeto fica sujeito a forças e momentos estáticos;
- Retenção do objeto durante a sua manipulação no espaço, no qual este pode ser rodado, movimento ou até montado, de acordo com o programa de trabalho predefinido. Nesta fase, as

forças e momentos dinâmicos ocorrem durante o movimento da peça ou devido aos procedimentos para as tarefas propostas;

- Libertação do objeto no seu ponto de destino final, por exemplo, desligando o fornecimento de vácuo e, possivelmente, usando a assistência de um mecanismo de ejeção integrado.

Para agarrar e segurar um objeto pode-se optar por diferentes métodos, escolhidos de acordo com a forma, material, tamanho e topologia do objeto a ser manipulado. Os diferentes métodos assim como os tipos de garra e exemplos encontra-se representados na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 - Classificação de garra de acordo com o seu princípio físico de operação [12].

<b>Método de Preensão</b>	<b>Tipo de Garra</b>	<b>Exemplo</b>	<b>Materiais típicos dos objetos manipulados</b>
Força de Impacto		Grampos (dedos externos e internos, mandril, braçadeiras de mola), pinças (paralelas, em tesoura, angulares e radiais)	Objetos rígidos
Força atrativa	Intrusiva	Alfinetes, agulhas e pelos	Objetos flexíveis: têxteis, fibra de carbono e de vidro
	Não-intrusiva	Gancho e laço	
Força por adesão	Sucção por vácuo	Copo/fole de sucção a vácuo	Objetos não porosos e materiais rígidos
	Adesão magnética	Ímã permanente, eletroímã	Materiais ferrosos
	Adesão elétrica	Campo eletrostático	Materiais de chapa leve e microcomponentes
Força por toque	Térmica	Congelamento, derretimento	Objetos flexíveis: têxteis, fibra de carbono e de vidro
	Química	Adesivo <i>permatack</i>	Fibra de carbono com impregnação de cola
	Fluída	Ação capilar, tensão superficial	Objetos leves e pequenos (microcomponentes)

Como se pode verificar na Tabela 2-2, os sistemas de fixação podem ser categorizados em quatro grupos principais de acordo com o método de preensão utilizado: força de impacto, onde é aplicado diretamente uma força mecânica de duas ou mais direções no objeto; força atrativa, em que é aplicado uma força de ligação numa única direção, que irá atrair o objeto ao sistema de fixação; força ingressiva, em que a preensão do objeto é alcançada através da permeação da superfície do mesmo; força contigutiva, através

de métodos não impactantes em que o contacto direto é necessário para fornecer uma força de preensão numa única direção [12].

Geralmente, em ambiente industrial, a maioria das garras utilizam o método por força de impacto, ou de força atrativa, com a sucção a vácuo. No entanto, no desenvolvimento do sistema de fixação deve-se ter em consideração todos os métodos disponíveis, sendo que por vezes, o trabalho em conjunto destes permitirá alcançar o objetivo pretendido. Os princípios essenciais para estratégias de preensão encontram-se esquematizados na Figura 2-21.

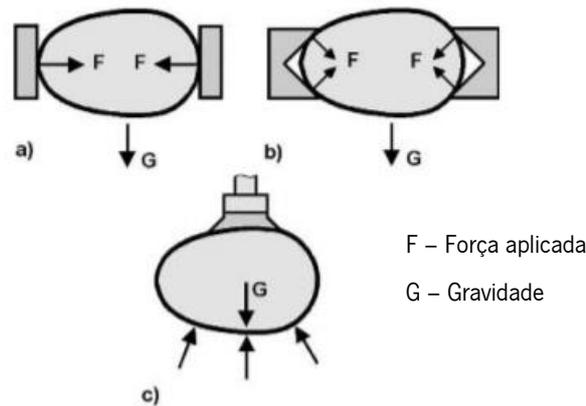


Figura 2-21 - Princípios essenciais para estratégias de agarrar objetos, a) preensão de impacto direta em dois pontos, b) preensão de impacto de acordo com a forma do objeto, c) preensão com força atrativa por sucção a vácuo [12].

### 2.3.5 Requisitos e características das garras

A escolha e o projeto da garra dependem principalmente da tarefa que será desempenhada. As tarefas de preensão efetuadas são geralmente caracterizadas pelos requisitos tecnológicos, que intervêm no tempo de manipulação da peça de trabalho, pelos atributos dos objetos, como por exemplo a sua forma, tamanho, massa e posição, que influenciam, respetivamente, a superfície, o alcance e a força da garra e o ponto de preensão. Para além destes, a tarefa pode ser caracterizada por fatores relacionados com o equipamento de manipulação, como por exemplo, a precisão posicional e a aceleração axial e também pelos parâmetros ambientais, que incluem as forças do processo, as condições da alimentação, armazenamento, contaminações e vibrações. A escolha do princípio de funcionamento da garra é baseada na análise dos seus requisitos, permitindo assim definir como esta irá realizar a tarefa proposta. Para o projeto de uma garra, em que todo o espectro do projeto deve ser tratado, desde a peça a manipular até à garra, o desenvolvimento deste deve-se iniciar pela análise do objeto a manipular e das condições do processo. Na situação em que a peça de trabalho é de geometria complexa, será necessária uma análise extensa à mesma de forma a encontrar os pontos de preensão mais adequados.

Na Figura 2-22 encontra-se representada uma visão geral que pode ser usada para a pré-seleção de garras por força de impacto e força atrativa de acordo com as características do objeto.

physical principle		impactive mechanical				pneumatic	magnetic	
		parallel gripper	radial gripper	angle gripper	3 point gripper	suction gripper	permanent magnet	electro-magnet
mass	0.2 to 1 kg	■	■	■	■	■	■	
	1 to 10 kg	■	□	■	■	■		
	10 to 50 kg	■□	□	■	■	■		■
	heavier than 50 kg	□		■	■	■□		
dimensions	20 to 50 mm	■	■	■	■	■	■	■
	50 to 300 mm	■	□	■	■□	■	■	■
	300 mm to 1 m	■		■	□	■		■
	more than 1 m	■		■		■		■
inner grip surfaces		■		□	■			■□
surface	polished	■	■	■	■	■	■	■
	rough	■	■	■	■			■□
	porous	■	□	□	□	□		■□
	sensitive	□		□	□	■	■	■
round parts	disk	■□	■		■	■	■	■
	short cylinder	■	■	■	■	■		■
	shaft, rod	■□		■				■□
prismatic parts	block part	■	■	■		■	■	■□
	flat/short	□	■	□		■	■	■
	flat/long			□		■	■□	■
synthetics		■	□	□		■		
textiles						□		
foil						■□		
glass		□	■□	■□	■□	■		
stoneware		□	■□	■□	■□	□		
sheet metal		■□		■□		■	■	■

■ Adequado  
 ■□ Condicionalmente adequado  
 □ Inadequado

Figura 2-22 - Classificação aproximada de objetos e atribuição de possíveis tipos de garra [12].

## CAPÍTULO 3

### 3 PROJETO CONCRETUAL

Neste capítulo é abordado o projeto concretual, onde são estabelecidos os objetivos, funções e especificações do equipamento a projetar e com base neste, inicia-se a criação e sugestão de possíveis soluções para o projeto. Com a definição da necessidade e a identificação do problema, são desenvolvidas as especificações e a árvore de funções de produto, que permitem gerar soluções concretuais para as principais funções, que são comparadas entre si e, destas soluções, é selecionada a mais apropriada para ser posteriormente desenvolvida e detalhada.

#### 3.1 Descrição do equipamento

Uma empresa portuguesa desenvolve sistemas de ICT para PCB's. Este sistema consiste numa cama de agulhas que permite testar um ou mais produtos. Assim como já foi mencionado na secção 1.1, não existem sistemas automatizados para a montagem de agulhas no fabrico de cama de agulhas. A manufatura destes sistemas inicia-se com o contacto do cliente, que indicará a máquina que pretende realizar os testes, assim como o número e o tipo de placas que pretende testar. Dependendo do pedido do cliente, será gerado um conjunto de ficheiros, em formato de Excel, que indicam quais as agulhas a serem inseridas em cada ponto da placa furada, assim como os fios condutores que devem ser ligados às agulhas, descrevendo o processo de fabrico para o equipamento desejado.

A construção de uma cama de agulhas pode ser analisada por duas perspetivas diferentes:

- Parte mecânica, que define a melhor abordagem para a colocação do PCB na cama de agulhas, realizada através de uma guia de movimento na vertical, que garante que as agulhas entram em contacto com o ponto de teste, sem haver colisão entre as componentes do PCB e os calçadores que suportam e fixam, de forma adequada, a placa no decorrer do teste;
- Parte elétrica, que após a conversão de um ficheiro Excel, guarda as coordenadas de todos os pontos relevantes no sistema, sendo estes posteriormente analisados, definindo os pontos de teste e o esquema elétrico que permite destacar as agulhas de alimentação de testes de *Boundary-Scan*, de barramento *Joint Test Action Group (JTAG)*, de *compliance*, de controlo de memória e de *enable*. Estes testes são realizados através do contacto entre as agulhas com as componentes do PCB colocado na zona de teste, onde serão ativados centenas de pontos de acesso entre estes, que serão lidos e analisados pelo *software*.

Como já foi mencionado anteriormente, este sistema consiste numa placa de teste fabricada sob medida com vários orifícios onde os recetáculos e as agulhas serão inseridos. Do lado contrário da placa, o conjunto recetáculo-agulha é conectado através de um sistema de *wiring*. Este sistema permite medir parâmetros elétricos sobre o PCB em teste, conectando este ao *software*.

O processo de construção consiste em duas partes principais, o processo de *wiring* e o processo de inserção dos recetáculos e das agulhas, sendo que este último processo é o foco do projeto. O processo de inserção de recetáculos e agulhas é um processo atualmente manual, no qual são inseridos os recetáculos que servem de orientação para a inserção das agulhas, de acordo com o que foi mencionado na secção 2.2. Na Figura 3-1 encontra-se apresentado o desenho técnico de um recetáculo e na Figura 3-2 é feita uma comparação do recetáculo e da agulha com uma caneta normal.

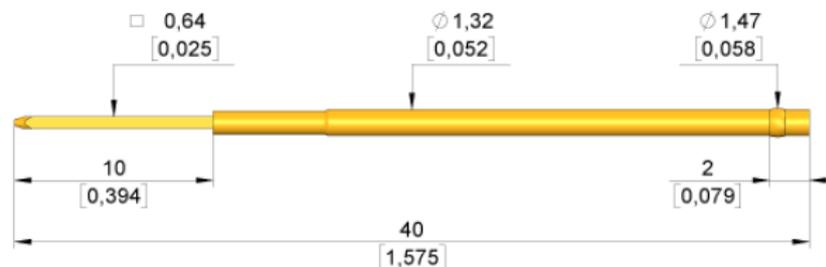


Figura 3-1 - Desenho técnico de um recetáculo (KS-075 47 E03 Ingun) [13].

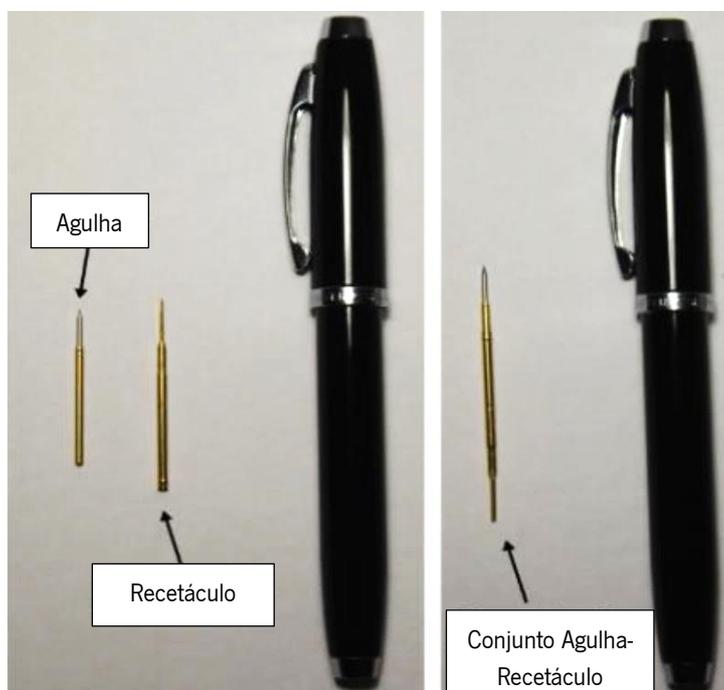


Figura 3-2 - Tamanho do recetáculo e agulha [13].

Analisando a Figura 3-2, pode-se verificar que o tamanho e o diâmetro do recetáculo e da agulha serão um problema, tendo em consideração que o nível de precisão para a sua inserção irá rondar as centésimas de milímetro.

A inserção do recetáculo é efetuada com a utilização de uma ferramenta de precisão que auxilia o técnico a pressionar este para a sua posição final, que se encontra apresentada na Figura 2-9.

O ângulo e a força aplicada pelo técnico nos recipientes podem deformá-los e fazer com que as agulhas fiquem desiguais no final do processo. Por ser um processo artesanal, também é difícil garantir a perpendicularidade entre o eixo do recetáculo e a placa de teste, como já foi explicado na secção 2.2. Este processo de fabrico pode levar até mais do que uma semana de trabalho, dependendo do PCB a ser testado e é um processo verdadeiramente repetitivo, exigindo altos níveis de concentração e sensibilidade dos técnicos durante o mesmo. Este processo é altamente dependente da habilidade do operador e requer anos de treinamento e experiência, o que é uma desvantagem competitiva. Também é importante observar que se o recetáculo estiver mal colocado, conseqüentemente a agulha correspondente e a cama de agulhas não serão totalmente validados internamente, uma vez que estes erros são indetetáveis pelo olho humano.

De forma a eliminar ou mitigar os problemas descritos anteriormente, será desenvolvido um sistema capaz de colocar os recetáculos automaticamente, de forma precisa e com uma elevada repetibilidade. Esta solução para a automatização do processo de construção pode ser decomposta em dois grandes grupos pela sua função:

- Grupo *hardware*, que compreende todos os subsistemas que vão executar tarefas relacionadas com a inserção dos recetáculos e agulhas;
- Grupo do sistema de validação, que irá validar a colocação das agulhas segundo parâmetros de qualidade bem definidos.

O grupo de *hardware* consiste no sistema que possibilitará a manipulação e posicionamento das agulhas de forma correta e precisa na placa de teste. Este grupo pode ser dividido em três subsistemas: o manipulador, a autoalimentação e a garra. Na Figura 3-3 encontra-se representado parte do conjunto de *hardware*.

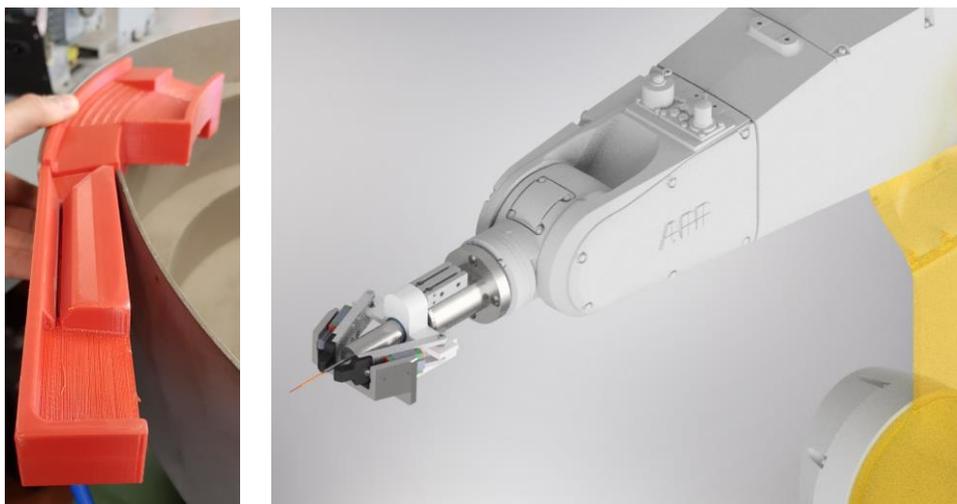


Figura 3-3 - Sistema de alimentação de recetáculos, imagem à esquerda e sistema de fixação e transporte, imagem à direita

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento do subsistema de fixação (garra), que será incorporado no manipulador, que realizará o movimento de transporte desde a zona de autoalimentação, capturando a agulha neste local, transportando-a de seguida para o ponto onde se pretende que a mesma seja inserida. Nos próximos subcapítulos será abordado o processo do projeto de desenvolvimento do subsistema de fixação de recetáculos e agulhas.

### 3.2 Objetivos do projeto

Com a necessidade de um novo produto estabelecida é necessário definir os objetivos deste para que seja possível encontrar a resposta ao problema. Para isso, deve-se clarificar os objetivos e apesar destes poderem mudar ou serem completamente alterados, serão a base para compreensão do problema, permitindo o desenvolvimento de soluções.

Assim, de forma a controlar e administrar todo o processo do projeto, deve-se utilizar uma lista com a exposição dos objetivos, de forma simples e facilmente entendível. Esta lista deve ir de acordo com os requisitos do cliente, devendo ser aprovada pelo mesmo e pelos membros da equipa. O método da árvore de objetivos permite listar os objetivos com um formato útil e claro para a sua exposição.

Com isto, foi criada uma árvore de objetivos, apresentada na Figura 3-4, na qual se definiu que o sistema de fixação será um equipamento seguro, com um custo eficaz e eficiente. São estes os objetivos gerais para o produto. O método da árvore de objetivos segue uma abordagem crescente na hierarquia para se obter a resposta ao “Porquê?” de ser necessário aquele objetivo e, de forma decrescente, responde-se ao “Como?” se irá obter esse objetivo. Por exemplo, definiu-se o objetivo que o sistema de fixação deve ser seguro, em que as respostas ao “Como?” se encontram na hierarquia inferior, nomeadamente,

seguro para os trabalhadores e seguro para o ambiente de trabalho e o “Porquê?” de se pretender que seja seguro para os trabalhadores, ou seja, ser seguro.

