

**Sistema robótico terrestre para apoio a
atividades de manutenção de solo em
pomares de prunóideas**
Versão final após discussão

André Filipe Rodrigues Veiros

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2^o ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

outubro de 2020

Agradecimentos

Aos meus pais pelo apoio incondicional em todo o meu percurso académico, por me terem incentivado a nunca desistir mesmo em alturas difíceis e que todos os problemas têm uma solução.

Aos meus amigos de laboratório Diogo Morais, Ricardo Mesquita e Martim Aguiar, pelo auxílio dado na elaboração deste robô.

Ao técnico, João Correia por toda a ajuda na construção do protótipo, pois sem o seu contributo não seria possível a sua realização.

Ao meu orientador, Professor Pedro Dinis Gaspar por me apoiar em todo o desenvolvimento do projeto, bem como a oportunidade de envolver num projeto desta dimensão.

À Raquel, pelo apoio e motivação dados ao longo deste árduo percurso e pelo auxílio na revisão do presente trabalho.

Este trabalho de investigação é financiado pelo projeto PrunusBot - Sistema robótico aéreo autónomo de pulverização controlada e previsão de produção frutícola, Operação n.º PDR2020-101-031358 (líder), Consórcio n.º 340, Iniciativa n.º 140, promovido pelo PDR2020 e co-financiado pelo FEADER e União Europeia no âmbito do Programa Portugal 2020.

Resumo

Fruto do crescimento da população mundial, a agricultura teve de se reinventar, introduzindo novas técnicas e ferramentas, conseguindo assim mais controlo sobre as colheitas, por forma a otimizá-las e assim aumentar os rendimentos na produção alimentar. Este é um setor que cada vez mais carece de mão-de-obra, devido à desertificação populacional dos meios rurais e como não pode parar, dada a necessidade de bens alimentares ser constante, assim como as tarefas a realizar, a introdução da robótica na agricultura poderá ajudar a resolver este constrangimento. Já existem algumas soluções automatizadas e robóticas para executar certos trabalhos agrícolas, mas ainda existe um longo caminho a percorrer até existirem soluções capazes de dar resposta a todas as tarefas realizadas na agricultura. Apesar de toda a evolução da robótica nesta área, a aplicação de muitos dos sistemas desenvolvidos não é rentável, pois o volume de trabalho existente não justifica o investimento inicial necessário.

Nesta dissertação apresenta-se o dimensionamento e todas as etapas de construção de um robô agrícola para o controlo de infestantes e recolha de frutos caídos no chão do pomar. O robô foi projetado para ser aplicado na cultura do pêsego, podendo ser facilmente adaptável a outras culturas frutícolas. Esta proposta pretende contribuir para a redução da quantidade de herbicida utilizado no controlo de infestantes, reduzindo assim o impacto ambiental associado a esta tarefa, bem como minorar a atividade microbiana nas culturas da campanha seguinte através da recolha dos frutos caídos, evitando assim danos nos frutos das futuras culturas.

Para tal, foi projetada e construída a estrutura de um robô terrestre tendo em consideração os requisitos dimensionais para a adequada locomoção na entrelinha de pomares de prunóideas. Tratando-se de um robô destinado a duas tarefas agrícolas a realizar em momentos diferentes da campanha, o projeto do braço robótico cartesiano com três graus de liberdade que incorpora foi fundamental. Aquando da aplicação particularizada de herbicida para controlo de infestantes e consequente redução da carga de produtos fitofarmacêuticos no solo, foi projetado um sistema de pulverização. Para a atividade de recolha de frutos caídos no solo, com destino à alimentação animal, e consequente promoção de economia circular e da redução da atividade microbiana e da multiplicação de insetos, com promoção do impacte ambiental por redução de aplicação de herbicidas e pesticidas, foi projetada uma garra flexível. Os componentes mecânicos, elétricos e eletrónicos de controlo, regulação e comando foram projetados, alguns desenvolvidos, montados e programados para o desenvolvimento do sistema robótico. Este sistema pretende ser um contributo para a nova revolução agrícola que se começa a desenhar, constituída pela automação e robotização de atividades agrícolas com o intuito de melhorar a eficácia e eficiência das produções (Agricultura 4.0), face à procura crescente de produtos agrícolas, condicionada pela disponibilidade de mão-de-obra, pela influência das alterações climáticas e pela necessidade cada vez mais premente de assegurar sustentabilidade ambiental na agricultura.

Palavras-chave

Robótica, Agricultura, Prunóideas, Robô terrestre, Controlo de infestantes, Recolha de frutos, Braço robótico cartesiano, Agricultura 4.0

Abstract

As a result of the growth of the world population, agriculture had to reinvent itself by introducing new techniques and tools and thus achieving more control over the crops in order to optimize and increase yields in food production. This is a sector that every day increases the lack of human labour due to desertification of rural areas and it can't stop, because of the constant need for food as well the work to be carried out, the introduction of robotics into agriculture could help to solve this problem. There are already some solutions to perform specific agricultural work, but there is still a long way to go before finding solutions capable of answering to all tasks performed in agriculture. Despite all the evolution of robotics in this area, the application of many of the systems developed is not profitable because the existing workload doesn't justify the initial investment required.

This dissertation presents the design and all the stages of construction of an agricultural robot for weed control and for collect fallen fruits on the orchard floor. The robot is designed to be applied in the peach culture but at the same time to be easily adaptable to other fruit crops. This proposal aims to contribute to the reduction of the herbicide used in weed control, thus reducing the environmental impact associated with that task, as well as reducing the microbial activity in the crops of the following year through the collection of fallen fruits, avoiding damages in fruits of future cultures.

Thus, the structure of a terrestrial robot was designed and built considering the dimensional requirements for adequate locomotion between the rows of peach orchards. As it is a robot designed for two agricultural tasks to be carried out at different times during the campaign, the design of the cartesian robotic arm with three degrees of freedom that it incorporates was fundamental. For spraying herbicides for weed control and reducing the load of plant protection products on the soil, a spraying system was designed. For the activity of collecting fallen fruits on the ground for animal feed, and the consequent promotion of circular economy and the reduction of microbial activity and the multiplication of insects, with the promotion of the environmental impact by reducing the application of herbicides and pesticides, it was designed a flexible gripper. The mechanical, electrical and electronic components of the control, regulation and command system were designed, some of them constructed, assembled and programmed for the development of the robotic system. This system is intended to be a contribution to the new agricultural revolution that is arising, consisting in the automation and robotization of agricultural activities in order to improve the efficiency and efficiency of production (Agriculture 4.0), in view of the growing demand for agricultural products, restricted by the availability of human resources, the influence of climate change and the increasingly need to ensure environmental sustainability in agriculture.

Keywords

Robotics; Agriculture; Stone fruit; Terrestrial robot; Weed control; Collect fruit; Cartesian robotic arm; Agriculture 4.0

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura	xv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	2
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação	2
1.4. Visão geral e organização da dissertação.....	4
2. Estado da Arte	5
2.1. Robôs de controlo de infestantes	5
2.2. Robôs de colheita	11
2.3. Nota conclusiva.....	18
3. Materiais e Métodos	19
3.1. Modelação Tridimensional (3D)	19
3.1.1. Software de desenho assistido por computador - SolidWorks	19
3.2. Maquinação por Comando Numérico Computorizado (CNC)	20
3.2.1. Linguagem de programação	20
3.2.2. Router CNC de 3 eixos	20
3.2.3. Corte por jato de água	21
3.3. Torneamento Mecânico	23
3.4. Impressão 3D	25
3.4.1. Modelação por deposição de material fundido (FDM)	26
3.5. Soldadura	27
3.5.1. Arco elétrico	28
3.5.1.1. Soldadura MIG (Metal Inert Gas)	28
3.5.1.2. Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas)	30
3.6. Compósitos.....	33
3.6.1. Fibras	33

3.6.2. Resinas.....	35
3.7. Nota Conclusiva.....	36
4. Protótipo.....	37
4.1. Formulação concetual.....	37
4.2. Dimensionamento.....	41
4.2.1. Dimensionamento mecânico.....	41
4.2.2. Dimensionamento elétrico.....	45
4.3. Desenho.....	48
4.4. Construção.....	53
4.4.1. Estrutura.....	53
4.4.2. Proteção de fibra.....	54
4.4.3. Suporte da caixa de proteção.....	57
4.4.4. Suporte das baterias.....	58
4.4.5. Suporte de carga/depósito.....	59
4.4.6. Sistema de eixos cartesiano.....	59
4.4.7. Suportes dos eixos z_1	61
4.4.8. Suporte bico de pulverização.....	62
4.5. Testes.....	63
4.6. Nota Conclusiva.....	63
5. Conclusões.....	65
5.1. Conclusões gerais.....	65
5.2. Trabalhos futuros.....	66
Referências Bibliográficas.....	67
Anexos.....	73