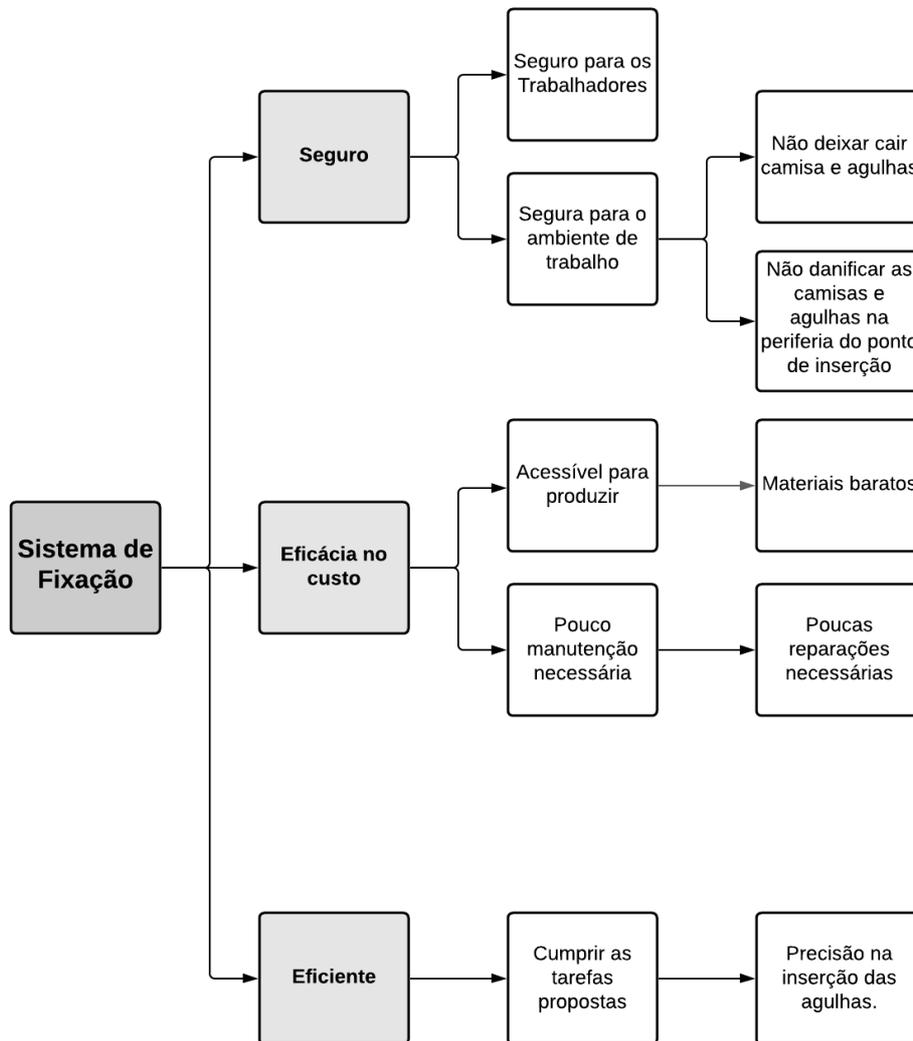


Figura 3-4 - Árvore de objetivos para o Sistema de Fixação.

### 3.3 Árvore de funções do mecanismo

Depois de definidos todos os objetivos, é necessário dividi-los em funções. Através do método da análise de funções, são consideradas inicialmente as funções essenciais para o sistema para a conversão de entradas em saídas. O ponto de partida baseia-se no que deverá ser alcançado pelo que vai ser concebido. O diagrama de função geral do sistema de fixação é simples e é expresso com uma simples “caixa negra”, que converte certas entradas em saídas. Este diagrama encontra-se esquematizado na Figura 3-5.

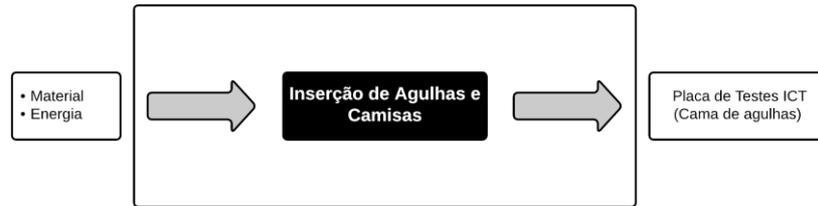


Figura 3-5 - Diagrama de “Caixa Negra” com a função principal do sistema

No entanto, para ser feita uma análise mais sistemática, é necessário decompor a função principal nas suas respectivas subfunções. Para isso foi desenvolvido um diagrama de blocos, que consiste na representação de todas as subfunções, que foram separadamente identificadas, ligando-se entre si por entradas e saídas, de forma a satisfazer a função global do sistema de fixação, que neste caso é a inserção de agulhas ou camisa.

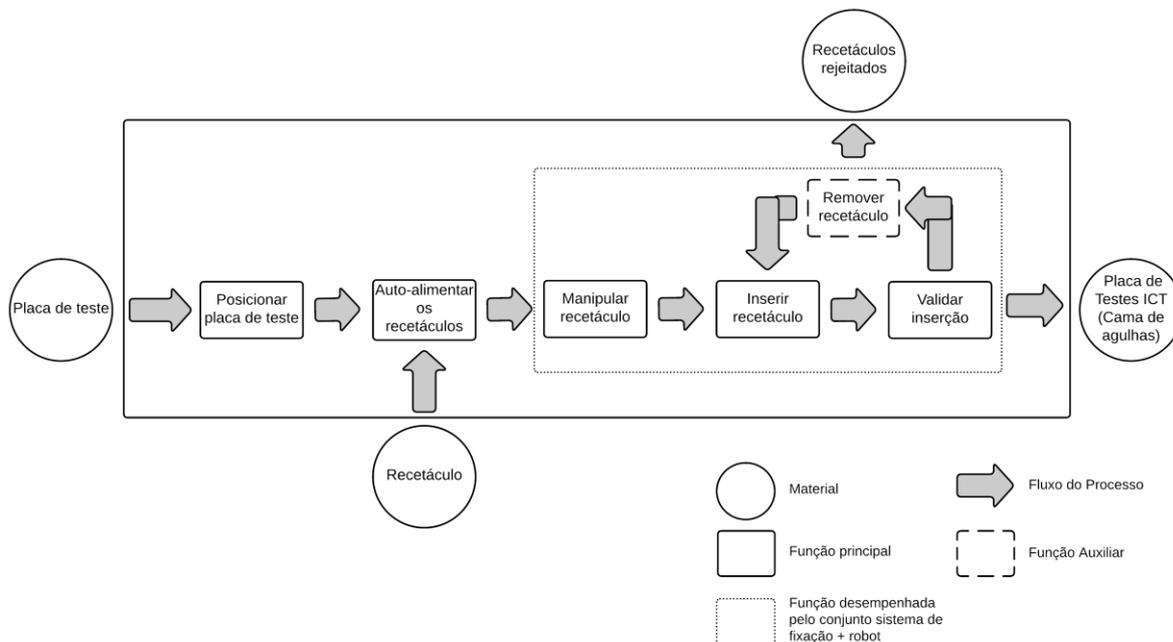


Figura 3-6 - Diagrama de funções do sistema para automatização para o fabrico de cama de agulhas.

O diagrama apresentado na Figura 3-6 apresenta o conjunto de subfunções para o sistema de automatização, sendo estas desempenhadas pelos três constituintes principais mencionados no subcapítulo 3.1, sistema de autoalimentação de recetáculos, manipulador, e sistema de fixação. As subfunções podem ser descritas da seguinte forma:

- Posicionar placa de teste – O sistema deve garantir que a placa furada, na qual vão ser inseridos os recetáculos encontra-se numa posição conhecida, dentro das tolerâncias especificadas;

- Autoalimentar os recetáculos – De forma a reduzir ao máximo a interação do operador, é necessário garantir que os recetáculos sejam alimentados para o sistema com a orientação e posicionamento correto;
- Manipular recetáculo – Esta subfunção descreve todo o manuseamento realizado sobre o recetáculo fixado pela garra, desde o sistema de autoalimentação até à sua posição de inserção na placa;
- Inserir recetáculo – Com esta subfunção inicia-se a tarefa de inserção dos recetáculos, quando colocados na sua posição final, na placa de teste;
- Validar inserção – A subfunção final realizada pelo sistema é definida pelo subsistema que irá garantir que todos os recipientes foram colocados corretamente na placa de teste.

Como se pretende aprofundar a temática do funcionamento do sistema de fixação, foi elaborado outro diagrama de subfunções, que inclui a manipulação do recetáculo assim como a sua inserção na placa de teste. Este diagrama, apresentado na Figura 3-7, provou-se necessário de forma a descrever claramente o funcionamento da garra, servindo como base para que a solução desenvolvida cumprisse a tarefa proposta.

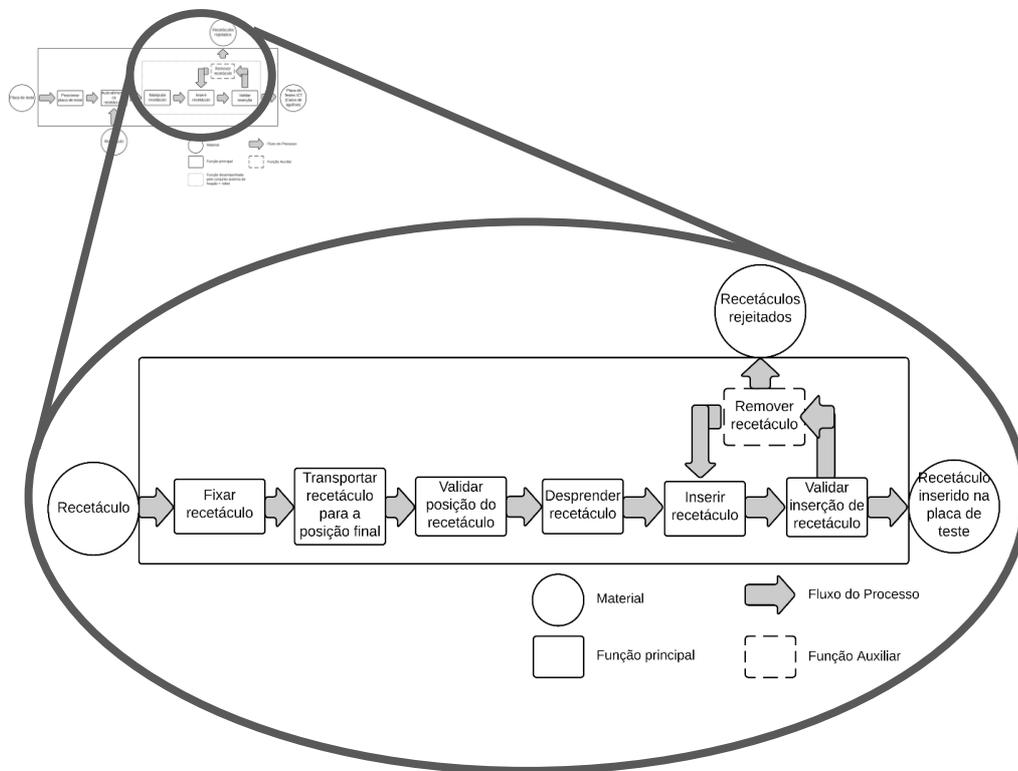


Figura 3-7 - Diagrama de funções do sistema de fixação e manipulação dos recetáculos.

As subfunções apresentadas no diagrama da Figura 3-7 podem ser descritas da seguinte forma:

- Fixar recetáculo – Após a verificação que se encontra um recetáculo para colocação, o sistema de fixação é acionado para fixar este;
- Transportar recetáculo para a posição final – O recetáculo é transportado pelo manipulador, de forma segura através da fixação da garra a partir da posição de alimentação para a posição final de colocação;
- Validar posição do recetáculo – Esta subfunção descreve o processo de validação da posição em que se encontra o recetáculo em relação ao furo em que este será inserido;
- Desprender recetáculo – Após ser inserido até a uma determinada cota, o sistema de fixação larga o recetáculo;
- Inserir recetáculo – O recetáculo pré-inserido é forçado para ser inserido no respetivo furo através da utilização de uma ferramenta;
- Validar inserção – Esta subfunção é relativa à validação efetuada pelo subsistema desenvolvido para tal, que garante que os recetáculos são inseridos de forma correta.

Por fim, foi adicionada uma função auxiliar que não está diretamente relacionada com os objetivos, mas acrescenta valor ao sistema:

- Remover Recetáculo – Esta subfunção permitirá ao sistema, durante a realização da sua própria tarefa, corrigir possíveis inserções incorretas de recetáculo.

### **3.4 Especificações do projeto**

A etapa final da definição e descrição do projeto do sistema de fixação é a listagem dos requisitos e características de engenharia extraídas da análise do problema. As especificações do equipamento são características intrínsecas do mesmo, na qual devem ser cumpridos os objetivos definidos, limitando de certo modo a procura de soluções possíveis, tornando-se uma referência para a avaliação destas assim como para a convergência na solução final.

#### **3.4.1 Toleranciamento**

Independentemente da solução escolhida e a desenvolver nas próximas etapas, é necessário definir quais as tolerâncias máximas permitidas de forma a cumprir os requisitos definidos para o sistema. Isto é, qual é o valor de toleranciamento máximo que o conjunto garra e manipulador têm de ter para cumprir esse requisito.

Estes valores resultam de uma análise às tolerâncias necessárias para a inserção dos recetáculos e agulhas com aperto, isto para cumprir os objetivos do projeto, em específico no incremento da percentagem de picagens ótimas pelas agulhas e da precisão para os pontos de teste. Neste caso, o valor da repetibilidade serve, de forma direta, como especificação para ser selecionado o manipulador, uma vez que este não tem impacto na garra, pois esta encontra-se fixa e não varia ao longo do processo. No que se refere à tolerância de posição, esta obriga a que depois do sistema montado, o valor de tolerância da garra, mais a tolerância que o manipulador permite, não ultrapassem o valor de 0,1 mm. Para o cálculo das tolerâncias necessárias para o projeto do sistema será utilizado o valor de 0,1mm como *input*. Neste tipo de cálculos existem duas abordagens comuns: o método *Worst Case* e um método estatístico. Para ser efetuado o cálculo, é necessário definir e caracterizar o ambiente em análise. E para tal foram definidos alguns pressupostos:

1. O sistema vai ser constituído por um manipulador, uma garra e plataforma que irá suportar e guiar a placa de teste;
2. O valor da tolerância do manipulador irá ser definido com base nos valores comumente encontrados no mercado;
3. A garra vai ser composta por uma junta de fixação ao robô, e um elemento de guiamento do recetáculo para auxiliar a sua inserção;
4. No interior do sistema que servirá como guiamento do recetáculo supõe-se que existirão duas dimensões que terão impacto na tolerância final deste.

Desta forma, foi possível definir quais são as dimensões para o toleranciamento, assim como o seu encadeamento. Na Tabela 3-1 encontram-se apresentadas estas dimensões, assim como as tolerâncias relativas a cada uma destas. P

Tabela 3-1 – Lista de dimensões e respetivas tolerâncias.

<b>Dimensão</b>	<b>Tolerância (mm)</b>
Precisão do manipulador	0,03
Guiamento do recetáculo 1	0,05
Guiamento do recetáculo 2	0,05
Interface manipulador/garra	0,05
Interface manipulador/plataforma	0,03

O método *Worst Case* utiliza sempre os valores máximos das tolerâncias atribuídas de forma a garantir que é conseguida uma tolerância final. Este método obriga a que uma (ou mais) das dimensões analisadas tenha uma tolerância mais restrita, algo que pode comprometer o seu fabrico, aumentando de forma exponencial o seu custo. Com este método, seguindo os valores apresentados na Tabela 3-1, a tolerância final será de  $0,03+0,05+0,05+0,05+0,03 = 0,21\text{mm}$ . Assumindo que o valor da precisão do manipulador, assim como da sua interface, não pode ser alterado, e dividindo o diferencial da tolerância máxima com a desejada, teríamos um valor de  $0,013\text{ mm}$  para cada um destes componentes, o que encaminha o projeto para um processo de fabrico mais complexo e com um custo elevado.

Relativamente aos métodos estatísticos de cálculo de tolerâncias, estes baseiam-se no cálculo de probabilidade. Assumindo que numa seleção aleatória de componentes durante a montagem, os valores limites dos desvios, só ocorrem raramente em simultâneo em diversos componentes, utiliza-se a probabilidade combinada. Admitindo um risco pré-selecionado de rejeição de alguns componentes, as tolerâncias de componentes parciais na cadeia dimensional podem ser aumentadas.

Através dos valores mencionados na Tabela 3-1, assim como os pré-requisitos utilizado no método *Worst Case* em que o valor da precisão do manipulador e da sua interface não poderá ser alterado, com uma capacidade de 99,99%, assumindo a rejeição de peças de 59.2 PPM, pode-se limitar o toleranciamento das restantes dimensões em  $0,035\text{mm}$ . Este valor, comparativamente ao valor calculado pelo método *Worst Case*, permite a utilização de um processo de fabrico mais convencional e com um custo mais conforme.

### 3.4.2 Força de Montagem

O dimensionamento correto do sistema de inserção dos recetáculos, depende crucialmente da definição das forças necessárias a aplicar para a montagem destes. Para tal, foram efetuados testes, onde um cilindro pneumático, a uma determinada pressão de ar, empurra as agulhas até à posição desejada. Para serem estudadas as diferentes hipóteses, foram utilizadas duas placas que possuem quatro conjuntos de furos, com quatro diâmetros diferentes. Destes diâmetros, dois encontram-se relacionados com o recetáculo maior, com os valores de  $1,68\text{ mm}$  e  $1,73\text{ mm}$ , e dois diâmetros relativos ao recetáculo mais pequeno, com diâmetro de  $1,31\text{mm}$  e  $1,36\text{ mm}$ . Estes valores tiveram em consideração a especificação do fornecedor para as placas de teste furadas, fabricadas por estes, assim como a experiência da empresa. Na Figura 3-8 encontra-se representada uma placa de teste de força.

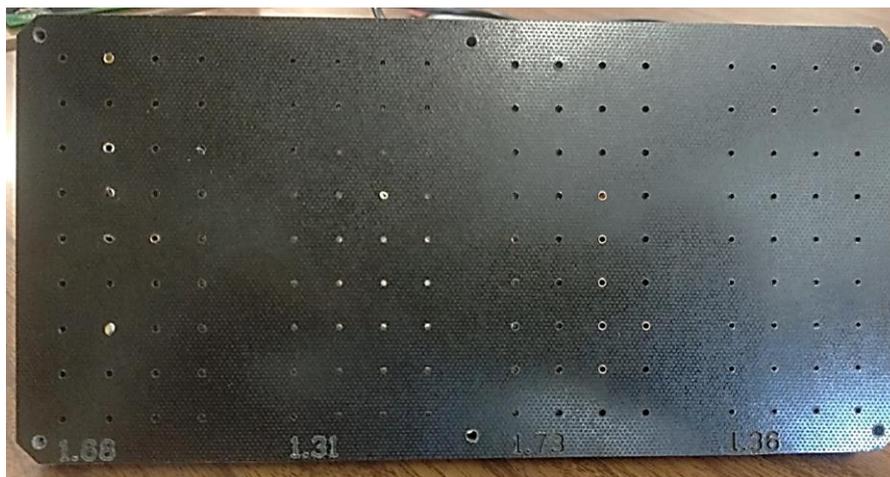


Figura 3-8 - Placa de testes de força.

O cilindro pneumático atuando, ao inserir os recetáculos na placa aplica uma força, a qual foi controlada através da variação da pressão do ar no cilindro pneumático. Esta força  $F$ , pode ser calculada através da equação seguinte, onde  $P$  representa a pressão aplicada e  $A$  a área

$$F = P \times A.$$

O cilindro pneumático tem um embolo de diâmetro 63mm, a uma pressão da rede de 6 bar do qual temos a força máxima de 1870N. Assim, o valor inicial de pressão foi 0,2 bar e foi aumentado até o cilindro ter força suficiente para inserir o recetáculo no furo. Os valores de força mais baixos estão apresentados na Tabela 3-2. No caso do furo de diâmetro 1,31mm o recetáculo deformava-se antes de ser inserido, o que indica que o recetáculo utilizado era de diâmetro superior ao furo, impossibilitando a sua inserção.

Tabela 3-2 - Pressão e respetiva força de montagem para cada tipo de furo.

	<b>Diâmetro do furo (mm)</b>		
	1,36	1,66	1,73
<b>Pressão (bar)</b>	1	0,6	0,4
<b>Força (N)</b>	311	187	125

Na Tabela 3-2 pode-se verificar que o valor para um diâmetro de furo menor resulta em uma maior força aplicada para a montagem. No caso do furo de diâmetro 1,36mm, este valor duplica em comparação aos restantes dado que esse valor se aproxima do diâmetro do recetáculo inserido, o que implica uma maior pressão necessária.

O método de montagem utilizado para este teste resulta num valor de força de montagem mais elevado em comparação ao método atual, devido à natureza do seu movimento, realizado na vertical. Por outro lado, utilizando o método atual, em que é introduzida velocidade ao movimento descendente para a inserção dos recetáculos, de forma a criar um impacto, pode-se, possivelmente, reduzir a força necessária a aplicar.

Partindo de todas as suposições abordadas anteriormente, as informações e condições necessárias para começar a desenvolver e comparar alternativas de sistemas estão reunidas.

### **3.5 Soluções desenvolvidas**

No âmbito do projeto, foram desenvolvidas diversas soluções para o sistema de fixação, abordando no processo de projeto as subfunções de manuseio, posicionamento e inserção dos recetáculos. Estas subfunções encontram-se diretamente relacionadas, uma vez que o sistema que irá desempenhar estas tarefas pode ser o mesmo.

Como já foi mencionado anteriormente, o sistema de fixação desenvolvido será acoplado a um robô manipulador, que irá controlar o funcionamento do sistema. No entanto, como o foco deste trabalho é a garra, as soluções desenvolvidas para esta serão as analisadas. Relativamente às soluções desenvolvidas, surgiram três abordagens diferentes para o sistema de fixação:

- Sistema de fixação a vácuo;
- Sistema de fixação por ação pneumática com dois cilindros pneumáticos;
- Sistema de fixação por ação pneumática com um cilindro pneumático.

A primeira e a segunda abordagem foram desenvolvidas por membros externos a esta dissertação, inseridos no projeto do sistema, enquanto a terceira foi desenvolvida pelo autor da dissertação. Estas soluções serão analisadas durante as próximas subsecções.

#### **3.5.1 Sistema de fixação a vácuo**

Uma das soluções desenvolvidas para o sistema de fixação foi o *gripper* a vácuo. Este sistema beneficia da estrutura cilíndrica e oca dos recetáculos para originar um efeito de vácuo e fixá-los.

Na Figura 3-9 está representado o fluxo de ar que ocorre neste sistema para garantir a fixação do recetáculo.



Figura 3-9 - Fluxo de ar presente no sistema de fixação a vácuo.

Este sistema permite trabalhar com peças de dimensões reduzidas, dado que a fixação é feita através do fluxo de ar.

Através de uma análise ao sistema, verifica-se que o mesmo poderá não garantir pressão suficiente para fixar os recetáculos, algo que será analisado mediante o fabrico de um protótipo. Como o funcionamento do sistema assim como as peças constituintes são simples, o fabrico não acrescenta um custo elevado ao projeto, podendo no futuro, o protótipo representar uma solução capaz de desempenhar a tarefa proposta. Na Figura 3-10 está apresentado um modelo representativo da solução desenvolvida para o sistema de fixação a vácuo.



Figura 3-10 - Visão geral do sistema de fixação a vácuo.

### 3.5.2 Sistema de fixação com dois cilindros pneumáticos

No grupo dos sistemas de fixação por intermédio da utilização de cilindros pneumáticos foram desenvolvidas duas soluções: a solução onde é utilizado apenas um cilindro pneumático para a fixação dos recetáculos, analisada no subcapítulo 3.5.3, e a solução que utiliza dois cilindros pneumáticos para a fixação dos recetáculos.

Durante o desenvolvimento destas soluções, observou-se que é necessário garantir dois aspetos principais na garra, uma função de prensão dos recetáculos e um sistema de posicionamento que garantisse que o recipiente estivesse numa posição conhecida. No sistema de fixação por um cilindro pneumático estes dois aspetos são garantidos num movimento, no entanto, na solução com dois cilindros o movimento é dividido em duas deslocações, uma para o posicionamento dos dedos da garra numa determinada posição e outra para a fixação dos recetáculos. Relativamente ao movimento de fixação, o

subconjunto que realiza esta tarefa pode ser dividido em duas partes: a parte central, onde se encontra o “pino guia”, que entra no recetáculo e guiará o mesmo para a sua posição correta na placa furada, e a parte que fixa o recetáculo, que agarra o mesmo através de um mecanismo acionado pneumáticamente. Na Figura 3-11 encontra-se representado o pino guia com um recetáculo inserido, e os dedos da garra que realizam o movimento de fixação do mesmo.

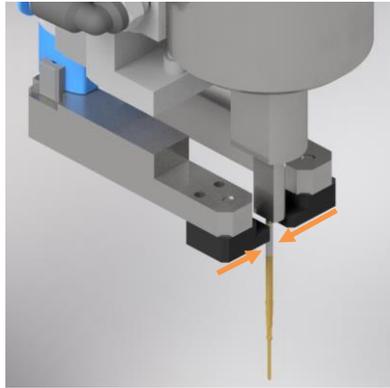


Figura 3-11 - Subconjunto para a fixação dos recetáculos.

Relativamente ao movimento para o posicionamento do subconjunto de fixação, este é realizado através de um mecanismo acionado pneumáticamente, que irá orientar este através de umas guias lineares, que permitem a realização de um movimento de alta precisão com um baixo desgaste. Este mecanismo encontra-se representado na Figura 3-12.

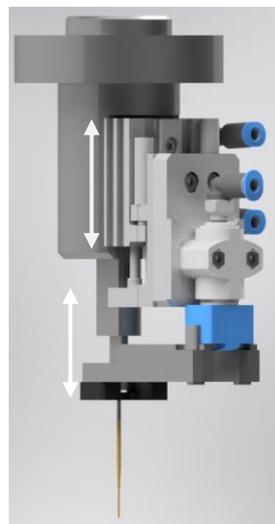


Figura 3-12 - Mecanismo de posicionamento dos dedos da garra .

Para garantir a precisão necessária, a parte que guia o recetáculo precisa de ter uma concentricidade muito boa com a parte que conecta este ao robô. A melhor forma de conseguir isso é agregando as duas funções na mesma peça, surgindo daqui uma peça estrutural que será responsável pelo posicionamento

do recetáculo e montada diretamente na flange do *robot*. Na Figura 3-13, encontra-se representada esta parte estrutural.

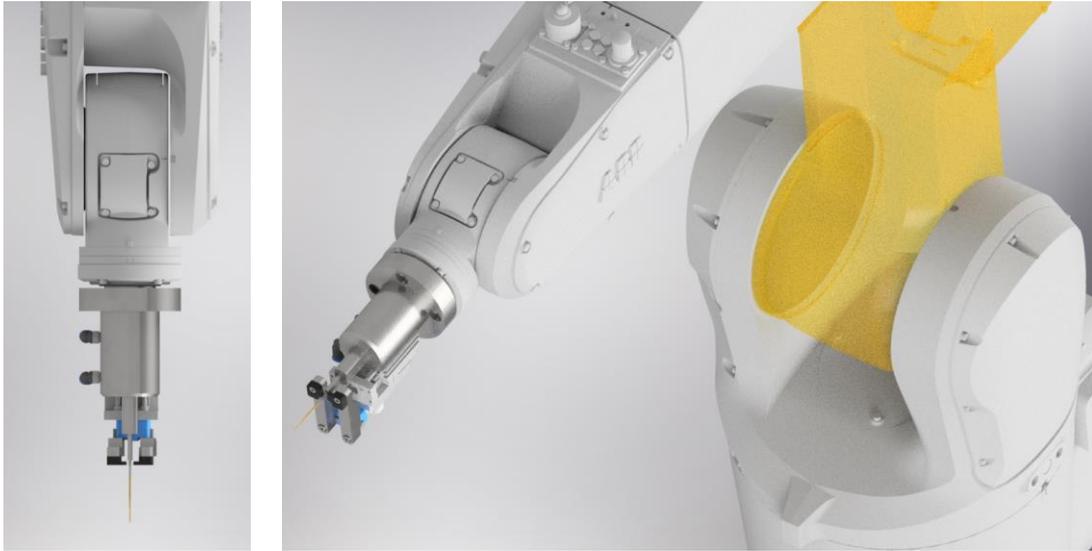


Figura 3-13 – Sistema de fixação por um cilindro pneumático montado no *robot* articulado (IRB 1200).

### 3.5.3 Sistema de fixação com um cilindro pneumático

O sistema de fixação com um cilindro pneumático é semelhante ao sistema desenvolvido na solução anteriormente mencionada, no entanto este será atuado apenas por um cilindro. Esta solução procura simplificar o sistema, reduzindo o número de movimentos efetuados durante a fixação e inserção dos recetáculos.

A simplificação do movimento não implica que este seja mais fácil de ser desempenhado, isto porque o movimento de aproximação das garras do sistema aos recetáculos, não deve entrar em colisão com nenhum obstáculo durante o seu percurso, nomeadamente recetáculos anteriormente inseridos. Com isto, foi necessário desenvolver um sistema capaz de transformar a potência linear transmitida pelo cilindro pneumático num movimento capaz de fixar o recetáculo, colocar este no seu respetivo furo e no final, capaz de o inserir.

#### 3.5.3.1 Iterações desenvolvidas

De forma a assimilar melhor este problema, serão desenvolvidas as diversas iterações efetuadas ao longo deste projeto. Estas soluções foram desenvolvidas através da utilização do *software* de modelação CAD *Autodesk Inventor*, permitindo assim perceber melhor os problemas no projeto da respetiva solução, facilitando assim as melhorias a aplicar na próxima iteração. Este processo iterativo foi crucial para o desenvolvimento da solução final e, ao longo deste capítulo, serão expostos os diversos esquemas desenvolvidos, assim como a tomada de decisões na evolução das iterações.

## Esquema 1

O primeiro esquema desenvolvido simplifica a atuação do cilindro pneumático, no qual é analisado o movimento nos dedos da garra com a atuação deste. Nesta iteração são utilizados pontos de rotação que permitem abrir e fechar os respectivos dedos da garra. Na Figura 3-14 encontra-se representado o modelo para o esquema desenvolvido.

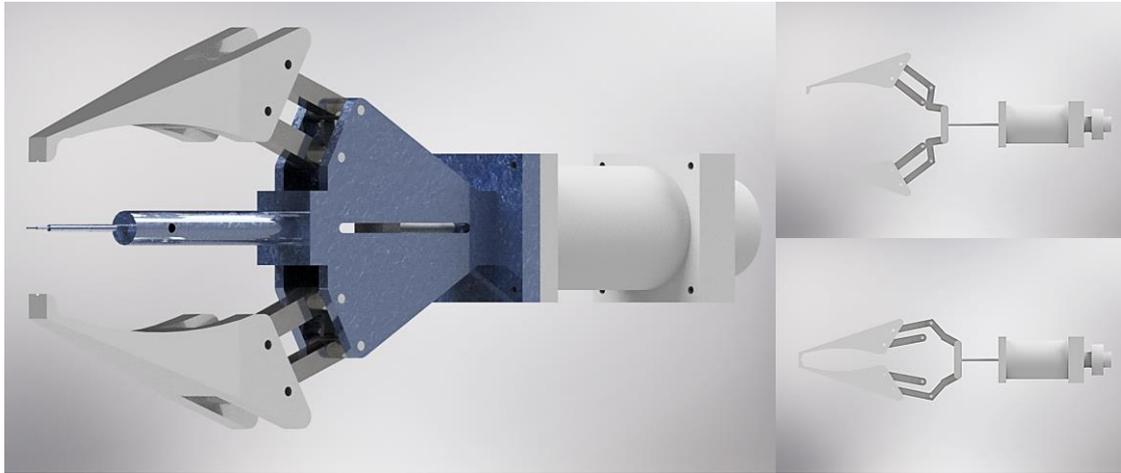


Figura 3-14 – Primeiro esquema desenvolvido com um cilindro pneumático.

A abordagem adotada para o primeiro esquema expôs um problema que se encontra no movimento de abertura e fecho dos dedos da garra. O movimento efetuado por estes pode ser descrito por um arco, tal como é mostrado na Figura 3-15, danificando assim os recetáculos que se encontram inseridos na periferia do local de inserção. Este movimento em arco é provocado pela transformação da potência linear transmitida pelo cilindro pneumático, num movimento de rotação.

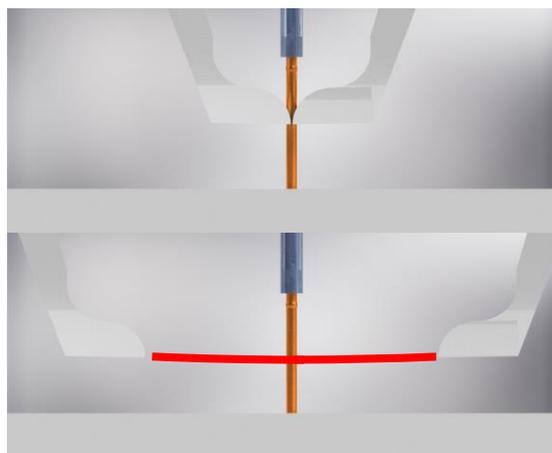


Figura 3-15 - Caminho percorrido pelos dedos da garra durante a abertura.

## Esquema 2

Para o segundo esquema desenvolvido foi utilizado um modelo para o cilindro pneumático de forma a caracterizar o grupo estrutural que o irá suportar, colocando-o numa posição central do mecanismo. Neste esquema foram adicionadas duas placas de forma a garantir um ponto de rotação sobre estas, permitindo a abertura e o fecho dos dedos da garra. O segundo esquema desenvolvido encontra-se representado na Figura 3-16.

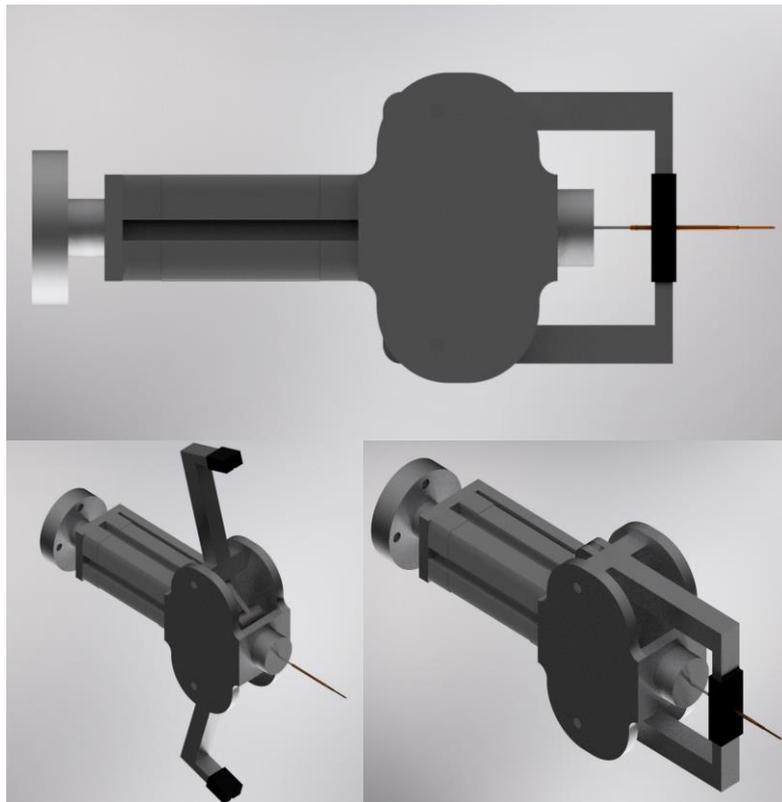


Figura 3-16 - Segundo esquema desenvolvido.

Assim, como no esquema apresentado anteriormente, o movimento de rotação efetuado sobre um dado ponto pelos dedos da garra implica que estes, durante o percurso de abertura, colidam com os recetáculos previamente inseridos. Para além deste problema, com a inclusão de um modelo normalizado para o cilindro pneumático, surgiu a necessidade de garantir a perpendicularidade do sistema, para que a inserção do recetáculo não seja defeituosa.

## Esquema 3

No terceiro esquema desenvolvido, a aplicação da força do cilindro pneumático nos dedos da garra é alterada. Este esquema é idêntico ao anterior, no entanto neste é utilizado o movimento linear provocado pelo cilindro diretamente nos dedos da garra.

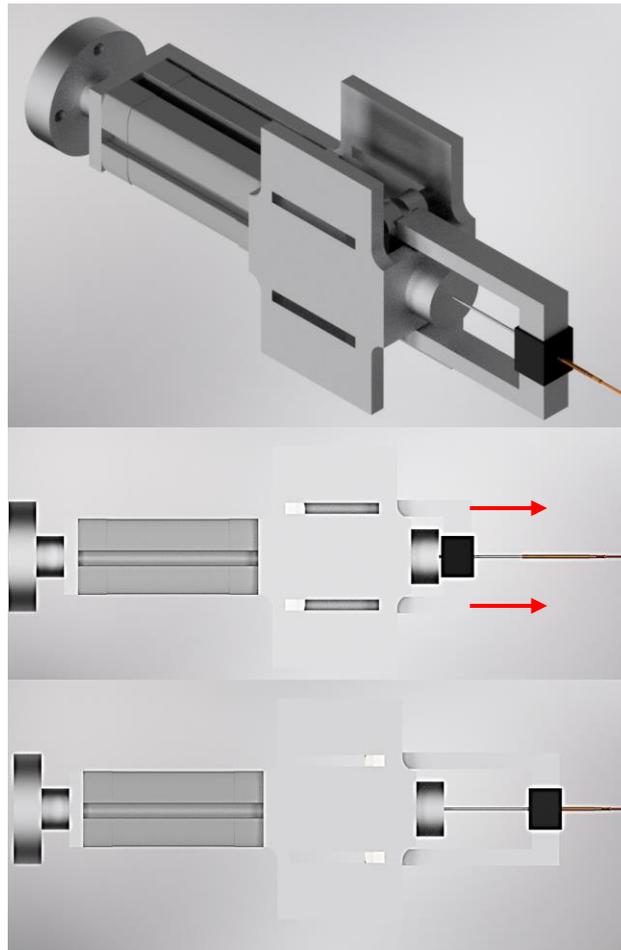


Figura 3-17 - Terceiro esquema desenvolvido.

Esta alteração permitiu corrigir o problema da colisão com os recetáculos inseridos na periferia. No entanto, a garra seria incapaz de garantir a fixação do recetáculo em transporte, dado pela natureza do movimento, que não garantia força de aperto suficiente.

#### **Esquema 4**

O quarto esquema mantém uma estrutura idêntica na zona de fixação do cilindro pneumático ao esquema anterior. De forma a proteger o mecanismo, foi adicionada uma caixa cilíndrica de forma a proteger o mesmo e para servir como ponte de ligação entre o mecanismo e a agulha.