Lista de Figuras

Figura 1 - Robô ARA da Ecorobotix [7].	6
Figura 2 - Robô de pulverização de precisão Hortibot [9].	6
Figura 3 - Ladybird robô de controlo de infestantes [11].	7
Figura 4 - Robô de pulverização de precisão Weedy [12].	7
Figura 5 - Asterix robô de pulverização de precisão [13].	8
Figura 6 - AgBot II robô de controlo de infestantes [14].	8
Figura 7 - Pequeno robô para controlo de infestantes Oz [15].	9
Figura 8 - Robô Dino da Naio Technologies [16].	9
Figura 9 - Robô de controlo de infestantes para vinha [17].	9
Figura 10 - BoniRob robô de remoção mecânica de infestantes	10
Figura 11 - Robô de controlo de infestantes [21].	10
Figura 12 - Robô do projeto Phoenix [23].	11
Figura 13 - Robô de colheita de morangos [25].	12
Figura 14 - Robô Harverst CROO para colheita de morangos [26].	12
Figura 15 - Sistema robótico Agrobot [27].	13
Figura 16 - Robô de colheita de morangos Dogtooth [28].	13
Figura 17 - Robô de colheita de tomate GRoW [29].	14
Figura 18 - Robô de colheita de tomate cherry Virgo [30].	14
Figura 19 - Robô de colheita de tomate [31].	15
Figura 20 - Robô de colheita Sweeper [33].	15
Figura 21 - Robô de colheita de pepinos Harvey [34].	15
Figura 22 - Sistema robótico de colheita e armazenamento de pepino da Crux Robotics [36].	16
Figura 23 - CATCH- Sistema de colheita com dois braços robóticos articulados [37].	16
Figura 24 - Mecanismo de colheita da Abundat Robotics [39].	17
Figura 25 - Sistema de colheita da maçã da FFRobotics [40].	17
Figura 26 - Robô de colheita de Kiwi da RoboticsPlus [41].	17
Figura 27 - Router CNC 3 eixos [48].	21
Figura 28 - Variantes dos equipamentos de corte por jato de água.	22
Figura 29 - Esquemático do jato de água com abrasivo, adaptado de [53].	23
Figura 30 - Ilustração de um torno mecânico e constituintes [54].	24
Figura 31 - Representação de impressora 3D [59].	27
Figura 32 - Classificação dos modos de transferência [66].	29
Figura 33 - Esquema de máquina de soldadura MIG.	30
Figura 34 - Ilustração do processo de soldadura MIG [68].	30
Figura 35 - Equipamento de soldadura TIG [71].	32
Figura 36 - Representação do processo de soldadura TIG [72].	33
Figura 37 - Exemplos de tipologias de fibra de vidro [75].	34
Figura 38 - Exemplos de tipologias de fibra de carbono [77].	34
Figura 39 - Exemplo de fibra de kevlar [79].	34
Figura 40 - Exemplo de fabricação de compósito.	36
Figura 41 - Primeiro esboço do robô.	38
Figura 42 - Segundo esboço do robô.	38

Figura 43 - Terceiro esboço do robô.	39
Figura 44 - Quarto esboço do robô.	39
Figura 45 - Quinto esboço do robô.	40
Figura 46 - Esboço final do robô.	40
Figura 47 - Imagem ilustrativa do problema.	41
Figura 48 - Conjunto motor/caixa redutora selecionado.	43
Figura 49 - Detalhe do perfil de alumínio.	44
Figura 50 - Bateria de gel de 12v 55 Ah selecionada.	47
Figura 51 - Válvula Solenóide.	48
Figura 52 - Primeiro modelo 3D do robô.	48
Figura 53 - Vista explodida do robô.	49
Figura 54 - Processo evolutivo do suporte do eixo z_1	50
Figura 55 - Estrutura do robô.	50
Figura 56 - Conjunto roda e motor.	51
Figura 57 - Sistema de eixos cartesianos.	51
Figura 58 - Caixa de proteção das baterias e sistema de controlo.	52
Figura 59 - Baterias e gaveta do sistema de controlo.	52
Figura 60 - Molde da caixa de proteção.	53
Figura 61 - Fibra de vidro necessária para a construção da caixa.	54
Figura 62 - Primeiro resultado da caixa de proteção.	54
Figura 63 - Caixa de proteção antes do acabamento.	55
Figura 64 - Caixa de proteção em processo de acabamento.	55
Figura 65 - Detalhe da reparação da caixa de proteção.	56
Figura 66 - Puxadores das portas e gaveta.	56
Figura 67 - Caixa de proteção finalizada.	57
Figura 68 - Calha das baterias.	57
Figura 69 - Suporte finalizado e aplicado na estrutura.	58
Figura 70 - Suporte de bateria.	58
Figura 71 - Suporte traseiro.	59
Figura 72 - Eixo linear y_1	59
Figura 73 - Placa de acoplamento do motor na traseira a do eixo.	60
Figura 74 - Eixo linear z_1	60
Figura 75 - Elaboração do eixo z_2	61
Figura 76 - Eixo linear y_2	61
Figura 77 - Suporte do eixo z_1	62
Figura 78 - Bico de pulverização.	62
Figura 79 - Robô no teste do pomar.	63
Figura 80 - Desenho técnico da caixa de proteção das baterias e controlo.	74
Figura 81 - Desenho técnico da porta direita da bateria.	75
Figura 82 - Desenho técnico da porta esquerda da bateria.	76
Figura 83 - Desenho técnico da tampa da gaveta.	77
Figura 84 - Desenho técnico do puxador.	78
Figura 85 - Desenho técnico da estrutura do robô.	79
Figura 86 - Desenho técnico do suporte da caixa de proteção das baterias e controlo.	80
Figura 87 - Desenho técnico da calha das baterias.	81
Figura 88 - Desenho técnico do suporte da bateria.	82
Figura 89 - Desenho técnico do suporte traseiro para o depósito e caixa de carga.	83
Figura 90 - Desenho técnico dos suportes do motor de locomoção.	84
Figura 91 - Desenho técnico do suporte do eixo z_1	85
Figura 92 - Desenho técnico dos suportes das ventoinhas.	86
Figura 93 - Desenho técnico da parte frontal do eixo y_1	87
Figura 94 - Desenho técnico do suporte inferior do bico de pulverização.	88

Figura 95 - Desenho técnico do suporte superior do bico de pulverização.89

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Compilação dos robôs de controlo de infestantes.	11
Tabela 2 – Tipos de processo de soldadura TIG [69].	31
Tabela 3 - Tipos de elétrodos de tungsténio [70].	31
Tabela 4 – Matriz de tomada de decisão do material de construção da caixa de proteção.	44
Tabela 5 – Matriz de tomada de decisão das baterias.	46

Nomenclatura

Geral:

- a aceleração [m/s^2];
- E Energia, [Wh];
- F Força resultante, [N];
- g Aceleração da gravidade, $\{9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\}$;
- I Corrente [A];
- m Massa do robô, [kg];
- p Peso [kg];
- r Raio da roda, [m];
- t Tempo, [s];
- V Tensão, [V];
- P Potência, [W];
- T Binário, [Nm];

Simbologia grega:

- Δ Variação;
- ω Velocidade angular;
- v Velocidade;
- α Ângulo;

Acrónimos:

- 2D *Bidimensional*;
- 3D *Tridimensional*;
- CAD *Computer Aided Design*;
- CAM *Computer Aided Manufacturing*;
- CNC *Computer Numerical Control*;
- FDM *Fused Deposition Modelin*;
- GPS *Global Positioning System*;
- LIDAR *Light Detection And Ranging*;
- MDF *Medium Density Fiberboard*;
- MIG *Metal Inert Gas*;
- PLA *Polylactic acid*;
- TIG *Tungsten Inert Gas*;

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com a evolução da agricultura, advém uma crescente necessidade de modernização das infraestruturas de apoio ao setor, sendo esta uma consequência de fatores internos e externos tais como a falta de mão-de-obra disponível nas áreas rurais e a necessidade de produzir uma elevada quantidade de alimentos. Para além dos fatores referidos, existe falta de terrenos de cultivo devido ao aumento da população, registando-se em 2015 uma população mundial de 7,3 mil milhões de pessoas, que se estima aumentar para 8,5 mil milhões de pessoas em 2030, e que terá que ter alimentos [1].

Fruto do crescimento populacional e dos fatores ambientais, ao longo dos tempos, a agricultura teve de se modernizar e tentar manter-se na vanguarda tecnológica, de forma a dar resposta à necessidade mundial de produção de alimentos. Para isso, têm sido procuradas soluções que permitam maximizar a produção, tendo sempre em conta a sustentabilidade e o desperdício alimentar. Perante o desenvolvimento da humanidade, a agricultura tem desde cedo adotado medidas tecnológicas que lhe permitiu acompanhar as necessidades do mercado, tais como a introdução de sistemas pouco complexos para o controlo de sistemas de rega, sistemas de doseamento de fertilizantes e pesticidas, entre outras técnicas. Mas, no virar da década de 90, a agricultura viu se envolver numa mecanização em massa [2].

Toda esta evolução começou a provocar pequenos problemas ambientais que se foram agravando com o passar dos anos, como, por exemplo, a produção de gases de efeito de estufa e a erosão de terras de cultivo decorrentes de técnicas de agricultura intensiva [3]. A evolução permitiu a introdução de novas técnicas de gestão agrícola, sistemas de controlo, entre outras inovações, bem como novas ideologias, sendo que agregação de todas estas técnicas é intitulada de agricultura de precisão. Existe outro termo que está diretamente relacionado com a agricultura de precisão, que é a Agricultura 4.0, e que deriva do termo Indústria 4.0, que remete à digitalização, automatização e centralização dos processos de produtivos.

Esta etapa não é apenas uma simples modernização da agricultura, mas sim o resultado de operações e decisões que passam a ser pensadas e geridas com base em todos os dados recolhidos no campo, tendo a possibilidade de interligar de todos os equipamentos. A robótica é também um dos grandes impulsionadores da Agricultura 4.0, pois veio introduzir robôs capazes de colher, controlar infestantes e monitorizar culturas, entre outros. Estes robôs vieram automatizar tarefas repetitivas e de difícil execução ou até mesmo atividades que colocam em risco a vida humana.

Mas um dos maiores obstáculos que retém o desenvolvimento da robótica neste setor é a grande dificuldade na implementação de automatismos, uma vez que as tarefas que são necessárias de desempenhar incluem uma elevada complexidade decorrente da variabilidade de condições extrínsecas (por exemplo, condições ambientais, obstáculos, etc) e intrínsecas (crescimento das culturas, heterogeneidade de cor, de forma, de tamanho, etc) às culturas.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Existe uma carência enorme de mão-de-obra no setor agrícola. Esta deve-se a vários fatores como necessidades de contratação bastantes distintas ao longo do ano, a precariedade do setor agrícola e ainda o abandono das áreas rurais. A procura de mão-de-obra na agricultura muda bastante ao longo do ano, pelo facto de apenas haver uma maior necessidade desta durante a época de colheita. Assim, torna-se uma tarefa bastante complexa contratar as pessoas necessárias para essa altura, pondo os trabalhadores numa situação precária ao não conseguirem terem um trabalho anual.

A desertificação das zonas rurais é um problema que se tem vindo a agravar ao longo dos anos, devido às alterações climáticas, afetando a fertilidade dos solos, a produtividade e ainda provocando a perda de potencial económico. Portugal é um dos países mais afetados na Europa pela desertificação, verificando-se mais nas zonas sul e interior do país [4]. A automatização na agricultura tenta colmatar algumas destas falhas para conseguir acompanhar a necessidade de aumento de produção de alimentos, devido ao facto da população mundial estar a crescer a um ritmo considerável, o que faz com que haja necessidade de produzir com a máxima eficiência. Com a introdução de técnicas e equipamentos mais avançados consegue-se ter um maior controlo sobre as culturas e, assim, otimizar todo o processo. Por outro lado, também se consegue começar a resolver o problema de falta de mão-de-obra neste setor, com a introdução de sistemas robotizados capazes de executar tarefas de colheita, controlo de infestantes, monitorização e movimentação de cargas, sendo estes aqui referidos os com mais equipamentos desenvolvidos.

Em tempos de pandemia, como a que se vive atualmente, levantam-se questões sobre a impossibilidade de deslocação para a realização das mais variadíssimas tarefas. Esta problemática acaba por abrir a possibilidade de integração de sistemas robotizados na realização destas tarefas e mostram a importância que um dia poderão ter, pois estes requerem uma interação humana muito menor. Apesar de todas estas considerações serem bastante promissoras, ainda existe um longo caminho a percorrer, pois estas tecnologias ainda se encontram numa fase inicial, havendo pouco sistemas desenvolvidos para as variadíssimas tarefas que é necessário desempenhar na agricultura.

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

É objetivo desta dissertação apresentar o desenvolvimento de uma plataforma robótica terrestre, autónoma e multifacetada, projetada para a utilização em pomares de pessegueiros, mas facilmente aplicável em outras culturas como a da maçã, da pera ou da laranja pois, como o controlo de infestantes se executa de igual maneira, apenas seria necessário alterar o código da deteção de fruta.

O trabalho de investigação exposto nesta Dissertação decorre de uma das atividades do projeto PrunusBot. Este projeto visa o desenvolvimento de sistemas robóticos destinados à inovação tecnológica na fruticultura, nomeadamente de pomares de prunóideas na região da Beira Interior, recorrendo à pulverização particularizada para controlo de infestantes, à recolha e utilização dos frutos caídos no chão do pomar e à previsão da produção.

A plataforma foi pensada de uma forma sustentável para que a sua introdução no meio agrícola cause o mínimo de impacto possível em termos ambientais. Em particular, a plataforma robótica autónoma destina-se à realização de atividades agrícolas na cultura do pêssego dirigidas à: (1) aplicação precisa e particular de herbicidas para controlo de infestantes, visando a redução do impacto ambiental no solo, na cultura e no próprio fruto, contribuindo por um lado para o

aumento da rentabilidade do pomar pela redução de aplicação de produtos fitofarmacêuticos, e por outro lado, e em última instância, para a melhoria da saúde dos consumidores, e (2) retirada do solo de frutos caídos, com o intuito de proceder à sua valorização como frutos de refugo na sua utilização na alimentação de pequenos ruminantes, para além de contribuição para redução de doenças e pragas.

Com o recurso à pulverização de precisão, irão ser reduzidas as quantidades de herbicidas utilizadas no controlo de infestantes. Haverá uma redução significativa de químicos empregues no solo devido a utilização de técnicas mais avançadas, que procedem ao controlo dos infestantes de uma forma precoce e localizada, ao contrário dos métodos utilizados que são pouco avançados, controlando de uma forma generalizada causando muito mais impacto ambiental. Isto é, o controlo de infestantes numa fase inicial do seu desenvolvimento, utilizando menor quantidade de herbicida, quer pelo menor volume das infestantes que, por consequência requer menor quantidade de herbicida, quer pela precisão da aplicação que será apenas dirigida aos elementos na imagem reconhecidos como infestantes, quer pela autonomia de realização da tarefa. A precisão do controlo das infestantes e a menor quantidade de herbicida contribuem para o aumento da rentabilidade do pomar, quer por via do aumento da produção quer pela possível diminuição dos custos variáveis. Adicionalmente, estes resultados enquadram-se numa melhoria da sustentabilidade ambiental da cultura provada pela redução da aplicação de produtos fitossanitários.

A recolha dos frutos caídos irá ter vários impactos, tanto diretos como indiretos, na cultura do pêssego. Em resultado da queda das árvores, os frutos ficam depositados no solo potenciando diversos problemas, nomeadamente o desenvolvimento de doenças como podridões (*Monilia spp* ou *Botrytis spp*) ou o completar de ciclo de algumas pragas, que contribuirão para um maior risco de problemas fitossanitários nos ciclos seguintes devido ao aumento da população. Assim, diretamente haverá uma redução microbiana significativa na produção do ano seguinte, já indiretamente verificar-se-á uma redução dos custos de mão-de-obra acarretos a esta atividade, bem como um aproveitamento dos frutos para alimentação animal.