O mecanismo desenvolvido neste esquema baseia-se na transformação do movimento linear provocado pelo cilindro pneumático num movimento diagonal. O movimento diagonal dos dedos da garra é orientado para que estes converjam num ponto central, onde se encontra o recetáculo. Este movimento diagonal ocorre devido à natureza da estrutura deslizante, que guia os dedos para o dado ponto. O mecanismo desenvolvido para a fixação dos recetáculos encontra-se representado na Figura 3-18.

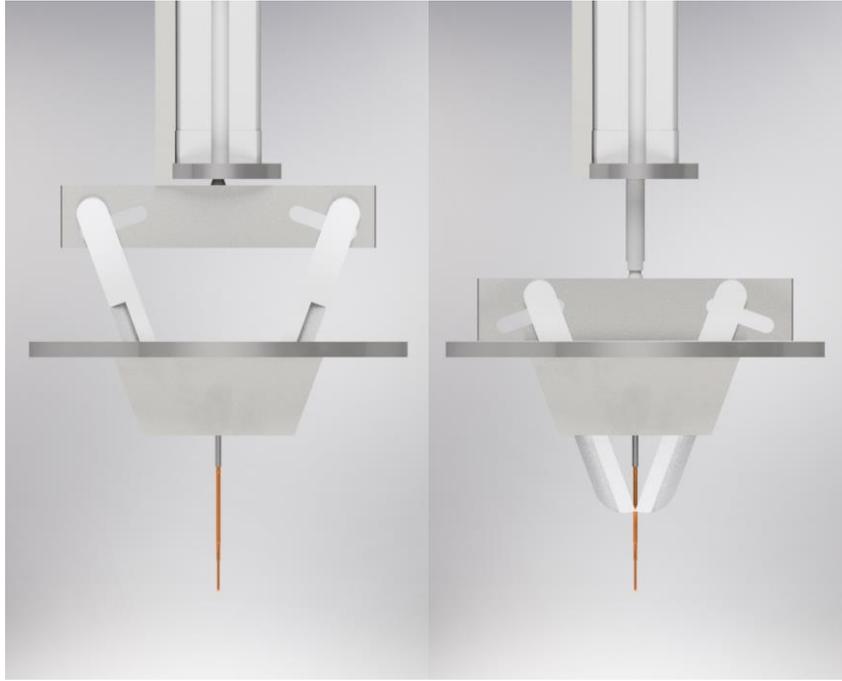


Figura 3-18 - Mecanismo para fixação de recetáculos.

Este mecanismo revelou-se de extrema importância para o desenvolvimento da solução, dado que garante um movimento de fixação e inserção dos recetáculos, de forma a não danificar aqueles que se encontram já inseridos na periferia da zona de inserção. Na Figura 3-19 é apresentada uma visão geral do esquema desenvolvido.



Figura 3-19 - Quarto esquema desenvolvido.

No entanto, a vertente estrutural deste esquema e a necessidade de fabricar o mesmo foram colocadas de parte. Já que a solução não garante a perpendicularidade pela fixação correta do cilindro pneumático, algo que no esquema apresentado não ocorre, sendo propício à ocorrência de desalinhamentos no seu movimento.

Relativamente à necessidade de fabricar o protótipo, algumas componentes deste mecanismo foram desenvolvidas apenas com o intuito de realizar a tarefa, sem prestar atenção ao tamanho e morfologia das mesmas, o que levou a um aumento da sua complexidade, assim como o aumento na dificuldade do seu fabrico, o que acarreta um aumento no custo de produção.

### Esquema 5

Com um melhor discernimento sobre o mecanismo a adotar para o sistema, no quinto esquema desenvolvido foi prioritária a alteração da sua estrutura. Com esta alteração pretende-se garantir a perpendicularidade do sistema, assim como a sua robustez. Para tal, o cilindro pneumático foi deslocado para uma posição lateral, sendo substituído por uma peça posicionada no centro de forma a garantir uma maior robustez e a perpendicularidade. Isto implicou que fosse utilizado um cilindro pneumático com um método de fixação diferente, o que levou à aplicação de um modelo diferente. A alteração efetuada encontra-se representada na Figura 3-20.

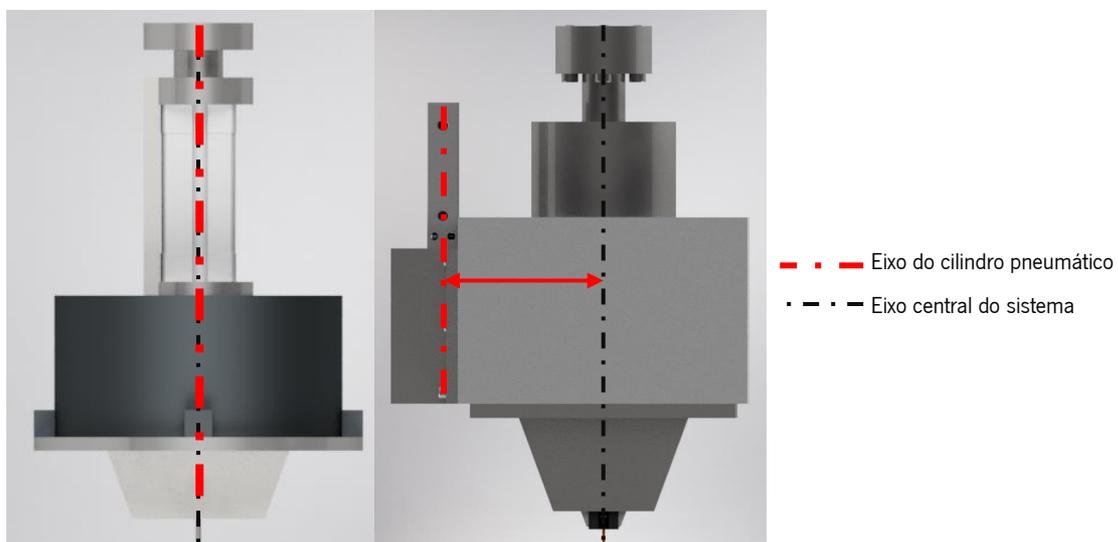


Figura 3-20 - Deslocamento do cilindro pneumático em comparação à posição no esquema 4.

Com o deslocamento do eixo do cilindro pneumático, foi adicionado um suporte central, com um veio de 20 mm de diâmetro, que tem como função a estabilização e orientação do movimento do deslizador.

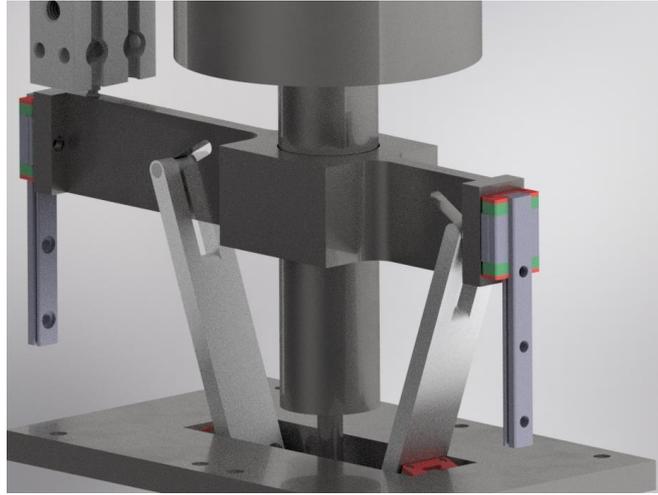


Figura 3-21 - Suporte central para estabilização do deslizador.

No esquema anterior, as componentes que se deslocavam para realizar o movimento de fixação dos recetáculos, efetuavam esta deslocação através de um contacto de deslizamento sobre as restantes componentes do sistema. O movimento de deslizamento provoca o desgaste das respetivas componentes que se encontram em contacto. Para solucionar este problema foram adicionadas guias lineares para o movimento do deslizador central e dos dedos da garra. As guias lineares adicionadas ao esquema estão representadas na Figura 3-22. Estas guias são produzidas pela marca HIWIN e garantem um movimento com redução no atrito de deslizamento através da utilização de esferas circulantes.

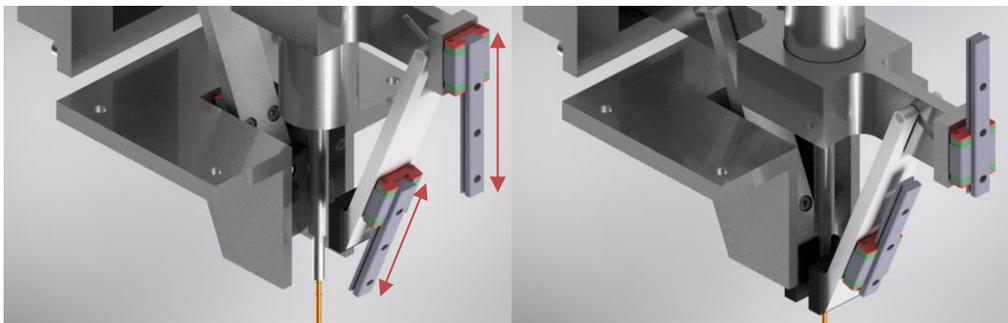


Figura 3-22 - Guias lineares (MGN5C1R60ZFC) para redução do atrito, do fabricante HIWIN.

Neste último esquema, os dedos do sistema de fixação também foram alterados de forma a melhorar a superfície de contacto entre estes e os recetáculos. Para tal foi adicionada uma componente composta por uma borracha que será fixada à parte final dos dedos. Esta alteração encontra-se apresentada na Figura 3-23.

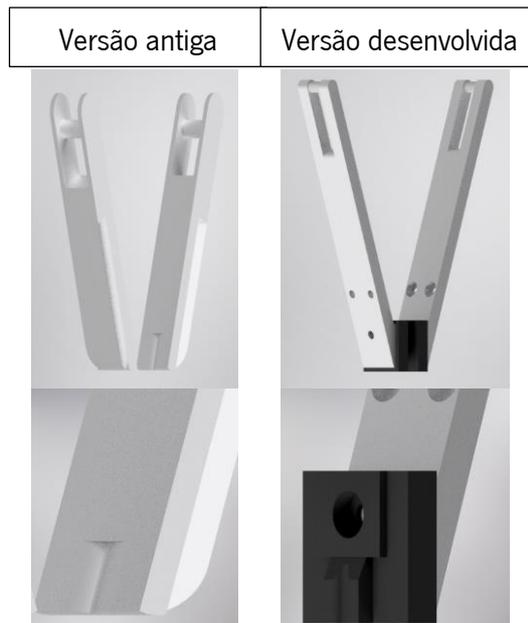


Figura 3-23 - Alteração dos dedos do sistema de fixação.

O quinto esquema desenvolvido permitiu corrigir todos os problemas que surgiram no modelo anterior. No entanto, a natureza da sua robustez implicou que as suas dimensões fossem exageradas para a simples tarefa a ser realizada. Para além disso, este esquema é constituído por um número elevado de componentes que garantiam a proteção do interior do sistema, como por exemplo a caixa que protege o cilindro pneumático e a caixa que protege o mecanismo de deslizamento central. Uma elevada proteção para um sistema que irá desempenhar as suas tarefas num ambiente controlado e limpo revela-se desnecessária, não influenciando o seu correto funcionamento.

### **Esquema 6**

Após todas as iterações desenvolvidas, foi possível desenvolver uma solução capaz de resolver o problema proposto, capaz de realizar a tarefa proposta dentro dos limites definidos para o problema. Este esquema aplica todas as alterações que se demonstraram necessárias durante este processo iterativo, reduzindo o número de componentes relativamente à iteração anterior. Na Figura 3-24 é apresentado o sexto esquema desenvolvido.

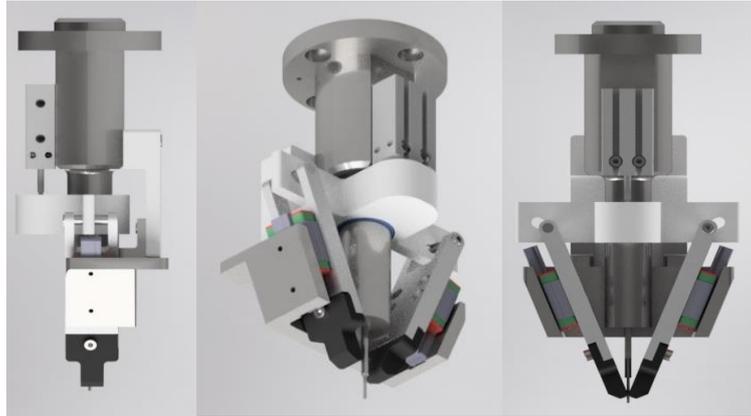


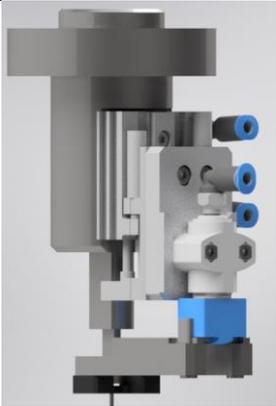
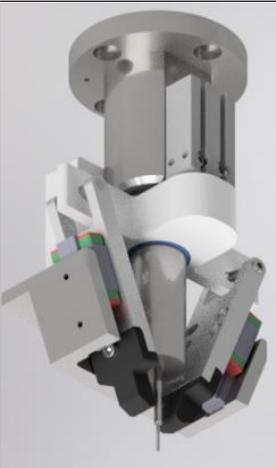
Figura 3-24 - Última iteração desenvolvida para o sistema de fixação.

A solução apresentada na Figura 3-24 será desenvolvida e analisada em maior detalhe no próximo capítulo, no qual será abordado a fase de detalhamento do projeto.

#### 3.5.4 Comparação dos diversos sistemas

De forma a se identificar qual a melhor solução a implementar no equipamento projetado, apresenta-se de seguida a Tabela 3-3, onde serão analisadas três características principais de forma a comparar os diferentes sistemas. Através de um sistema de pontuação é possível avaliar as três soluções conceituais. O primeiro parâmetro refere-se à possibilidade de cada conceito garantir a tolerância de posicionamento exigida pelo sistema, que devido à sua importância para o projeto, tem uma preponderância de 0,5. O segundo parâmetro trata a facilidade de produção e montagem do sistema, com uma preponderância de 0,25. Por fim, temos a flexibilidade, que está relacionada com a capacidade da solução desenvolvida absorver e interagir com as diferentes subfunções anteriormente definidas e tem uma preponderância de 0,25. Na Tabela 3-3 são comparadas as características apresentadas de forma qualitativa e comparativa através da utilização de pontos, em que um maior número de pontos implica um melhor desempenho na respetiva característica. Esta tabela foi desenvolvida de acordo com a sensibilidade e experiência do autor, em que através duma análise às três abordagens diferentes, decidiu qual a sua eficácia sobre cada característica

Tabela 3-3 - Comparação entre as diferentes soluções desenvolvidas-

Solução	Esquema	Tolerância de posicionamento (0.5)	Facilidade de fabrico (0.25)	Flexibilidade (0.25)
Sistema a Vácuo		<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>	<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>	<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>
Garra acionada por dois cilindros pneumáticos		<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>	<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>	<p style="text-align: center;">●</p>
Garra acionada por um cilindro pneumático		<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>	<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>	<p style="text-align: center;">●</p> <p style="text-align: center;">●</p>

De acordo com o sistema de pontuação, a solução que se demonstra mais adequada a ser adotada para o sistema de fixação é a garra acionada por um cilindro pneumático. Como o seu desenvolvimento seguiu as diversas diretrizes sugeridas pelo projeto mecatrónico, foi possível desenvolver uma solução que garanta o toleranciamento no posicionamento dos recetáculos, capaz de ser produzida e com alta

flexibilidade para se adaptar às diversas subfunções propostas inicialmente, que serão desempenhadas por esta.

Desta forma, a solução apresentada na Figura 3-24 será desenvolvida e analisada em maior detalhe no próximo capítulo, no qual será abordado a fase de detalhe do projeto.

## **CAPÍTULO 4**

### **4 PROJETO DETALHADO**

Neste capítulo apresenta-se pormenorizadamente o projeto mecatrónico do equipamento desenvolvido, abordando-se as diversas partes que o constituem, assim como os componentes de cada grupo. Também será explicado o funcionamento do sistema de fixação desenvolvido, onde será tratado e analisado a estrutura e as funções desempenhadas por este.

Durante este capítulo será apresentada a constituição do sistema e as diversas componentes que o constituem, em que, nessa apresentação a mesma se baseia no conceito desenvolvido a ser validado. Este conceito é validado através do protótipo desenvolvido e dos desenhos técnicos, no qual não são apresentados cálculos relativos ao dimensionamento do equipamento. O dimensionamento das componentes é uma parte importante do projeto de equipamentos, no entanto, como este trabalho se concentra no desenvolvimento e validação do conceito, o dimensionamento é um trabalho futuro a ser desenvolvido.

#### **4.1 Sistema desenvolvido**

O sistema final desenvolvido foi a garra de fixação por atuação de um cilindro pneumático. Este sistema é a versão final do desenvolvimento feito para este produto no projeto e de forma a facilitar o entendimento do leitor, é apresentado o resultado final desde já. Todo o equipamento foi modelado em 3D, utilizando o software de CAD *Autodesk Inventor 2022*. Após a sua renderização, obteve-se a imagem foto realista presente na Figura 4-1. A figura apresenta o equipamento desenvolvido na imagem à esquerda, e acoplado ao robô articulado IRB 1200 da fabricante ABB, na imagem à direita, em que esta última imagem serve apenas como esclarecimento sobre como é efetuada a colocação da garra no mesmo.

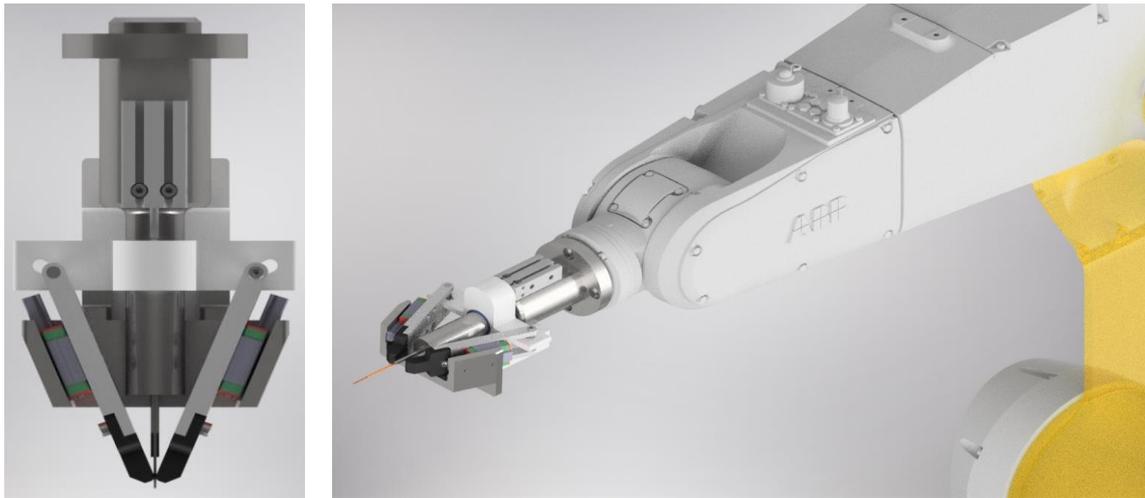


Figura 4-1 - Sistema de fixação atuado por um cilindro pneumático, à esquerda e acoplado ao robô articulo IRB 1200 da ABB, à direita.

O atravancamento do equipamento desenvolvido encontra-se representado na Figura 4-2. Para mais facilmente se entender a dimensão do equipamento que se está a projetar no CAD, colocou-se uma caneta na mesma figura para se ter uma referência da escala.

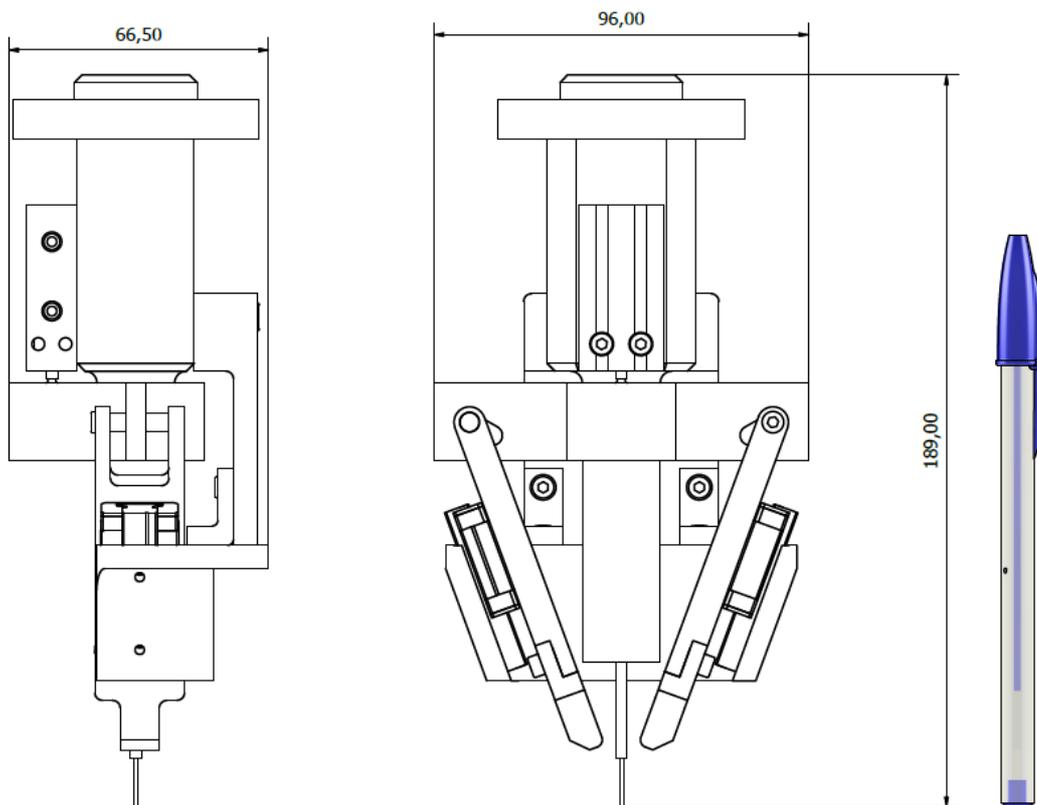


Figura 4-2 - Atravancamento do sistema de fixação.

Na Figura 4-3 é possível observar os diversos componentes constituintes deste equipamento, legendados através da Tabela 4-1. Seguidamente abordar-se-á estas em mais detalhe, assim como a seleção dos componentes *off-the-shelf*.

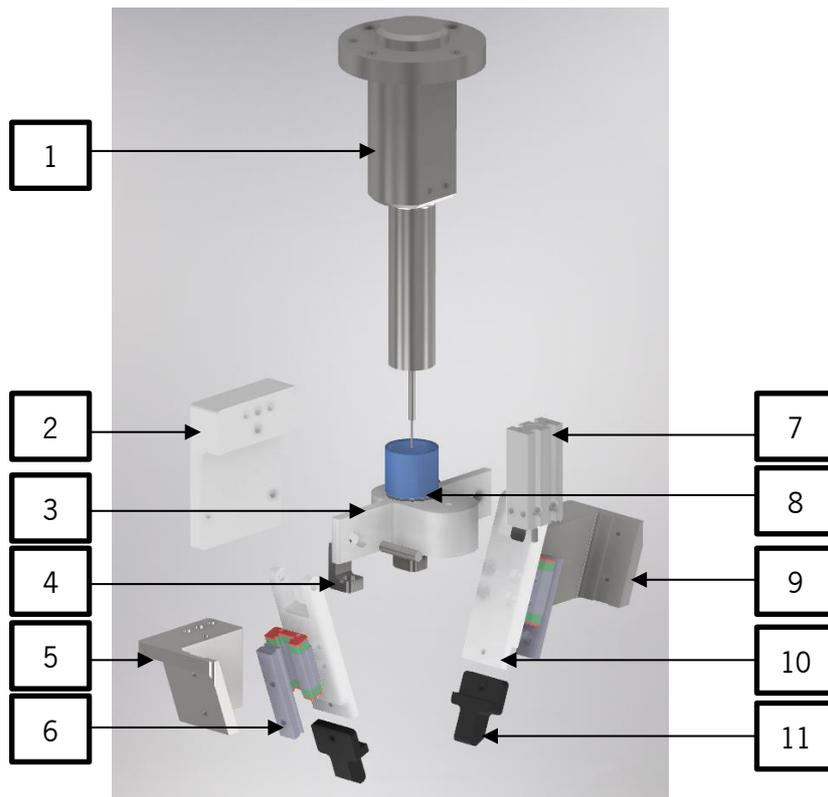


Figura 4-3 - Vista explodida da garra legendada. Ver Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Legenda da Figura 4-3.

Número	Legenda	Quantidade
1	Suporte central	1
2	Placa de fixação	1
3	Deslizador	1
4	Braçadeira de fixação	2
5	Suporte de guia esquerdo	1
6	Guias lineares	2
7	Cilindro pneumático	1
8	Chumaceira de deslizamento	1
9	Suporte de guia direito	1
10	Dedo da garra	2
11	Borracha para fixação de recetáculo	2

## 4.2 Constituintes da garra de fixação

Nesta seção aborda-se os diferentes constituintes da garra para fixação de recetáculos. Para isso, a garra será dividida em dois grupos distintos, nomeadamente o grupo estrutural e o grupo cinemático.

### 4.2.1 Grupo estrutural

O projeto da estrutura da garra é uma fase importante para o projeto, pois todo o peso do grupo cinemático é suportado pelo grupo estrutural, e é através deste que é garantida a orientação e alinhamento necessário para a inserção dos recetáculos. A estrutura deve ter rigidez suficiente para não oscilar durante o funcionamento do equipamento, principalmente durante o movimento de transporte e inserção. Para além disso, esta deve ser leve o suficiente para aumentar a mobilidade do mesmo. Como a garra desenvolvida é relativamente pequena, o seu peso não será elevado, sendo por isto importante garantir a estabilidade da mesma. Para tal foi utilizado um perfil cilíndrico em aço inoxidável, apresentado na Figura 4-4, que como é a peça com maior comprimento, deve ser robusto de forma a garantir um movimento sem oscilações no sistema. Os recetáculos a transportar são colocados na zona com o diâmetro inferior do suporte central, reforçando assim a necessidade de que esta peça deve ser robusta e perpendicular ao robô manipulador. Para isso, no topo deste perfil foi ainda adicionado uma flange que assegura a fixação ao robô manipulador, assim como dois conjuntos de furos para a fixação do cilindro pneumático e da placa de fixação.



Figura 4-4 - Suporte central da garra com os furos para a placa de fixação à esquerda e para o cilindro pneumático à direita.

A placa de fixação é uma componente importante que fixa as restantes partes do sistema ao suporte central, em aço inoxidável. Esta peça tem um perfil em “L” de forma a garantir uma fixação estável ao suporte central, assim como ao suporte das guias. Esta peça tem três conjuntos diferentes de furos para a fixação ao suporte central, para as braçadeiras e para os suportes das guias. Para além disso foram adicionados furos de extração, que como o nome indica, facilitam a extração do suporte central.

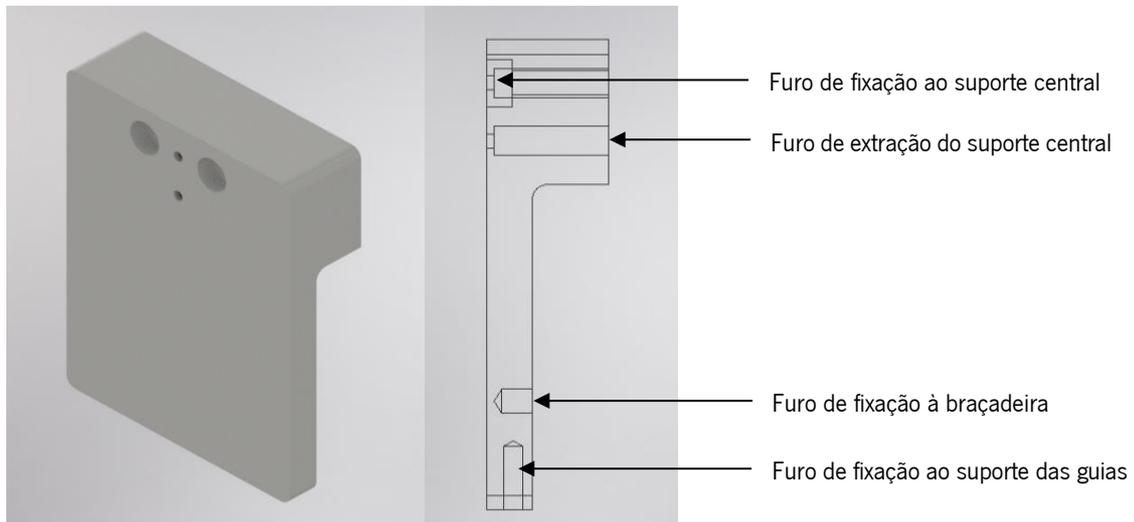


Figura 4-5 - Placa de fixação com os furos representados à esquerda.

As braçadeiras, que se encontram fixas à placa de fixação, são utilizadas de forma a garantir a estabilidade no sistema. No sistema foram adicionadas braçadeiras de 90°, em aço inoxidável, que garantem a perpendicularidade entre a placa de fixação e a superfície de fixação do suporte das guias. O desenvolvimento destas componentes foi feito à medida para o sistema de forma a certificar a robustez do mesmo. Na Figura 4-6 encontram-se representadas as braçadeiras desenvolvidas assim como o local onde são aplicadas.

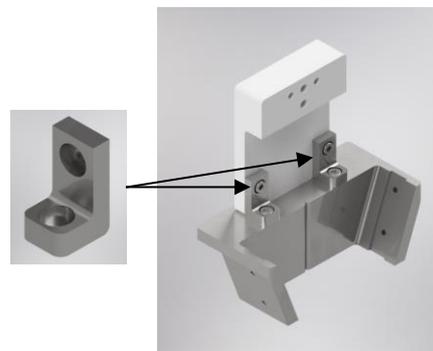


Figura 4-6 - Braçadeira de 90° e o local da sua aplicação, imagem à direita.

Por fim, no grupo estrutural temos o suporte das guias lineares, componente fundamental para interligar este grupo ao cinemático. O suporte das guias lineares tem uma parede inclinada com o intuito de promover o movimento de deslizamento dos dedos da garra, que se encontram fixos às guias lineares. Na parede inclinada foi incluída uma seção com 1mm de profundidade para alocar as guias. Com isto, estas cumprem a sua função de transportar o carrinho de forma estável, sem oscilações. Como serão colocadas guias lineares do lado esquerdo e direito da garra, destinadas para cada dedo da garra, foi necessário desenvolver dois suportes simétricos em aço inoxidável. Na Figura 4-7 apresenta-se o suporte da guia do lado esquerdo na imagem à esquerda, e os dois suportes com as guias fixas na imagem à direita.

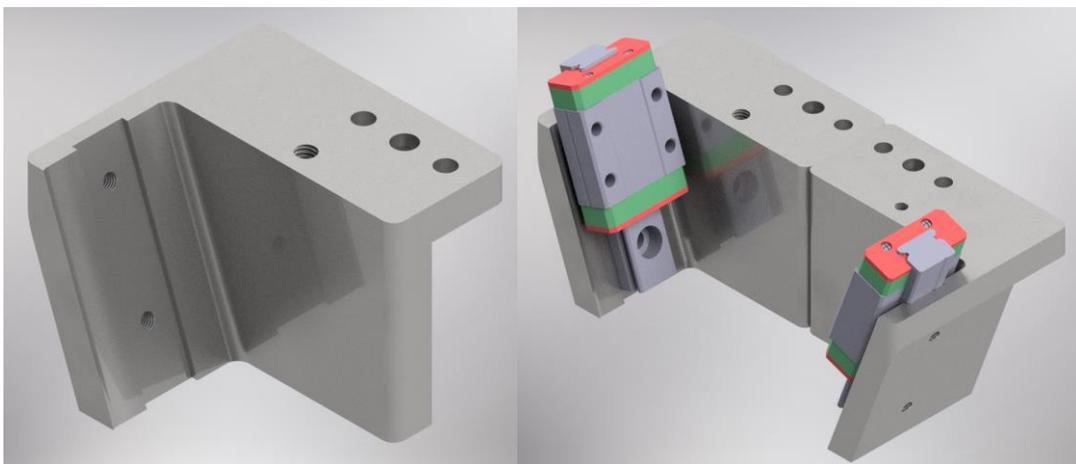


Figura 4-7 - Suporte de guias lineares.

#### 4.2.2 Grupo cinemático

O grupo cinemático é aquele que desempenha a deslocação no sistema. No caso aplicado, este grupo irá garantir a prensão dos recetáculos, garantido um transporte seguro. Como já foi referido anteriormente, a orientação e a perpendicularidade dos recetáculos é assegurado pelo suporte central. No entanto, com a força de prensão aplicada na ponta dos dedos da garra é certificada a fixação dos recetáculos. Para isso, foi aplicado um cilindro pneumático de duplo efeito ao sistema, no qual são efetuados dois movimentos, de descida dos dedos da garra para fixar o recetáculo e de subida destes para a inserção do mesmo. Este cilindro encontra-se fixo ao suporte central e ao deslizador. Uma componente desenvolvida inteiramente para este projeto, que desempenha a conversão do movimento vertical do cilindro para um movimento diagonal. O movimento diagonal é transferido para os dedos da garra, que se encontram fixos aos carrinhos das guias lineares, que promovem um movimento de deslizamento com baixo atrito e precisão de posicionamento. Com isto, os dedos da garra serão transportados para a posição desejada, isto é, para a fixação do respetivo recetáculo, ou no caso da fase

de inserção, para uma posição recuada, garantindo uma inserção sem colisões com os recetáculos colocados na periferia. Na Figura 4-8 encontram-se representados os diversos elementos que atuam neste. Foi removido o grupo estrutural de forma a poder demonstrar as duas fases principais do grupo cinemático, a de inserção do recetáculo, à esquerda e de fixação do mesmo, à direita.

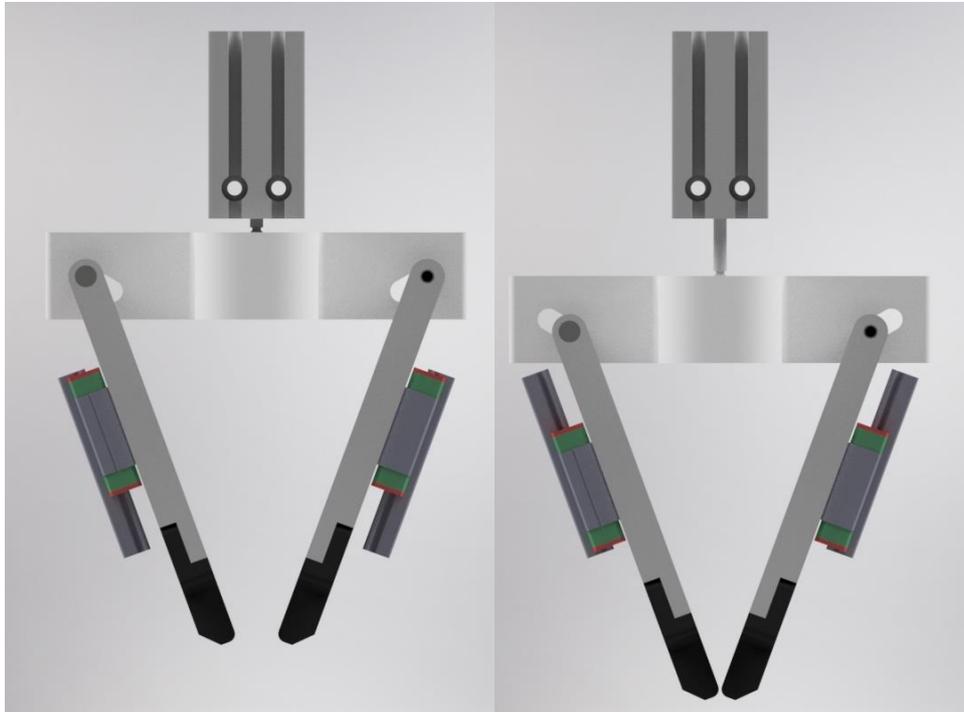


Figura 4-8 - Grupo cinemático na fase de inserção do recetáculo, à esquerda, e fixação, à direita.

O deslizador é uma componente fundamental para a garra. Este foi desenvolvido unicamente para o projeto, com características singulares de forma a desempenhar a função pretendida, em que devido aos esforços que é sujeito, foi desenvolvido em aço inoxidável. É constituído por um furo central de 23 mm, no qual é colocado um casquilho autolubrificado sem flange, que promove o deslizamento do deslizador, guiando este ao longo do suporte central, durante o movimento linear, provocado pelo cilindro pneumático. Nas laterais desta componente encontram-se dois furos responsáveis por guiar os dois dedos da garra e por converter o movimento linear do cilindro no movimento diagonal pretendido. Na zona central, há outro furo para a fixação do cilindro pneumático, local de atuação do mesmo no sistema. Na Figura 4-9 encontra-se representado o deslizador desenvolvido na imagem à esquerda, e à direita colocado no suporte central, com o cilindro pneumático e o casquilho inserido.