Assim, para o fruticultor a retirada dos frutos que se encontram no solo é uma prática cultural desejável e, habitualmente não é realizada, pois torna-se onerosa porque é realizada manualmente. Nos principais períodos de queda dos frutos as árvores se encontram com vegetação abundante, resultando em grande volume da copa das árvores. Assim, a mecanização desta operação seria muito facilitada se os frutos caídos junto às plantas se concentrassem na entrelinha e fossem recolhidos com facilidade, diminuindo muito a interferência com as árvores que se encontram repletas de frutos e que podem cair com facilidade pela passagem de uma máquina pesada. Neste contexto, existe a oportunidade para o aproveitamento desses frutos, quer para a alimentação animal, caso os resultados assim o indiquem, quer para um aproveitamento industrial, havendo aqui uma oportunidade para uma aplicação de economia circular.

O robô auxiliará na recolha de imagens para algoritmo de previsão da estimativa da produção, podendo-o fazer enquanto realiza outras tarefas.

A versatilidade da plataforma robótica desenvolvida foi pensada para uma fácil adaptação de novas ferramentas, possibilitando assim alterações ao protótipo inicial, caso necessário, bem como a possibilidade de desempenhar novas tarefas.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

Esta dissertação está, essencialmente, organizada em três partes: a primeira é a introdução à robótica agrícola, a segunda os materiais e métodos para elaboração de um robô e a última o desenvolvimento do protótipo para a recolha de frutos e controlo de infestantes.

Na primeira parte reuniu-se informação sobre os robôs agrícolas para controlo de infestantes e colheita existentes, analisando os aspetos mais relevantes de cada um. Na segunda, analisou-se técnicas e materiais a utilizar no desenvolvimento do robô agrícola. Na terceira parte desenvolveu-se o protótipo para controlo de infestantes através de pulverização de precisão e para recolha dos frutos caídos no chão do pomar.

Assim, o Capítulo 1 inclui o enquadramento e os objetivos da dissertação.

O Capítulo 2 reside na revisão bibliográfica acerca os robôs de controlo de infestantes e de robôs destinados a aticidades de colheita.

O Capítulo 3 descreve todas as técnicas, processos e materiais necessários para a construção da plataforma robótica.

No Capítulo 4 é exposto o dimensionamento, desenho e construção do protótipo desenvolvido.

Finalmente, no Capítulo 5, é elaborada uma análise geral do trabalho desenvolvido, bem como as conclusões do mesmo, e são apresentadas ideias e orientações para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

Neste capítulo são ser apresentadas duas tipologias de robôs agrícolas. Uma tipologia destinada ao controlo de infestantes e outra dirigida à colheita. Os robôs de controlo de infestantes estão divididos em duas áreas: o controlo mecânico e o químico. São avaliados os sistemas de deteção e os mecanismos de controlo de infestantes. Existem tipologias de robôs de colheita para diversas culturas. Aqui são analisadas características como a deteção de frutos, o mecanismo de recolha de frutos e a locomoção, entre outras. Esta revisão bibliográfica tem como objetivo analisar todas as características dos robôs agrícolas apresentados, de forma a apoiar o desenvolvimento de um robô capaz de recolher frutos caídos do chão do pomar e proceder a operações de pulverização de precisão.

2.1. Robôs de controlo de infestantes

As ervas daninhas, ou infestantes, são os termos gerais utilizados para caracterizar plantas que crescem de forma indesejada e disputam os recursos hídricos com as culturas, tendo assim um efeito negativo na agricultura. Estas acabam por ocupar áreas de cultivo, representando um grande problema a nível económico pelo investimento em produtos e equipamentos para o combate das mesmas e causando uma redução de lucro entre 10 e 15% [1].

Existem algumas formas para proceder ao controlo de infestantes, sendo as formas mecânica, química ou térmica as mais usadas para o controlo em grande escala.

O método mecânico envolve o uso de ferramentas agrícolas como grades, capinadeiras, ou até mesmos com robôs que utilizam equipamentos para remover mecanicamente os infestantes. Esta tipologia de robôs é cada vez mais usada por serem bastantes sustentáveis.

O método químico procede ao controlo através da aplicação de herbicidas. Estes incluem na sua composição substâncias químicas que inibem a fotossíntese e a respiração, entre outros mecanismos dos infestantes. O controlo químico de infestantes veio melhorar entre 10% a 50% o rendimento de diversas culturas, mas a aplicação contínua de herbicidas traz grandes desvantagens como a contaminação dos solos e recursos hídricos e ainda o desenvolvimento de espécimes resistentes a diversos herbicidas. Este método é muito utilizado na conceção de robôs de controlo de infestantes, tendo estes robôs a particularidade de executar pulverização de precisão, usando doses mais pequenas de herbicida e aplicando individualmente em cada infestante, conseguindo minimizar o impacto ambiental proveniente desta prática [5].

O método térmico utiliza energia térmica para matar os infestantes, podendo este ser feito através de técnicas diretas ou indiretas. As diferentes técnicas ou métodos existentes usam variadas fontes de energia para gerar calor, como o uso de radiação infravermelha e de micro-ondas, laser, campo eletrostático, irradiação, eletrocussão, luz ultravioleta, chama, vapor e água quente [6].

O controlo de infestantes através de pulverização de precisão e remoção mecânica são as aplicações mais frequentes para robôs agrícolas. Embora nem todos os protótipos desenvolvidos

tenham sido comercializados, existem várias tecnologias bastante promissoras para robôs de controlo de infestantes. Primeiramente, irão ser analisados os robôs de controlo de infestantes com recurso a pulverização localizada, bem como as suas funcionalidades, aspetos construtivos e os sistemas de deteção dos infestantes.

ARA Ecorobotix [7]: Sistema robótico de controlo de infestantes com recurso a visão computacional, que efetua a deteção das ervas daninhas e depois procede à pulverização localizada das mesmas com dois braços robóticos do tipo delta, com três graus de liberdade cada, conforme exposto na Figura 1. Este robô tem dois painéis solares que lhe permitem trabalhar cerca de 12 horas, cobrindo uma área até 3 ha/dia.



Figura 1 - Robô ARA da Ecorobotix [7].

Hortibot [8]: Utiliza a plataforma robótica totalmente automatizada do Spider¹, exposta na Figura 2, à qual foi acoplado um tanque e um sistema de pulverização. Através de visão computacional, o robô é capaz de detetar 25 tipos de ervas diferentes e, após a deteção, efetua a pulverização localizada. Possui bicos de pulverização diferenciados que abrem em função da deteção de infestantes. Logo, trata-se de uma solução estática, sem movimento de um braço robótico.



Figura 2 - Robô de pulverização de precisão Hortibot [9].

¹ “Spider.” [Online]. Available: <https://www.slope-mower.com/>. [Accessed: 15-May-2020].

Ladybird [10], [11]: A plataforma robótica foi desenvolvida de forma a operar via rádio controle, tendo a possibilidade de se deslocar autonomamente auxiliado por GPS, dois LiDAR (*Light Detection And Ranging*), estando posicionados um para a frente o outro para trás e uma câmara planoesférica (campo de visão de 360° para fornecer imagens contínuas do terreno circundante). Para proceder a detecção dos infestantes é utilizada uma câmara híperespectral, para fazer uma primeira análise através de algoritmos- Com a combinação de espectros são localizadas as infestantes. Tem apoio de uma câmara de espectro visível de forma a ter uma localização mais exata para pulverizar as infestantes, sendo que para posicionar o bico de pulverização recorre a um braço robótico articulado. Toda a parte superior do robô encontra-se coberta de painéis solares, para aumentar a autonomia. Na Figura 3 é apresentado este robô.



Figura 3 - Ladybird robô de controlo de infestantes [11].

Weedy [12]: Robô de pulverização de precisão para utilização em culturas de milho. Este robô, exposto na Figura 4, desloca-se de forma autónoma, tendo o auxílio de câmaras de espectro visível, sensores óticos, ultrassónicos e encoders para proceder à detecção, bem como à sua deslocação. Este sistema tem a possibilidade de pulverizar em três áreas em simultâneo, sendo elas na linha de plantio, na parte direita e esquerda dessa mesma linha.



Figura 4 - Robô de pulverização de precisão Weedy [12].

Asterix [13]: Robô de pequenas dimensões para a detecção e pulverização de ervas daninhas com recurso a uma câmara de espectro visível, conforme exposto na Figura 5.



Figura 5 - Asterix robô de pulverização de precisão [13].

Para o caso de robôs de controlo de infestantes através de sistemas mecânicos, de seguida serão analisados aspetos como as ferramentas disponíveis para proceder a remoção das ervas daninhas e à navegação autónoma.