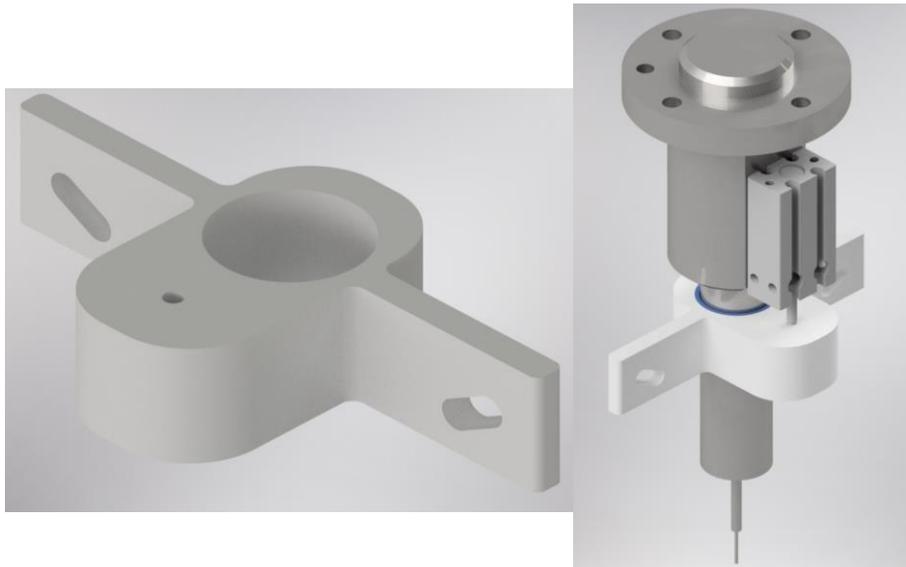


Figura 4-9 - Deslizador desenvolvido na imagem à esquerda, e à direita colocado no suporte central, com o cilindro pneumático e o casquilho inserido.

O deslizador apresentado transmite o movimento linear para os dedos da garra. Com as guias lineares, fixadas a estes dedos, será realizado o movimento para a fixação ou de separação dos recetáculos. Estes são furados para se fixarem ao carrinho das guias, permitindo um movimento de deslizamento com o mesmo. Para além disso, na sua ponta foi adicionada uma seção com uma profundidade de 4mm para alocar uma borracha que entrará em contacto com os recetáculos, fixando-os, sem os danificar. Na Figura 4-10 encontra-se representado este conjunto.



Figura 4-10 - Conjunto de fixação de recetáculo, com dedos da garra, guias lineares e borracha de contacto.

Com isto, são apresentadas todas as componentes que constituem a garra de fixação de recetáculos. Na seção seguinte será apresentado o funcionamento desta, explicando as diversas fases do sistema.

#### 4.2.3 Elementos de ligação

Os elementos de ligação são uma componente importante da garra de fixação desenvolvida dado que é através destes que são conectadas as diversas componentes que o constituem. A escolha destes pode ser complexa dado que geralmente devem ser escolhidas peças normalizadas, isto devido à sua variedade e objetivo principal de utilização. No caso dos parafusos, por exemplo, a escolha destes deve ser sempre de acordo com a sua aplicação. As peças normalizadas não precisam de ser desenhadas em CAD, no entanto devem ser incluídas nos modelos tridimensionais. Geralmente estas encontram-se disponíveis nas bibliotecas incluídas nos *softwares* CAD utilizados.

No sistema desenvolvido foram utilizados três tipos de elementos de ligação:

- Parafusos;
- Casquilho autolubrificado sem flange;
- Casquilhos de rosca interna.

Os parafusos utilizados para a solução desenvolvida são os parafusos cilíndricos com sextavado interno, da norma ISO 4762. Como as aplicações do parafuso podem variar, devido às diversas especificações técnicas, há a necessidade de utilizar uma norma para tal que corresponda aos padrões de fabricação com as variedades de *design* dentro dessa mesma norma. O tipo de parafuso selecionado foi aquele que dentro dos diversos modelos disponíveis melhor corresponde às exigências, aos requisitos técnicos da aplicação, concordando com o contexto de utilização. Na garra de fixação foram apenas utilizados parafusos ISO 4762 M4 e M3, representados na Figura 4-11, com diferentes comprimentos nominais.



Figura 4-11 - Parafuso ISO 4762 M4 de comprimento nominal de 30mm à esquerda, e M3 de comprimento nominal 12mm à direita.

O casquilho autolubrificado sem flange foi utilizado para auxiliar o movimento do deslizador pelo suporte central, de forma a reduzir o atrito durante este movimento. Assim como os parafusos anteriormente mencionados, estes casquilhos também são normalizados e fabricados pela marca IGUS, com o número de série de A181SM, de diâmetro interno de 20mm e diâmetro externo de 23mm. Estes casquilhos devem ser montados por pressão, e como a temperatura e a velocidade de utilização são relativamente baixas, mostram-se ser a solução mais económica e apropriada para o contexto da sua aplicação. Na Figura 4-12 encontra-se representado o casquilho autolubrificado utilizado.



Figura 4-12 - Casquilho autolubrificado sem flange A181SM do fabricante IGUS.

Relativamente aos casquilhos roscados, estes foram desenvolvidos especificamente para o sistema. Estes foram aplicados nos dedos da garra, permitindo o movimento dos dedos pelo deslizador. São constituídos por um furo com rosca, de forma a colocar um parafuso, fixando-o ao respetivo dedo da garra. Na Figura 4-13 encontra-se representado o casquilho utilizado, assim como a sua aplicação no sistema desenvolvido.

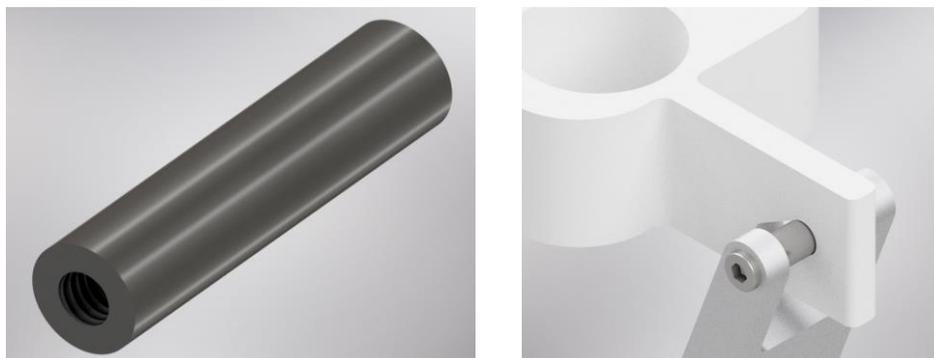


Figura 4-13 - Casquilho com rosca interna.

### 4.3 Funcionamento da garra de fixação

Nesta seção será explicado o funcionamento do sistema de fixação, abordando o cumprimento das diversas funções e especificações consideradas inicialmente no processo de desenvolvimento do modelo. A garra de fixação é utilizada para fixar, transportar e inserir os recetáculos na cama de agulhas. O conjunto de movimentos desempenhados por esta e pelo robô manipulador são por sua natureza simples. No entanto, eles serão discretizados em diversas etapas de forma a melhor se compreender as mudanças de estado do conjunto a analisar, constituído pelo robô manipulador, garra de fixação e recetáculo.

#### Fase 1 – Inserção do recetáculo na garra

A tarefa de inserção dos recetáculos nas placas furadas inicia-se com a captação do mesmo. Estes são transportados a partir do sistema de alimentação, desenvolvido em paralelo para o sistema completo de automação ao processo de fabrico das placas. Os recetáculos são transportados e orientados de forma vertical para uma zona de captação, identificada pela câmara colocada no robô manipulador. A partir desta posição, este ir-se-á deslocar de forma a captar uma agulha para o sistema. Na Figura 4-14 encontra-se representado o recetáculo adquirido pelo sistema.



Figura 4-14 - Captação do recetáculo.

#### Fase 2 – Fixação do recetáculo

Após a captação do recetáculo, inicia-se a fixação do mesmo ao sistema. Conforme o que foi analisado anteriormente, o recetáculo é fixado através da ação do cilindro pneumático, que atua no deslizador, que por sua vez empurra os dedos da garra. Com este movimento inicia-se o contacto com o recetáculo, no

qual, através da borracha colocada nos dedos da garra, o contacto é efetuado sem danificar a peça. A fixação do recetáculo encontra-se representado na Figura 4-15.



Figura 4-15 - Fixação do recetáculo.

### **Fase 3 – Aproximação do local de inserção**

Com o recetáculo devidamente fixado e seguro, este será transportado para o respetivo local de inserção na placa. Este local é identificado pela câmara colocada no robô manipulador, que devido à precisão necessária para esta tarefa, orienta e guia o robô para que este se aproxime do furo. Nesta fase a garra de fixação ainda se encontra acionada de forma a garantir a segurança do recetáculo neste movimento. A aproximação do local de inserção encontra-se representada na Figura 4-16.



Figura 4-16 - Aproximação do local de inserção.

#### **Fase 4 – Libertação do recetáculo**

Quando o recetáculo atingir as coordenadas para a inserção ideal é iniciada a fase de separação do recetáculo. Esta é dada através do movimento de recuo, acionado pelo cilindro pneumático, que recua o deslizador, o que por sua vez liberta o recetáculo dos dedos da garra. Com isto é iniciada a fase de inserção do recetáculo, uma vez que os dedos da garra se encontram posicionados de forma segura para evitar colisões com a sua periferia. O movimento de separação encontra-se representado através da Figura 4-17.



Figura 4-17 - Libertação do recetáculo.

#### **Fase 5 – Inserção do recetáculo**

Com a verificação da posição e orientação do recetáculo, do robô manipulador e da garra de fixação, é efetuada a inserção do recetáculo. A inserção é efetuada com um movimento de impacto até a uma determinada cota, consoante o recetáculo transportado. Na Figura 4-18 encontra-se representado o movimento de inserção do recetáculo no respetivo furo.



Figura 4-18 - Inserção do recetáculo.

O movimento de inserção apresentado tem uma elevada necessidade de precisão pelo conjunto garra de fixação e robô manipulador. Na Figura 4-19 é possível verificar o grau de precisão necessário, em que os recetáculos inseridos encontram-se distanciados 1,5mm entre si.

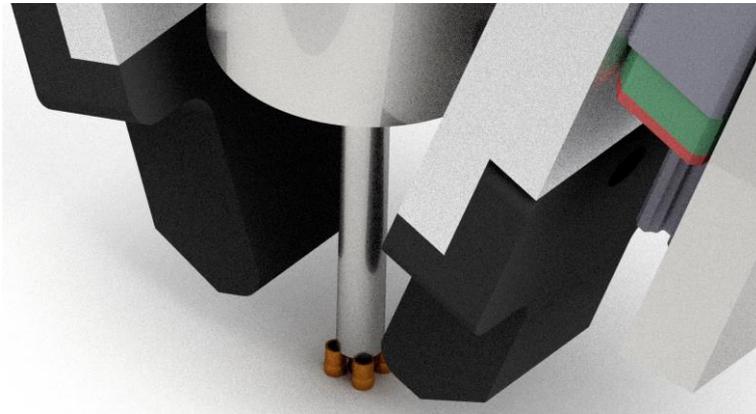


Figura 4-19 - Análise do local de inserção do recetáculo.

### **Fase 6 – Afastamento do local de inserção**

Após inserido o recetáculo, o robô manipulador afasta-se da posição de inserção, finalizando a sua tarefa. Caso seja necessário inserir outro recetáculo, será iniciado novamente este ciclo de inserção dos recetáculos na cama de agulhas. Na Figura 4-20 encontra-se representado o movimento de afastamento do robô manipulador da cama de agulhas.



Figura 4-20 - Afastamento do robô do local de inserção.

De seguida será analisado o modelo construído para que seja avaliado o conceito apresentado ao longo deste capítulo.

#### 4.4 Desenvolvimento de protótipo – Validação de conceito

O sistema de fixação para a automatização da inserção de recetáculos em cama de agulhas para testes ICT foi desenvolvido de forma a cumprir a sua tarefa, com precisão para um elevado número de repetições, cumprindo assim as especificações. No entanto, para o projeto foi desenvolvido um protótipo em impressão 3D, que se assemelha ao conceito apresentado. Este protótipo foi construído de forma a validar o conceito apresentado, com um menor custo de fabrico do que a construção do modelo completo apresentado. Para essa redução no custo, foi utilizada a tecnologia de impressão 3D, também conhecida por prototipagem rápida.

Inicialmente foi necessário alterar o modelo anteriormente apresentado dado que o método de fabrico deste apresenta características diferentes da impressão 3D. Com esta última tecnologia, o toleranciamento das peças fabricadas é incomparável ao método de fabrico de maquinagem. Com a impressão 3D, as peças produzidas apresentam dimensões pouco precisas e variáveis. Esta variação deve-se à utilização de um filamento para a impressão das componentes, que é aquecido e depositado, aplicando-se a manufatura aditiva. O filamento inicialmente apresenta um comportamento viscoso devido à temperatura a que se encontra e com a deposição, a sua temperatura irá diminuir, solidificando. A partir disto, é possível concluir que com o fator de expansão e contração do diâmetro do filamento, a peça a construir através desta tecnologia não permite o toleranciamento preciso do sistema anteriormente desenvolvido.

De forma a adaptar o sistema desenvolvido a esta característica da impressão 3D, foram efetuadas algumas alterações ao modelo anteriormente desenvolvido. Estas alterações encontram-se representadas na Figura 4-21.

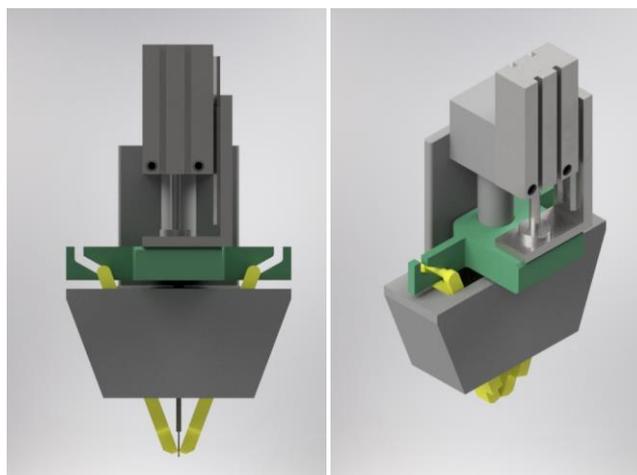


Figura 4-21 - Modelo CAD desenvolvido para a impressão 3D do protótipo.

O modelo apresentado é idêntico ao sistema final desenvolvido, para cumprir o objetivo de provar o conceito anteriormente apresentado. De forma a melhor descrever as partes que constituem o sistema desenvolvido, foram produzidos desenhos técnicos destas que se encontram no apêndice **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Na Figura 4-22 pode-se verificar o produto final da impressão 3D do protótipo devidamente montado.

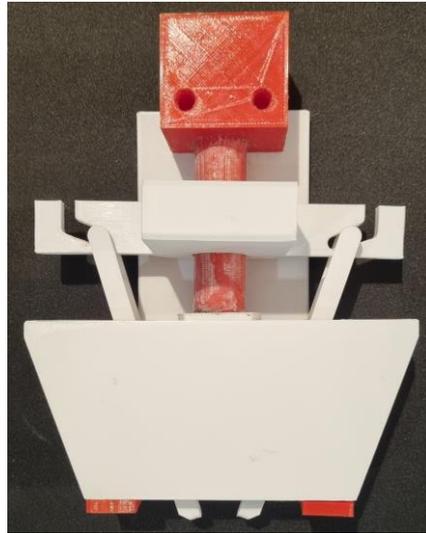


Figura 4-22 - Resultado da impressão 3D.

De forma a reduzir o custo deste sistema, a escolha do mecanismo de acionamento baseou-se no material que se encontrava disponível para utilização no laboratório, sendo este mecanismo de acionamento o cilindro pneumático Rexroth MSN-16-30, apresentado na Figura 4-23.

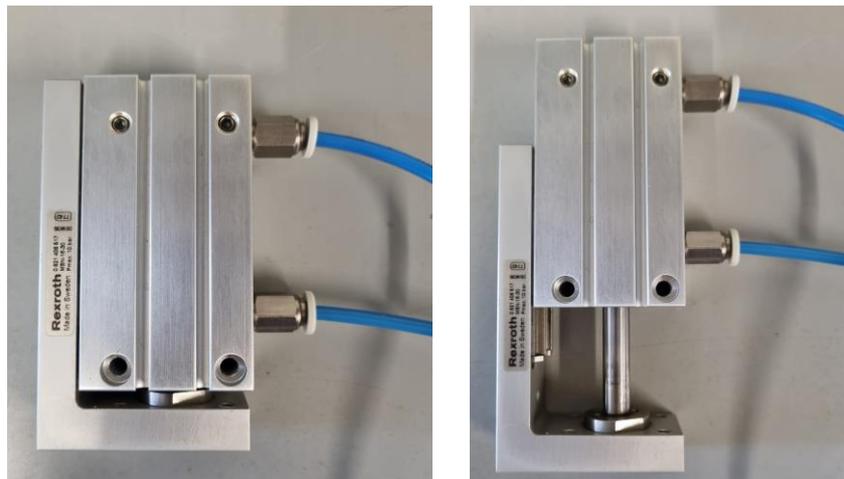


Figura 4-23 - Cilindro pneumático Rexroth MSN-16-30

A parte crítica do protótipo desenvolvido encontra-se na superfície de guiamento dos dedos da garra, em que, devido à natureza deste, não foi possível utilizar guias lineares, alterando o seu funcionamento do deslizamento, sendo efetuado através do contacto entre duas superfícies plásticas, o que dificulta o

funcionamento normal do equipamento. As alterações efetuadas, apresentadas na Figura 4-24, foram aplicadas nos dedos da garra e nos dois suportes que efetuam o guiamento.

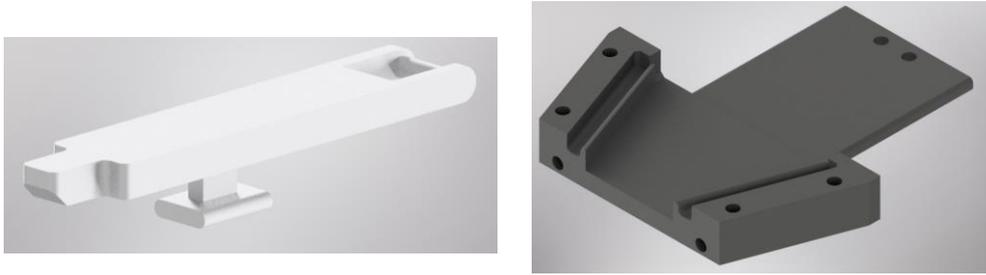


Figura 4-24 - Modelo CAD do dedo da garra e suporte de guiamento para o protótipo

O resultado das alterações efetuadas encontra-se apresentado na Figura 4-25, onde se encontra o protótipo construído, onde se pode verificar as alterações do guiamento em relação ao modelo final apresentado.

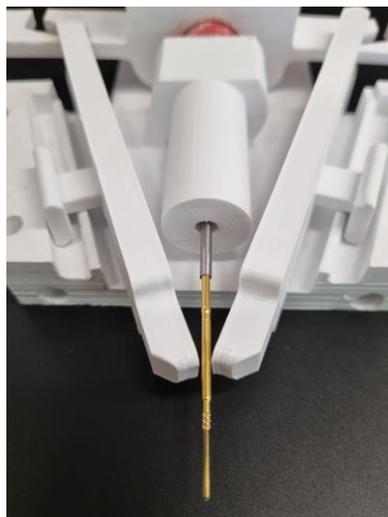


Figura 4-25 - Superfície de guiamento para os dedos da garra

Na Figura 4-25 pode-se ainda verificar a existência de um furo no suporte central que será utilizado para colocar a ferramenta de inserção utilizada no processo manual de fabrico da cama de agulhas. Esta alteração foi efetuada para demonstrar a fixação da agulha dado que a sua inserção não é possível através deste protótipo. Na Figura 4-26 encontra-se representado o furo efetuado, no qual se pode verificar a existência de um furo perpendicular utilizado para fixar a ferramenta de inserção.