AgBot II [14]: Robô de controlo de ervas daninhas com recurso a um sistema mecânico. O robô, exposto na Figura 6, efetua a deteção das ervas daninhas através de visão computacional e procede à remoção das mesmas, tendo ao seu dispor duas configurações de ferramentas, com enxadas triangulares, com ancinhos de três dentes ou a combinação das duas.



Figura 6 - AgBot II robô de controlo de infestantes [14].

Oz [15]: Robô de pequenas dimensões exposto na Figura 7 para executar tarefas na entrelinha de produtos hortícolas. A navegação é feita através de um LiDAR e com recurso a câmaras, com a possibilidade de acoplar 5 ferramentas diferentes, uma escova de linha, um escarificador, um pente de arames, um conjunto de aivequilhos e molas de torção para a remoção de ervas, e ainda um pequeno reboque com capacidade de carga até 300 kg.



Figura 7 - Pequeno robô para controlo de infestantes Oz [15].

Dino [16]: Robô de porte mediano, exposto na Figura 8, para produtos hortícolas com capacidade de trabalhar várias linhas ao mesmo tempo e, assim, ser capaz de cobrir uma área superior a 5 ha/dia.



Figura 8 - Robô Dino da Naio Technologies [16].

Ted [17]: Robô de grande porte para controlo de infestantes em vinhas, com altura e largura configuráveis, permitindo assim a sua adaptação às diferentes ramadas existentes, de acordo com a Figura 9. Dispõe de duas ferramentas, um arado e um disco dentado, sendo que o cliente pode escolher a ferramenta que mais se adapta a sua vinha.



Figura 9 - Robô de controlo de infestantes para vinha [17].

BoniRob [18], [19] Plataforma robótica exposta na Figura 10 capaz de fazer remoção de ervas daninhas através de uma haste mecânica, tendo este sido um método pensado para o cultivo de

cenoura onde não é possível a utilização de herbicidas. O robô também faz a recolha de dados para que se possa analisar o estado de desenvolvimento e saúde das plantas.



Figura 10 - BoniRob robô de remoção mecânica de infestantes

Vitrover Mower Robot [20]: Robô que recorre a três discos rotativos conforme exposto na Figura 11 para proceder ao corte dos infestantes. Foi desenvolvido primeiramente para utilização em vinhas, mas pode ser usado em diversas culturas. Este robô tem a possibilidade de trabalhar em enxame, podendo ser conectado a 50 robôs com capacidade de cobrir 250 ha.



Figura 11 - Robô de controlo de infestantes [21].

Projeto Phoenix [22]: Sistema robótico que, com recurso a um sensor de toque e um LiDAR, faz o posicionamento do robô em relação aos troncos das videiras. Este robô é utilizado para a remoção das ervas daninhas na fila junto às videiras, recorrendo a um sistema rotativo mecânico, conforme exposto na Figura 12.



Figura 12 - Robô do projeto Phoenix [23].

Na Tabela 1 estão compilados alguns dos robôs de controlo de infestantes de forma a ser possível analisar as especificações técnicas de cada um. Pode-se verificar que as características podem ser bastante dispares, apesar de cumprirem a mesma função.

Tabela 1 – Compilação dos robôs de controlo de infestantes.

Robô	Dimensões (CxLxA) [cm]	Peso [kg]	Locomoção	Autonomia [h]	Sensores	Culturas
ARA Ecorobotix [7]	220 x 170 x 130	130	2 rodas motrizes	≥ 12	Câmara stereo, GPS	Cereais Legumes
Ladybird [11]	Nd	280	4 rodas motrizes e direcionais	< 10	Camara multiespectral, Câmara stereo, Lidar, GPS	Produtos hortícolas
AgBot II [14]	200 x 300	400	2 rodas motrizes	10	Camara, GPS	Produtos hortícolas
Oz [15]	100 x 40 x 60	110	4 rodas motrizes	7	Câmara stereo, Lidar	Legumes Produtos hortícolas
Dino [16]	250 x 150-200 x 130	800	4 rodas motrizes e direcionais	≥ 8	GPS, Câmara	Produtos hortícolas Legumes
Ted [17]	230 x 150-200 x 150-200	900	4 rodas motrizes e direcionais	≥ 8	GPS, Câmara	Vinha
Vitrover Mower Robot [24]	75 x 40 x 29	40	4 rodas motrizes	Nd	GPS, Sensor de toque	Vinha Outras atividades não agrícolas

2.2. Robôs de colheita

Os robôs de colheita enfrentam grandes desafios pois, devido à quantidade de fatores a considerar bem como à dificuldade de remoção dos frutos, desempenham uma das mais complexas tarefas na agricultura.

Em todos os sistemas automatizados é desejável que haja heterogeneidade nos produtos, que as formas sejam iguais, entre muitos outros parâmetros, para que seja possível criar um padrão. No caso dos robôs colheita não há essa possibilidade, devido aos frutos não serem heterogêneos, os tamanhos diferirem e os estágios de maturação serem diferentes. No entanto, com estes dados de

entrada tão díspares, torna-se um desafio proceder à colheita. Para além destas limitações impostas pelos frutos, temos é necessário ter em conta outros fatores que irão trazer mais limitações ao processo, como diferentes níveis de luminosidade, bloqueio de visão por causa de folhas e ramos, entres outros pequenos (grandes) detalhes que vão existindo de cultura para cultura. De seguida, irão ser analisados vários robôs de colheita, evidenciando os aspetos mais relevantes de cada um.

Rubion [25]: Robô de configuração polar exposto na Figura 13 (três graus de liberdade), destinado à colheita de morangos. A deteção dos frutos é feita com recurso a câmaras de espetro visível. Este robô foi desenvolvido com o intuito de trabalhar dentro de estufas deslocando-se sobre carris, sendo que o robô coloca o produto em caixas que seguirão diretamente para venda.



Figura 13 - Robô de colheita de morangos [25].

Harvest CROO [26]: Sistema robótico de colheita exposto na Figura 14 com recurso a múltiplos braços robóticos. Para a deteção dos morangos recorre a câmaras, tendo ainda o auxílio de iluminação artificial. Uma das desvantagens do Harvest CROO é funcionar apenas com baixa densidade de plantas.



Figura 14 - Robô Harverst CROO para colheita de morangos [26].

Agrobot [27]: Robô de grande envergadura apresentado na Figura 15 que, através de um sistema de visão tridimensional, executa a detecção dos morangos e, pela ação de braços robóticos cartesianos, efetua a apanha dos mesmos, sendo que um robô pode ter mais de 24 braços robóticos.



a) Estrutura Robótica.

b) Detalhe da garra.

Figura 15 - Sistema robótico Agrobot [27].

Dogtooth [28]: Robô exposto na Figura 16 com dois braços robóticos articulados que recorre a visão computacional para detetar morangos, colhendo-os com uma pequena garra. Uma desvantagem deste sistema reside na não remoção completa do pedúnculo, criando assim uma zona propícia a doenças e danos a outros morangos durante o transporte.



Figura 16 - Robô de colheita de morangos Dogtooth [28].

GRoW [29]: Robô com capacidade de polinizar, podar, remover as folhas, colher e ainda monitorizar as plantas. Este robô foi concebido para trabalhar dentro de estufas, tendo um sistema de visão tridimensional que, quando conciliado com algoritmos, consegue identificar, localizar e verificar o estado de maturação dos tomates, conforme exposto na Figura 17.



Figura 17 - Robô de colheita de tomate GRoW [29].

Virgo [30]: Robô para colheita de tomate cherry, composto por um braço articulado, conforme exposto na Figura 18, cuja detecção dos frutos é feita através de câmaras de espectro visível. Permite também detetar os diferentes estados de maturação, utilizando garras impressas para conseguir um toque delicado, de forma a não danificar o fruto.



Figura 18 - Robô de colheita de tomate cherry Virgo [30].

Protótipo (Shanghai Jiao Tong University) [31]: Sistema robótico com dois braços robóticos que, com tipologia SCARA e com recurso a uma câmara estereoscópica, exposto na Figura 19, que consegue criar uma imagem tridimensional, obtendo assim as coordenadas dos frutos.

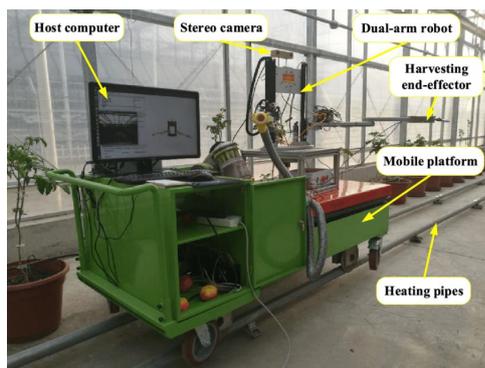


Figura 19 - Robô de colheita de tomate [31].