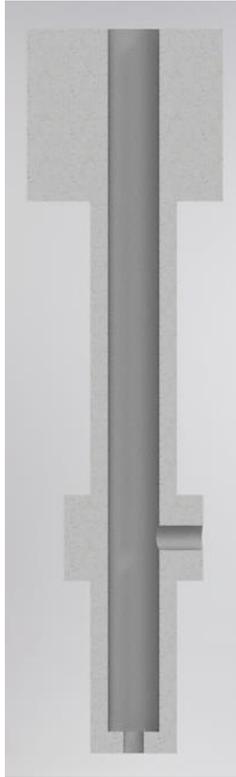


Figura 4-26 - Furo para alocação da ferramenta de inserção.

#### 4.4.1 Funcionamento do protótipo

O funcionamento do protótipo elaborado por impressão 3D é idêntico ao funcionamento referido na secção 4.3. Na Figura 4-27 encontram-se representados os dois estados da garra de fixação. No primeiro temos o cilindro pneumático recuado, na imagem à esquerda, e no segundo com o cilindro avançado, os dedos da garra acionados e o recetáculo fixo, na imagem à direita.

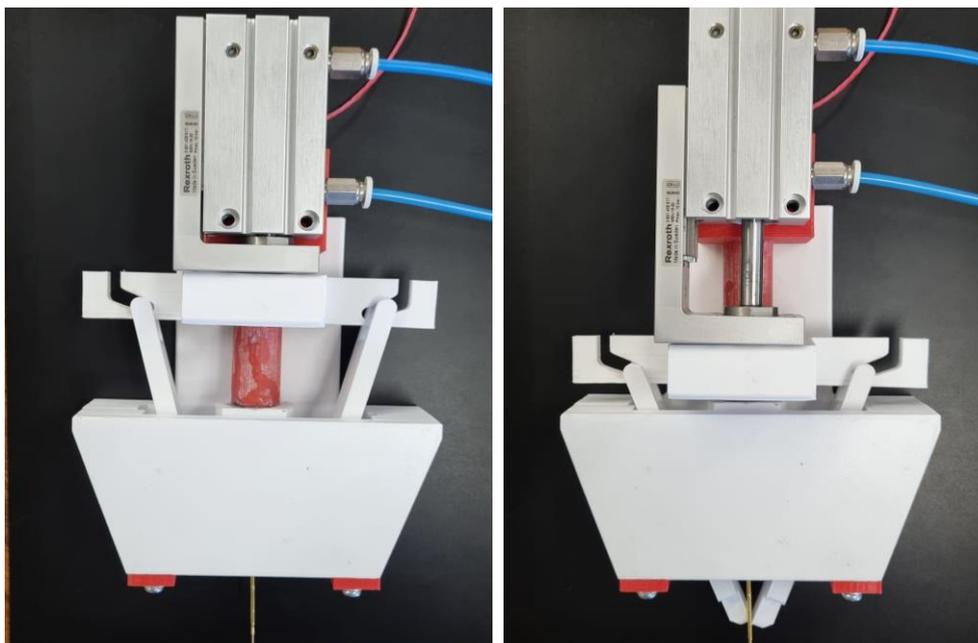


Figura 4-27 - Protótipo com cilindro pneumático e ferramenta de inserção, recuado na imagem à esquerda e acionado na imagem à direita

Com isto, foi possível validar o conceito desenvolvido, criando uma garra de fixação capaz de segurar e fixar os recetáculos.

#### 4.5 Aspetos a melhorar

Em relação à garra de fixação apresentada neste capítulo, inicialmente a definição da sua forma e funcionamento foi complexo. A utilização do processo iterativo para o desenvolvimento do projeto foi crucial para a obtenção do modelo final construído, permitindo colmatar os diversos defeitos e problemas que apareciam nas soluções desenvolvidas. A dimensão do recetáculo e a distância entre os furos da cama de agulhas provaram-se ser uma barreira complicada de ultrapassar, dado que para a inserção do recetáculo teria que ser garantida precisão do movimento, e com a utilização de guias lineares e com os diversos elementos de ligação como parafusos e casquilhos seria possível obter a estabilidade necessária no movimento.

A conceção de uma solução capaz de criar um conjunto eficaz, que cumpra todos os objetivos, funções e especificações propostas foi dificultada pela falta de experiência inicialmente sentida. No entanto, com o auxílio dos diversos membros alocados ao projeto, experientes em Engenharia Mecânica, o caminho a percorrer tornou-se mais claro e simples.

## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSÃO

A primeira parte desta dissertação, com a introdução e a revisão bibliográfica, permitiram situar o trabalho a ser realizado, revelando a sua importância e o seu enquadramento. Com a revisão bibliográfica foi possível facilitar a compreensão deste documento, fornecendo as bases e os conceitos essenciais. A metodologia de projeto apresentada fornece um guia, bastante abrangente, para o desenvolvimento de soluções, que não limita a sua personalização por quem o pretenda aplicar. As metodologias de projeto não devem ser tidas como universais, mas cada passo efetuado no processo do projeto deve ser bem definido, de forma que não existam ambiguidades na sua interpretação. O vasto domínio de conhecimentos relativos ao projeto para a manufatura e montagem devem, de forma imperativa, estar devidamente estudados e assimilados. O projeto de um equipamento, com a assimilação de todas as temáticas abordadas inicialmente, revelou-se um desafio aliciante. Inicialmente, foi necessário estruturar o projeto através das diversas ferramentas disponíveis para o projeto mecânico, descrevendo-se devidamente o equipamento pretendido, assim como os objetivos, especificações e funções a desempenhar por este.

Posto isto, foram desenvolvidas diversas soluções que permitiram o crescimento da solução final. O desenvolvimento desta solução percorreu um caminho com adversidades, no qual a falta de experiência na conceção de equipamentos dificultou a tomada de decisões. No entanto, com o auxílio dos diversos membros alocados ao projeto, foi possível ultrapassar as diversas barreiras que surgiram ao longo deste percurso, nomeadamente, na perceção dos *standards* da indústria para a seleção de componentes *off the-shelf* no desenvolvimento de peças capazes de serem fabricadas.

Analisando o resultado final deste trabalho, pode-se concluir que o conceito desenvolvido é capaz de fixar um recetáculo. Este resultado demonstra que, através do estudo efetuado aos sistemas de manipuladores, às configurações para sistemas de fixação, e através da seleção de uma configuração para o desenvolvimento de um sistema de fixação e aprovação do respetivo conceito com o protótipo físico construído foi possível cumprir os objetivos definidos no subcapítulo 1.3. Este protótipo desenvolvido permitiu concluir que com um sistema de impressão mais eficiente, seria possível construir através da impressão 3D um modelo eficiente para o sistema final.

Com o conceito desenvolvido aprovado, poder-se-ia realizar o cálculo para o dimensionamento das componentes do modelo real, assim como o estudo cinemático do sistema a desenvolver. Com isto

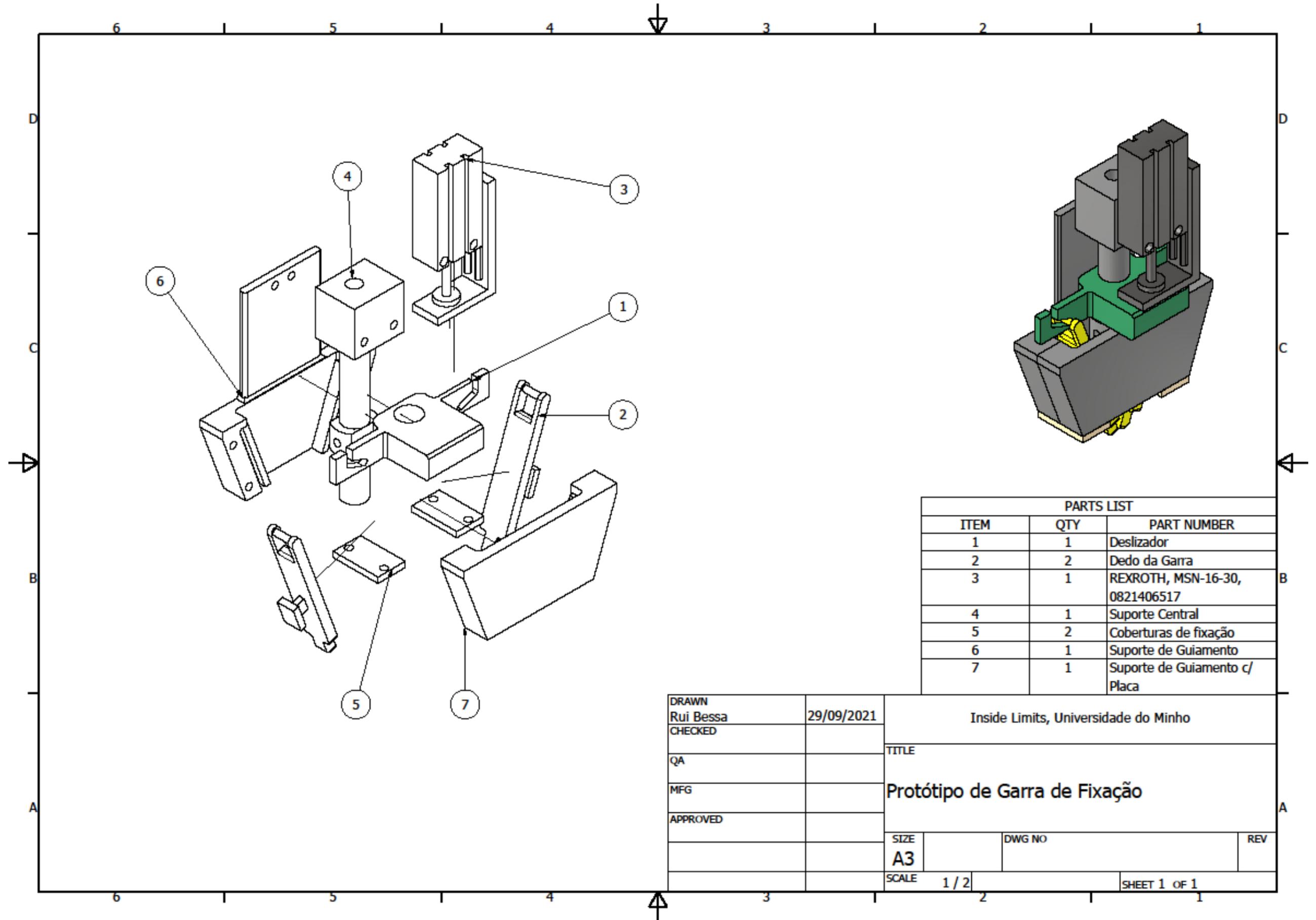
completar-se-ia o projeto detalhado para o sistema de fixação, permitindo assim a construção de um modelo real, com todas as componentes apresentadas ao longo do capítulo 4. Para além disso, o protótipo desenvolvido seria projetado de forma a ser acoplado a um robô manipulador, com uma câmara para a deteção dos recetáculos e dos furos de inserção. Posto isto, será possível analisar o equipamento projetado devidamente, analisando o seu funcionamento através de testes ao tempo de ciclo, à força aplicada e à área de contacto com o recetáculo. Com isto comprovar-se-ia a eficiência do mecanismo, aplicando este no ambiente de trabalho a que estaria sujeito e verificando que seria capaz de realizar a tarefa proposta. Contudo, este novo protótipo para a garra de fixação, assim como a aquisição de um robô manipulador e de uma câmara aumentariam os custos associados ao projeto, porém, permitiria o desenvolvimento de um mecanismo capaz de fabricar uma cama de agulhas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Gausemeier and S. Moehring, *VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems*, vol. 35, no. 2. Paderborn: Elsevier, 2002.
- [2] A. Chakrabarti, *Engineering design methods: Strategies for product design*, vol. 16, no. 2. Milton Keynes: Wiley-VCH, 1995.
- [3] M. J. French, *Conceptual Design for Engineers*, 2nd ed. London: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985.
- [4] T. M. Jones, *Ethical Decision Making by Individuals in Organizations*, vol. 16, no. 2. Washington: Academy of Management Stable, 1991.
- [5] K. T. Ulrich, S. D. Eppinger, and M. C. Yang, *Product Design and Development Seventh Edition*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2020.
- [6] A. Wolf, R. Steinmann, and H. Schunk, *Grippers in Motion*. Berlin: Springer, 2005.
- [7] K. AG, "KUKA." <https://www.kuka.com/pt-pt> (accessed Sep. 16, 2021).
- [8] P. E. Sandin, *Robot Mechanisms and Mechanical Devices*, vol. Walkers, no. 4. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [9] M. Wilson, *Implementation of Robot Systems*. Oxford: Elsevier, 2015.
- [10] Y. Wang and F. Zhang, *Trends in control and decision-making for human-robot collaboration systems*. Clemson: Springer, 2017.
- [11] J. Angeles, *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. Montreal: Springer, 2003.
- [12] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, and H. Schunk, *Robot Grippers*. Munich: WILEY-VCH, 2007.
- [13] L. Freitas *et al.*, "Conceptual Design of a Positioning System for Systematic Production of Needle Beds," *Lect. Notes Mech. Eng.*, p. 15, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-79168-1\_21.

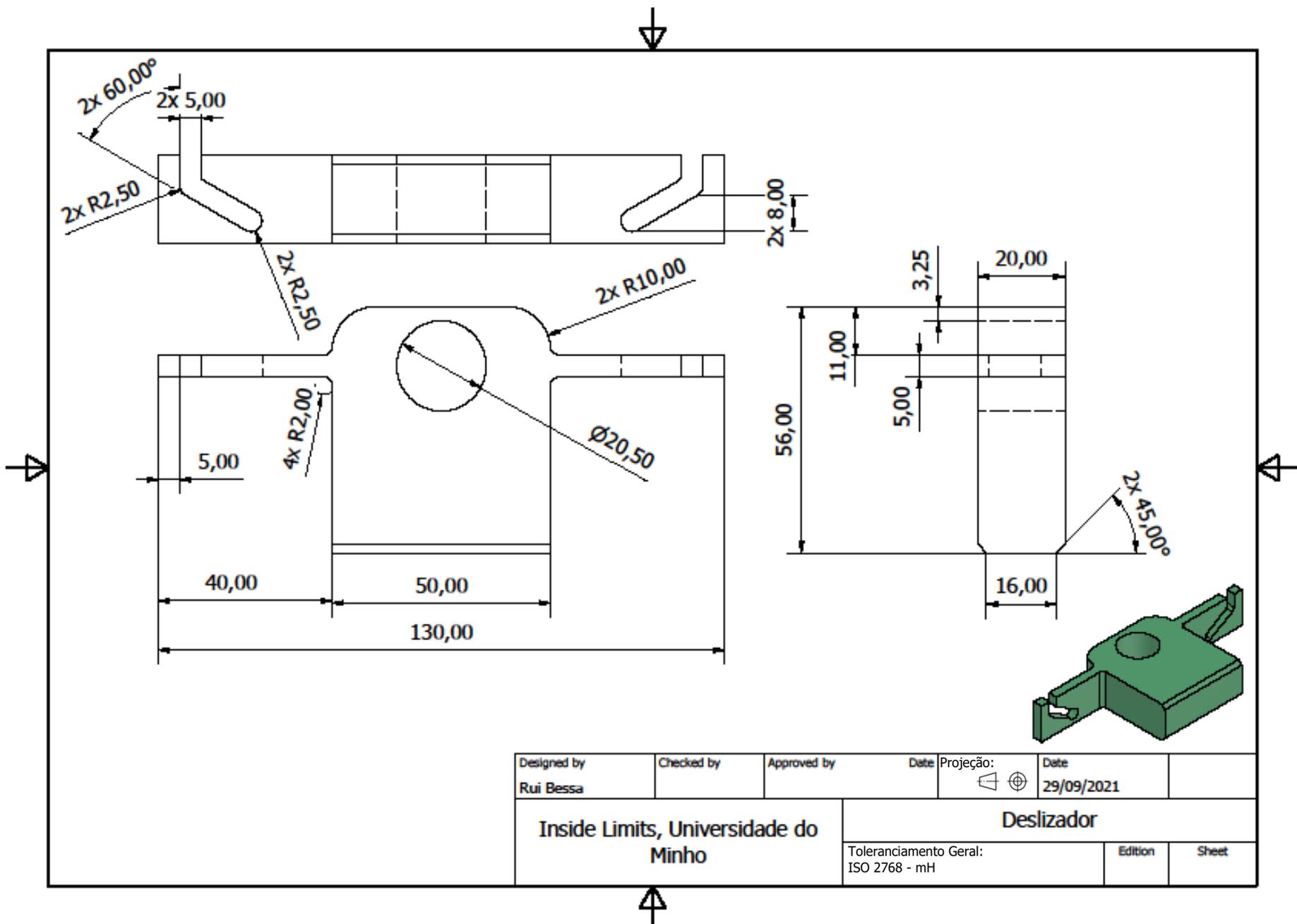
## **A.1 ANEXO A - DESENHOS TÉCNICOS PRODUZIDOS**

Nas próximas páginas serão apresentados os desenhos técnicos para a construção do protótipo em impressão 3D. Na primeira é apresentada uma vista explodida do mesmo para facilitar a listagem das suas componentes, seguido do desenho técnico de cada uma destas.