Sweeper [32]: Plataforma robótica com um braço robótico articulado que serve para colher pimentos, apresentado na Figura 20. Tem uma câmara 3D para proceder à deteção dos mesmos. Consegue deslocar-se de forma autónoma, recorrendo a carris quando se encontra nas entrelinhas da estufa.



Figura 20 - Robô de colheita Sweeper [33].

Harvey [34]: Sistema robótico com um braço robótico colaborativo (Universal Robotics) instalado, conforme exposto na Figura 21. Com recurso a uma câmara de espectro visível procede à deteção de pimentos, sendo que posteriormente os colhe através de uma garra de vácuo.

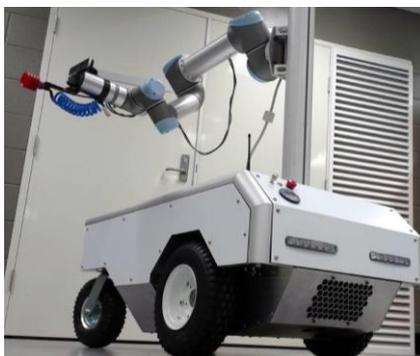


Figura 21 - Robô de colheita de pepinos Harvey [34].

Crux Robotics [35]: Sistema robótico exposto na Figura 22 para a colheita de pepinos, detecção de doenças, pulverização localizada e remoção de folhas. Este sistema recorre ao scan tridimensional das fileiras para detetar a maturação ideal de colheita, bem como as folhas que necessitam ser removidas para melhorar o crescimento dos mesmos. Para executar estas funções, dispõe de um braço robótico articulado. Este sistema robótico ainda se encontra em desenvolvimento.



Figura 22 - Sistema robótico de colheita e armazenamento de pepino da Crux Robotics [36].

CATCH [37]: Sistema robótico, com dois pequenos braços robóticos articulados, conforme exposto na Figura 23, destinados apanha de pepinos. Através de visão computacional e com recurso a iluminação artificial, efetua a deteção e colheita.



Figura 23 - CATCH- Sistema de colheita com dois braços robóticos articulados [37].

Abundant Robotics [38]: Plataforma robótica que procede à deteção, através de um scan, das macieiras, com auxílio de uma câmara estereoscópica, tendo ainda iluminação artificial. A recolha das maçãs é feita através de sucção, conforme exposto na Figura 24.



Figura 24 - Mecanismo de colheita da Abundat Robotics [39].

FFRobotics [40]: Plataforma robótica exposta na Figura 25 que, através de atuadores lineares, faz o posicionamento da garra para proceder à colheita das maçãs. A detecção é feita através de câmaras de espectro visível, sendo que a recolha das frutas após colhida é efetuada por tapetes rolantes que as transportam para um palote montado na parte traseira.



a) Estrutura Robótica.

b) Detalhe do sistema de recolha

Figura 25 - Sistema de colheita da maçã da FFRobotics [40].

RoboticsPlus [41]: Robô de colheita com 4 braços robóticos, conforme exposto na Figura 26. Procede à detecção de kiwis através de câmara de espectro visível e recorre aos braços robóticos para efetuar a colheita.



a) Estrutura Robótica.

b) Detalhe do sistema de colheita.

Figura 26 - Robô de colheita de Kiwi da RoboticsPlus [41].

2.3. Nota conclusiva

Ao longo deste capítulo foram apresentados robôs para controlo de infestantes e colheita, pois a plataforma robótica que irá ser desenvolvida terá que executar pulverização de precisão e, noutra altura do ano, recolher os pêssegos caídos no chão do pomar.

Nos robôs de controlo de infestantes foram apresentadas duas variantes de controlo: através de pulverização de precisão ou com recurso a sistemas mecânicos.

Nos robôs de pulverização de precisão, todos recorrem a um sistema de visão computacional para proceder à deteção dos infestantes, pois esta tipologia de robô tem como objetivo a redução da quantidade de herbicida utilizado.

Já nos robôs de controlo de infestantes através de sistemas mecânicos, na maior parte dos robôs analisados, a eliminação dos infestantes não é realizada de uma forma particularizada. Este sistema é bastante sustentável, tendo o mínimo de impacto ambiental, mas, por outro lado, quando o controlo é feito desta forma, no solo cria-se uma manta de vegetação nos primeiros tempos após a implementação desta tecnologia.

Todos os robôs de colheita apresentados colhem frutos individualmente pois, no caso do pêssego, sendo ele uma fruta sensível e de elevada perecibilidade, tem de ser recolhido com o máximo de cuidado ou facilmente acabará destruído e, dessa forma, não poderá ser aproveitado.

A grande maioria dos robôs analisados para proceder à recolha de frutos recorre a pelo menos um braço robótico articulado, pois assim consegue ter uma boa área de trabalho e alcançar com maior facilidade os frutos. Outros robôs utilizam sistemas cartesianos que, apesar de serem menos flexíveis em termos de alcance, são mais rígidos, de programação mais direta e acessíveis.

Todos estes robôs de colheita utilizam sistemas de visão computacional avançados para conseguirem detetar os frutos bem como o seu estado de maturação.

3. Materiais e Métodos

3.1. Modelação Tridimensional (3D)

A modelação tridimensional (3D) consiste na criação de um objeto com três dimensões dentro de um software de desenho assistido por computador (CAD – *Computer Aided Design*). O objeto pode ser criado a partir de formas simples até modelos bastantes complexos. As áreas que usam modelação 3D incluem desenvolvimento de produtos de consumo, design automóvel, fabricação de equipamentos industriais, arquitetura, design, engenharia, entretenimento, entre outras [42].

Embora estes softwares sejam baseados em fórmulas matemáticas complexas, os programas automatizam a computação para os utilizadores terem interfaces baseadas em ferramentas para facilitar a criação dos objetos.

Os modelos 3D podem ser facilmente transformados em objetos físicos, tanto através de impressão 3D como de processos de fabrico tradicionais. Os modelos também podem ser convertidos em imagens estáticas através da renderização 3D, comumente usada para criar apresentações para vendas, marketing ou comércio online. Os modelos 3D também podem ser criados a partir de engenharia reversa, através de digitalização 3D, sendo esta usada para criar réplicas digitais de todo o tipo de objetos ou até mesmo de humanos [43].

3.1.1. Software de desenho assistido por computador - SolidWorks

O SOLIDWORKS é um software de desenho eletromecânico que permite aos utilizadores desenvolverem ideias rapidamente, produzindo modelos e desenhos detalhados. Este software 3D é bastante abrangente e eficiente, ajudando a otimizar o desenvolvimento e a fabricação de produtos [44].

O software caracteriza-se ainda por ser multifacetado e oferecer aos utilizadores de diversos setores, a capacidade de projetar desde edifícios a máquinas, e ainda simular desde testes elétricos a comportamentos mecânicos, entre outros, sem a necessidade de recorrer a outro software. Pode-se então dizer que as soluções do software abrangem todos os níveis do processo de desenvolvimento do produto, além de proporcionar um fluxo de trabalho contínuo e integrado: projeto, verificação, design, comunicação e gestão de dados [45].

3.2. Maquinação por Comando Numérico Computorizado (CNC)

O termo CNC (Comando Numérico Computorizado ou *Computer Numeric Control*) é um processo de controlo de máquinas no qual se recorre a um software para pré-programar a manipulação de ferramentas em equipamentos com vários eixos. O processo pode ser usado para controlar uma variedade de máquinas, como centros de maquinação, tornos, corte jato de água, fresadoras entre outras [46].

3.2.1. Linguagem de programação

A linguagem de programação é código G. O controlador da máquina CNC lê o arquivo de Código G, linha por linha, e comanda a máquina para fazer os movimentos. A linguagem consiste num conjunto de códigos chamados G - Codes e M - Codes, onde cada instrução tem uma função específica.

Existem duas maneiras de criar o código: através da inserção manual do código pelo operador diretamente no equipamento ou utilizando um software CAM para gerar o código G, sendo este segundo o método mais comum. O software CAM importa um modelo 2D ou 3D e gera um ficheiro de código G para cortar a peça [47].

3.2.2. Router CNC de 3 eixos

As Router CNC de 3 eixos são muito comuns, pois podem ser usadas para produzir as geometrias mais usuais. Estes equipamentos são relativamente fáceis de programar e operar, portanto, os custos de maquinação inicial não são muito dispendiosos. Como apenas têm ao seu dispor três eixos para trabalhar, algumas operações mais complexas são impossíveis de realizar.

Equipamento

A Router CNC de 3 eixos exposta na Figura 27 é composta por:

1. Mesa de corte: esta mesa pode ter várias maneiras de fixação do material, desde vácuo a grampos ou mesmo a apertar diretamente numa chapa de MDF.
2. Motor de corte.
3. Suporte e ferramenta de corte podem-se acoplar várias ferramentas de corte para executar todas as diferentes operações sendo que os suportes também podem mudar consoante a ferramenta instalada.
4. Estrutura de movimento x-z.
5. Guias de movimentação segundo x.
6. Estrutura de movimento y.

Painel de controlo controla todas as a operações da máquina, visualiza os trajetos de corte e, se necessário, ainda permite fazer alterações ao código G. Não está representado na figura.

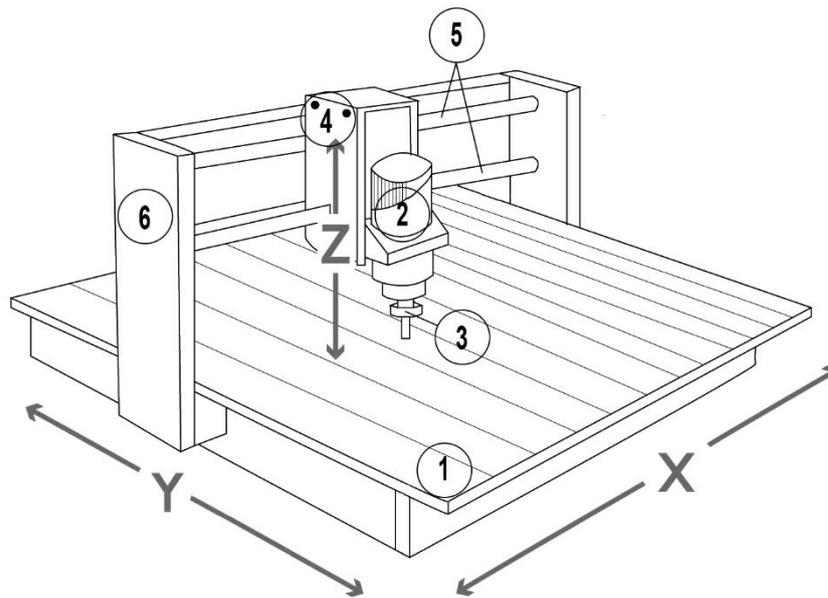


Figura 27 - Router CNC 3 eixos [48].

Processo

O processo de maquinação realizado por uma Router CNC de 3 eixos é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial:

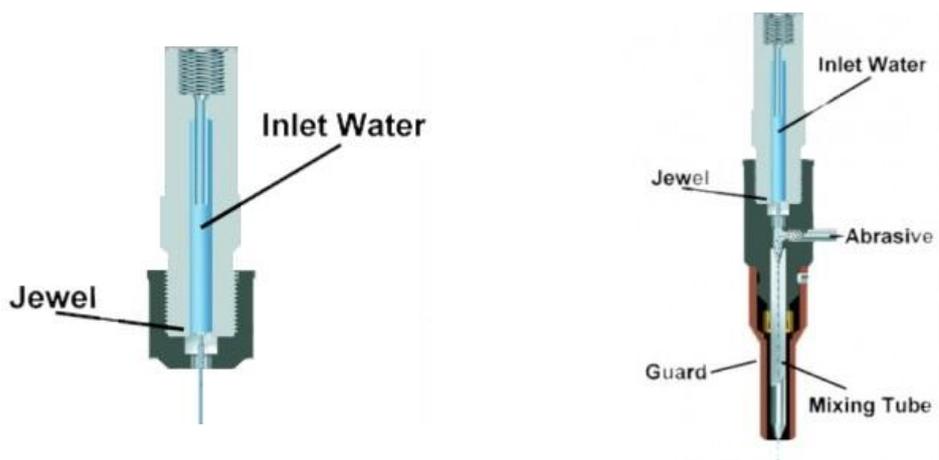
1. **Programação:** Disposição das peças para cortar, definição dos trajetos que a cabeça de corte terá de realizar e definição dos parâmetros de corte no programa referente ao equipamento.
2. **Preparação:** Colocação do material no equipamento, fixação do mesmo à mesa de corte e marcação do ponto de referência.
3. **Execução:** Inicialização do programa de corte das peças, verificação do sucesso das operações como pretendido e, por fim, remoção da peça finalizada.

3.2.3. Corte por jato de água

Os equipamentos industriais de corte por jato de água são usados em larga escala para corte de variadíssimos materiais sendo que, apesar do princípio de funcionamento ser muito similar em ambos, existem duas variantes deste equipamento:

1. **Jato de água puro,** corta materiais de baixa densidade como esponja, plástico, papel, material de isolamento, entre outros.
2. **Jato de água com abrasivo,** é similar ao jato de água puro, mas, após a criação do jato de água puro, o abrasivo é adicionado e misturado com água. Assim, o jato resultante pode cortar materiais de densidades mais elevadas, como metal, cerâmica, pedra, vidro e compósitos [49].

Exemplos das duas configurações de jatos de água são apresentados na Figura 28.



- a) Cabeça de corte jato de água puro [50]. b) Cabeça de corte jato de água com abrasivo [51].

Figura 28 - Variantes dos equipamentos de corte por jato de água.

Equipamento

Na Figura 29 é exposto um esquema de um equipamento industrial de corte por jato de água, sendo composto pelos seguintes componentes [52], [53]:

1. Sistema de filtragem - serve para remover todas as impurezas que se encontram na água de forma a não danificar os sistemas das bombas.
2. Bomba - gera a pressão necessária para cortar as peças; a pressão comum situa-se entre os 3.800-4.100 bar
3. Bomba de alta pressão - ou intensificador de pressão pode ser outra das terminologias serve para aumentar a pressão até 6200 bar conseguindo assim uma maior precisão [53]
4. Controlo do eixo z
5. Cabeça de corte - executa o corte com recurso a água e material abrasivo a alta pressão
6. Deposito do material abrasivo
7. Mesa de corte
8. Painel de controlo - controla todas as a operações da máquina, visualiza os trajetos de corte e, se necessário, ainda permite fazer alterações ao código G.

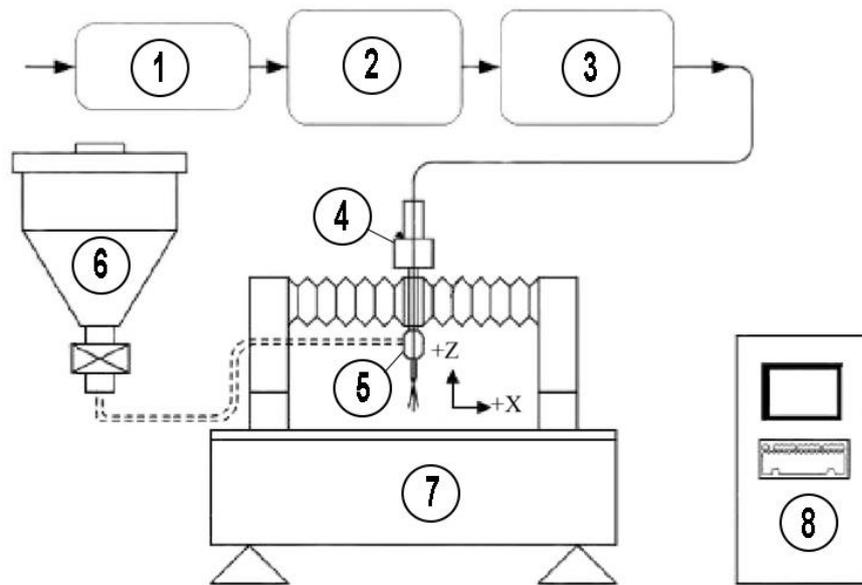


Figura 29 - Esquemático do jato de água com abrasivo, adaptado de [53].