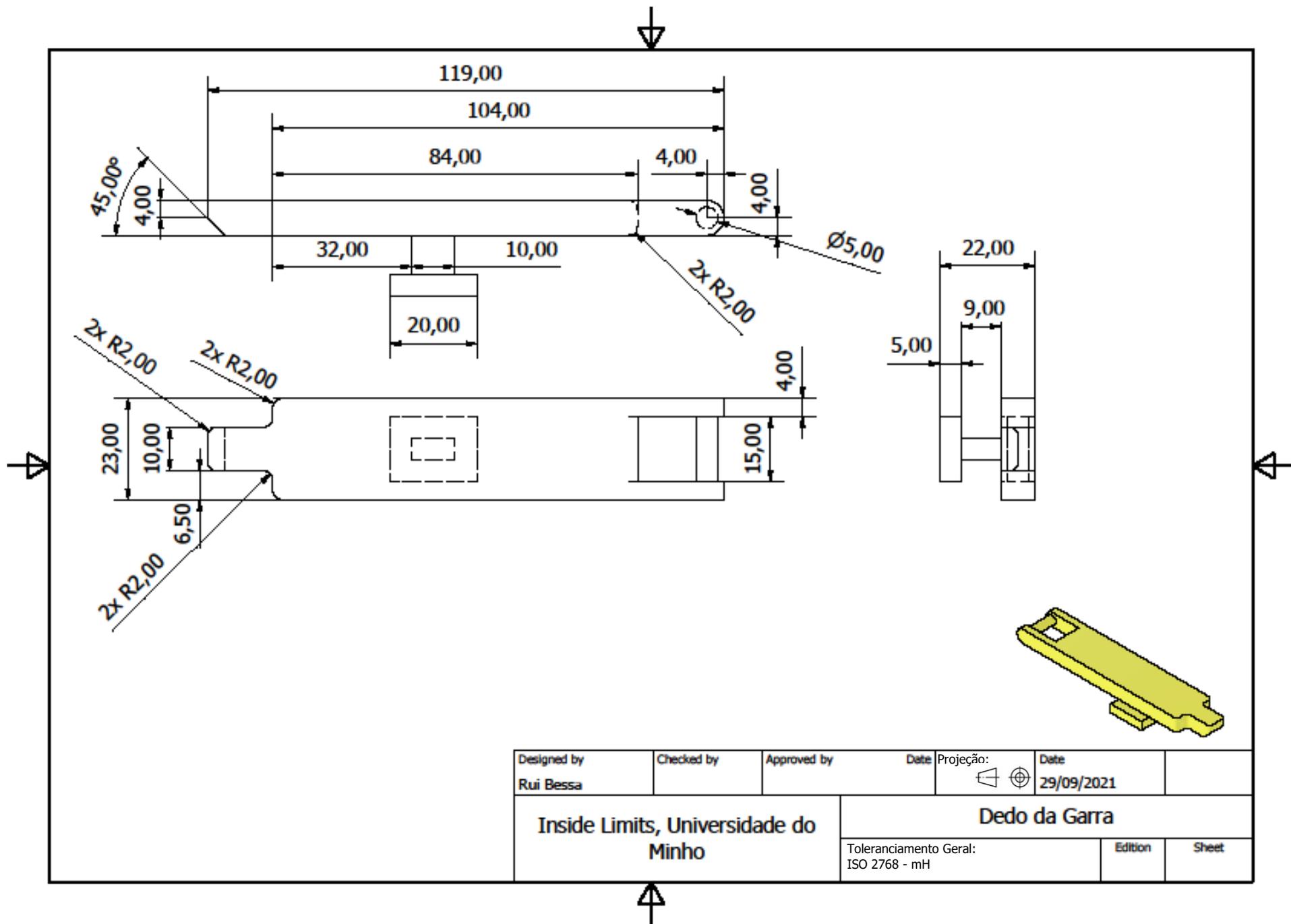


PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Deslizador
2	2	Dedo da Garra
3	1	REXROTH, MSN-16-30, 0821406517
4	1	Suporte Central
5	2	Coberturas de fixação
6	1	Suporte de Guiamento
7	1	Suporte de Guiamento c/ Placa

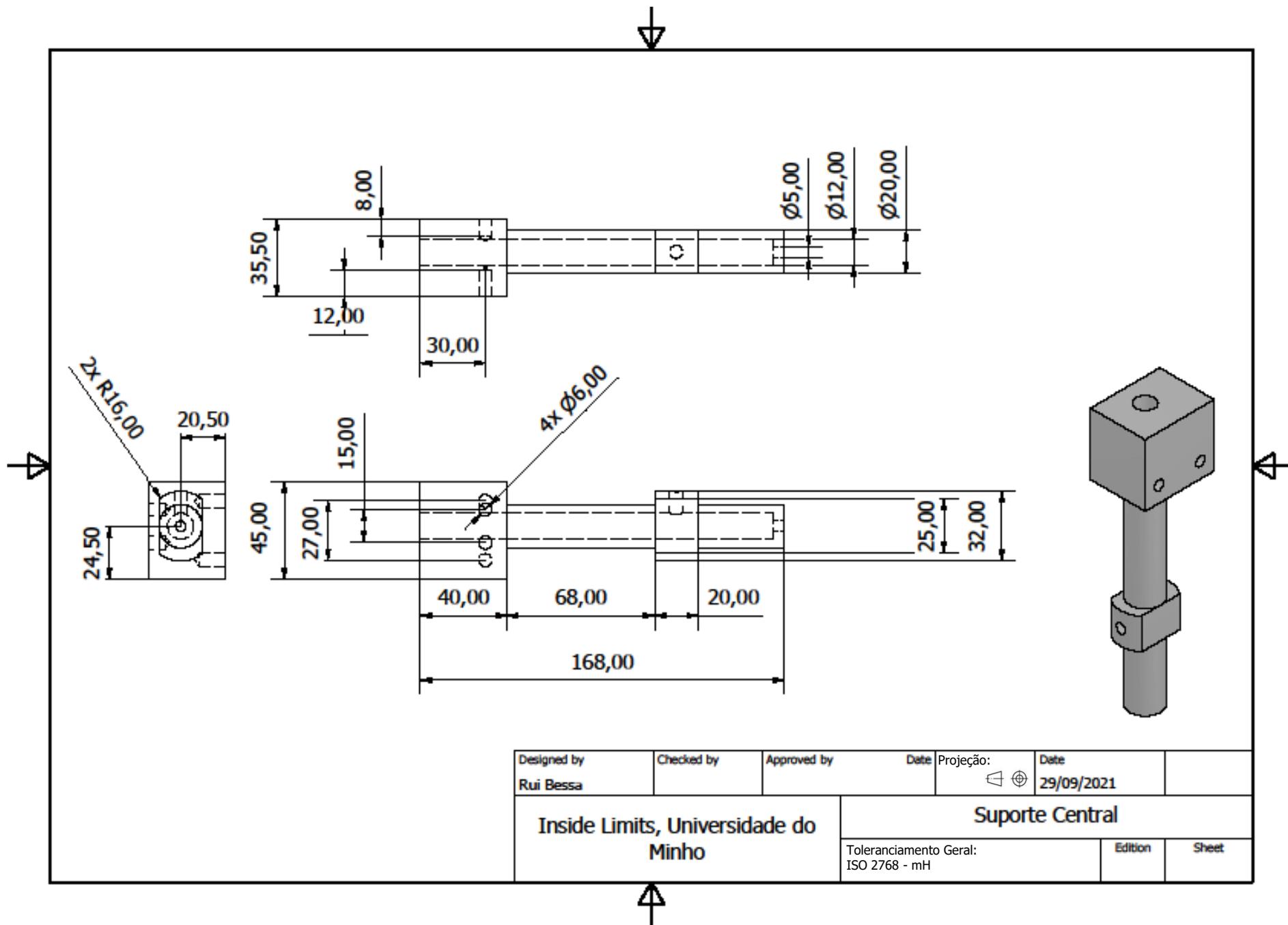
DRAWN Rui Bessa	29/09/2021	Inside Limits, Universidade do Minho		
CHECKED		TITLE		
QA		Protótipo de Garra de Fixação		
MFG		SIZE A3	DWG NO	REV
APPROVED		SCALE 1 / 2	SHEET 1 OF 1	

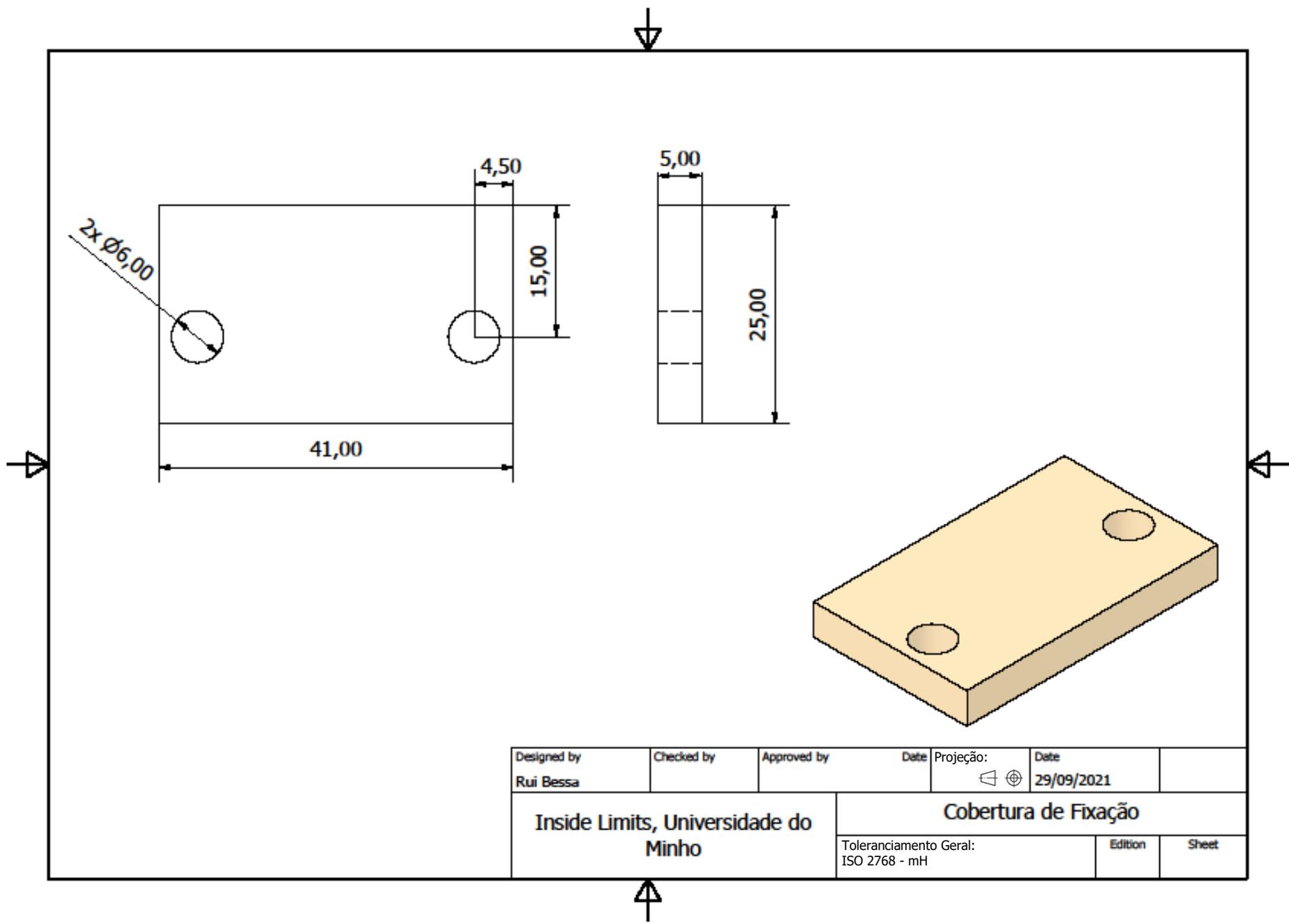


Designed by Rui Bessa	Checked by	Approved by	Date	Projeção: 	Date 29/09/2021	
<b>Inside Limits, Universidade do Minho</b>			<b>Deslizador</b>			

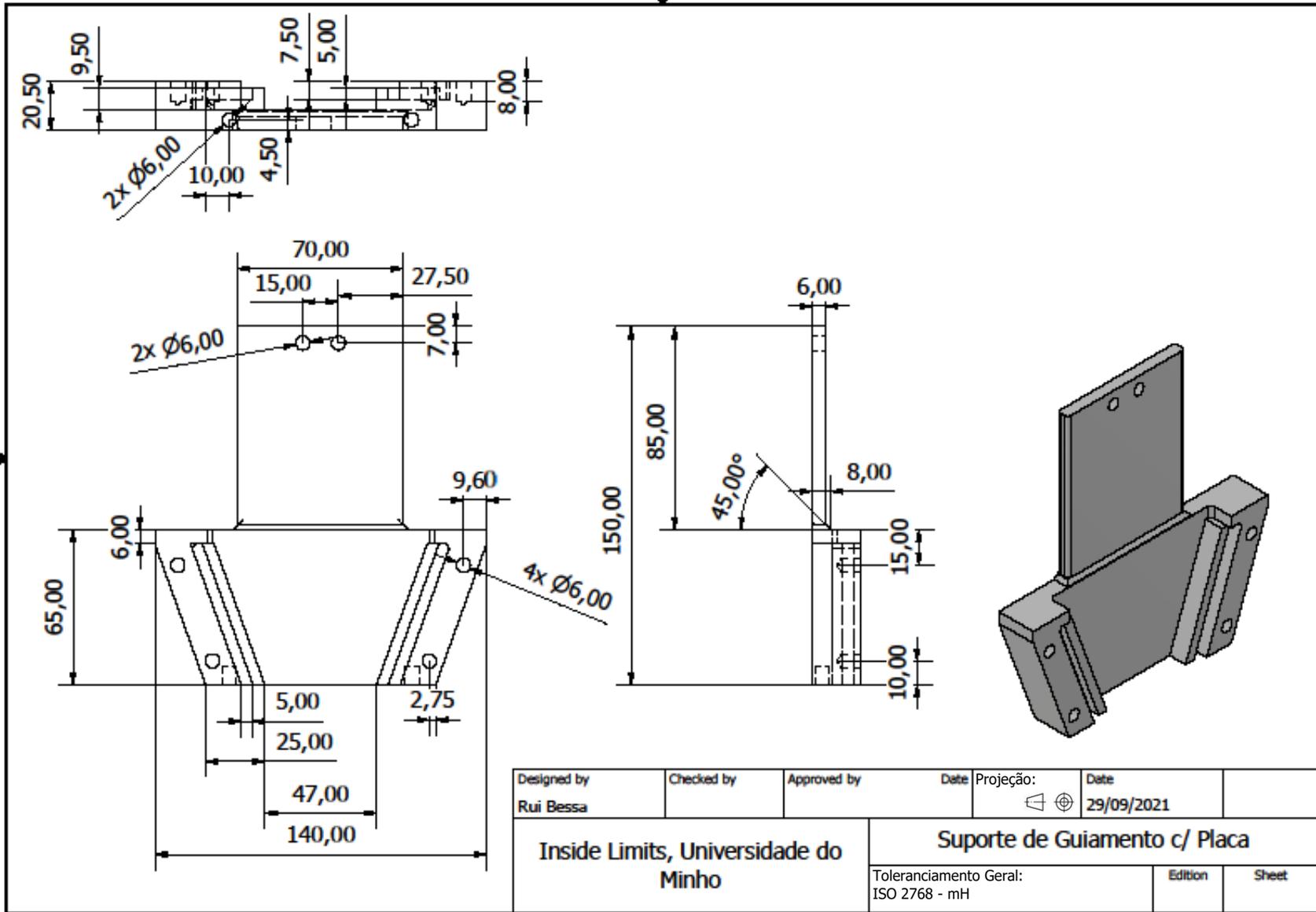


Designed by Rui Bessa	Checked by	Approved by	Date	Projeção: 	Date 29/09/2021
Inside Limits, Universidade do Minho			Dedo da Garra		
			Toleranciamento Geral: ISO 2768 - mH	Edition	Sheet

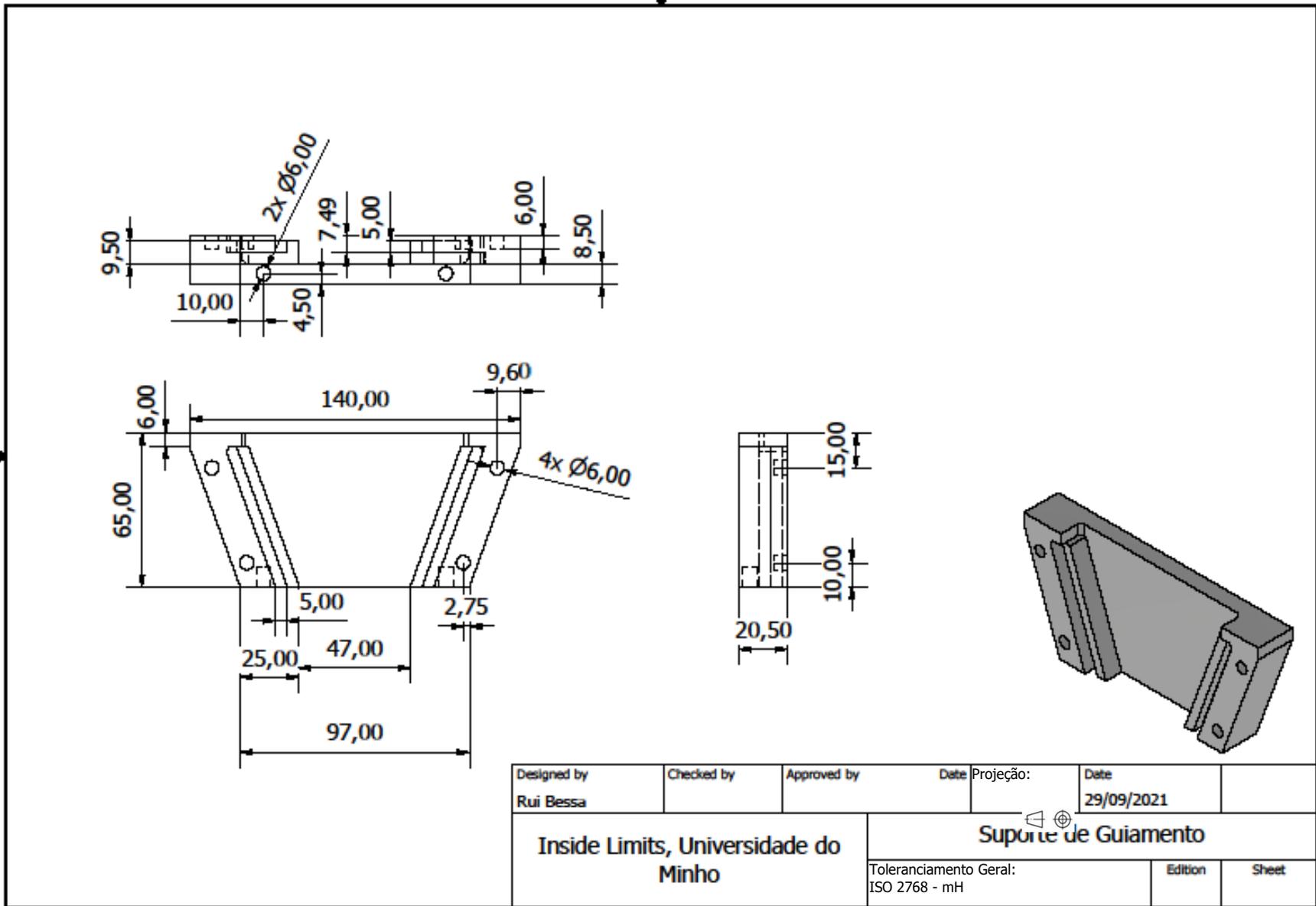




Designed by Rui Bessa	Checked by	Approved by	Date	Projeção: 	Date 29/09/2021	
Inside Limits, Universidade do Minho			<b>Cobertura de Fixação</b>			
			Toleranciamento Geral: ISO 2768 - mH		Edition	Sheet



Designed by Rui Bessa	Checked by	Approved by	Date	Projeção: ⊲ ⊕	Date 29/09/2021	
Inside Limits, Universidade do Minho			Suporte de Guiamento c/ Placa			
Toleranciamento Geral: ISO 2768 - mH			Edition		Sheet	



Designed by Rui Bessa	Checked by	Approved by	Date	Projeção:	Date 29/09/2021	
Inside Limits, Universidade do Minho			Suporte de Guiamento			
			Toleranciamento Geral: ISO 2768 - mH		Edition	Sheet