Processo

O processo de maquinação realizado por um equipamento de corte por jato de água é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial:

1. **Programação:** Disposição das peças para cortar, definição dos trajetos que a cabeça de corte terá de realizar e definição dos parâmetros de corte no programa referente ao equipamento.
2. **Preparação:** Colocação do material no equipamento, fixação do mesmo à mesa de corte e marcação do ponto de referência.
3. **Execução:** Iniciação do programa de corte das peças e verificação da realização das operações como pretendido. Normalmente, antes da execução do programa na sua totalidade, realiza-se um pequeno teste para ver se os parâmetros de corte definidos são os ideais para cortar o material em questão.

3.3. Torneamento Mecânico

O torneamento é um processo de maquinação para a geração de peças cilíndricas. Normalmente, a peça de trabalho é girada num eixo central e a ferramenta é inserida radialmente, axialmente ou nos dois sentidos simultaneamente para fornecer a geometria necessária. O termo torneamento, no sentido geral, refere-se à criação de qualquer superfície cilíndrica com uma ferramenta de ponto único.

Equipamento

Na Figura 30 é exposto um esquema de um torno mecânico, sendo composto pelos seguintes componentes [54]:

1. Base – base ou cama do torno mecânico é simplesmente uma base grande que fica no chão ou numa mesa e que suporta os outros componentes da máquina.
2. Conjunto redutor - secção frontal da máquina conectada à base. Este conjunto contém o motor e o sistema de acionamento que alimentam o eixo.
3. Conjunto do cabeçote móvel - secção traseira da máquina conectada à base. O objetivo deste componente é apoiar a outra extremidade da peça quando esta é mais longa, de forma a não haver tantas vibrações. Em algumas operações de torneamento a peça não pode ser suportada pelo cabeçote móvel de forma a ser possível executar os seus acabamentos ou ainda fazer furos, quando necessário.
4. Carro longitudinal - plataforma que desliza ao lado da peça de trabalho, permitindo que a ferramenta de corte remova o material à medida que se move. O carro longitudinal desloca-se sobre calhas que estão sobre a base, e move-se por ação de um veio roscado acionado por um motor ou manualmente no volante.
5. Carro transversal – o carro transversal está preso na parte superior do carro longitudinal e permite que a ferramenta se mova em direção à peça ou se afaste desta, alterando a profundidade de corte. Tal como acontece com o carro longitudinal, o carro transversal é alimentado por um motor ou volante.
6. Porta ferramentas - é fixado na parte superior do carro transversal e suporta a ferramenta de corte. O porta ferramentas pode girar 360°, para alterar o ângulo da ferramenta de corte em relação à peça de trabalho. Embora a maioria das ferramentas de corte sejam estacionárias, também é possível usar ferramentas ativas tais como ferramentas elétricas.

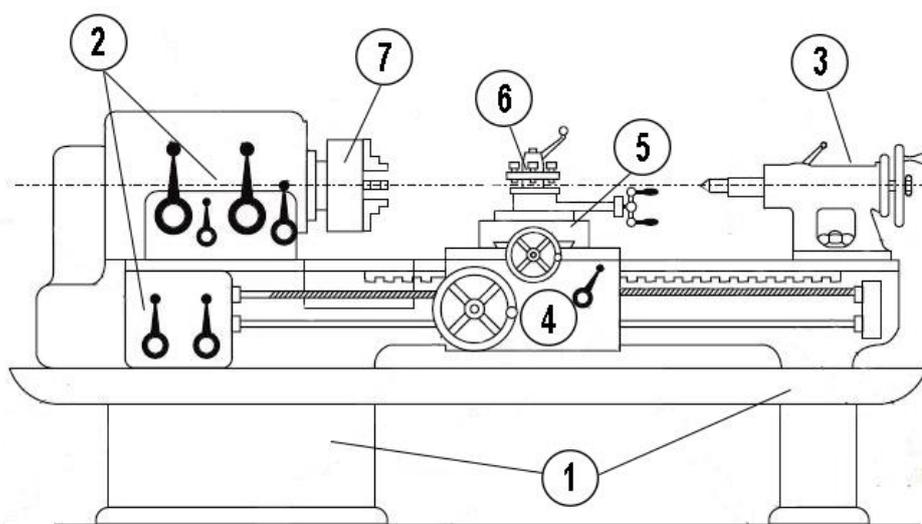


Figura 30 - Ilustração de um torno mecânico e constituintes [54].

Processo

O processo de maquinação realizado por um torno mecânico é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial [55]:

1. **Configuração:** Preparação do torno mecânico, planeamento dos movimentos e velocidades das ferramentas (executados manualmente ou semiautomaticamente) e instalação do dispositivo de fixação na máquina.
2. **Colocação da peça de trabalho:** posicionamento da peça de trabalho no torno e fixação desta ao dispositivo de fixação central.
3. **Corte:** execução de todas as operações de remoção de material como furos, roscas e desbaste, entre outras operações, até à obtenção de uma peça semiacabada.
4. **Acabamento:** realização de tarefas de acabamento como polimento, lixagem ou remoção de pequenas aparas de metal resultantes das operações anteriores.

3.4. Impressão 3D

A impressão 3D é um processo aditivo que utiliza software de CAD ou scanners 3D para criar um objeto através da colocação de material, camada após camada, executando as formas geométricas pretendidas.

Para muitas aplicações, os processos subtrativos impõem uma série de restrições, incluindo as ferramentas dispendiosas, acessórios e a necessidade de montagem de peças complexas. Além disso, os processos de fabricação subtrativos, como a maquinação, podem resultar no desperdício de até 90% do bloco original de material.

Existem várias tecnologias de impressão 3D, sendo que as principais diferenças entre os diversos processos aditivos estão na maneira de colocação das camadas para criar peças e nos materiais usados [56].

Existem muitos processos de impressão 3D diferentes, que podem ser agrupados em sete categorias [57]:

- Modelação por deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM);
- Estereolitografia (*Stereolithography* - SLA);
- Processamento de Luz Direta (*Digital Light Processing* - DLP);
- Sinterização Seletiva Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS);
- Sinterização Direta Laser de Metal (*Direct Metal Laser Sintering* - DMLS)
- Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting* - SLM);
- Feixe de eletrões (*Electron Beam Melting* - EBM);
- Fabricação de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing* - LOM);

3.4.1. Modelação por deposição de material fundido (FDM)

Também normalmente referida como impressão 3D, é um dos processos de fabricação aditiva amplamente utilizados para fabricar protótipos e peças funcionais em plásticos de engenharia comuns. O processo é baseado na extrusão de filamentos termoplásticos, sendo estes aquecidos através de uma extrusora e, através de um bico, depositados em camadas numa plataforma para construir peças, camada por camada, a partir de um modelo digital da peça. A simplicidade, confiabilidade e acessibilidade do processo FDM tornaram a tecnologia de fabricação aditiva amplamente reconhecida e adotada pela indústria, pelo meio académico e pelos consumidores. O processo FDM também tem sido amplamente utilizado no setor de investigação para melhorar o próprio processo, desenvolver novos materiais e aplicar os sistemas FDM numa ampla gama de aplicações de engenharia [57].

Materiais

Existem vários tipos de materiais usados em impressão 3D. Os mais comuns são os plásticos, como ABS ou PLA, sendo este último bastante utilizado nesta tecnologia. A resina, outro material comum, é usado em impressoras SLA. Os compósitos são outra categoria e, como o nome indica, são criados combinando dois materiais para obter as melhores propriedades de cada um. O último grande grupo de materiais são os metais. Estes são imprimíveis apenas usando máquinas industriais [56].

Equipamento

Na Figura 31 é exposto um esquema de uma impressora 3D, sendo composta pelos seguintes componentes [58]:

1. Cama – cama ou base de impressão é a superfície na qual os objetos são impressos. Esta cama é constituída por uma superfície de aquecimento e uma placa removível, sendo esta normalmente um vidro.
2. Extrusora – também designada por cabeça de impressão, é um componente importante da impressora pois derrete o filamento para criar o modelo 3D. É separado em duas secções: extremidade fria e a extremidade quente. Simplificando, a extremidade fria alimenta o filamento até a extremidade quente, enquanto a extremidade quente, que termina com um bico extrusor, derrete o filamento e deposita-o na cama.
3. Sistema de alimentação de filamento - controla o fluxo de filamento necessário para a impressão.
4. Motor eixo z.
5. Motor eixo y.
6. Motor eixo x.
7. Controlador - também conhecido como placa-mãe, é o cérebro da impressora 3D. É o responsável pelas operações de dosagem de filamento e controlo de movimentos, temperaturas e ventoinhas, sendo que todas estas operações são comandadas através de código G.

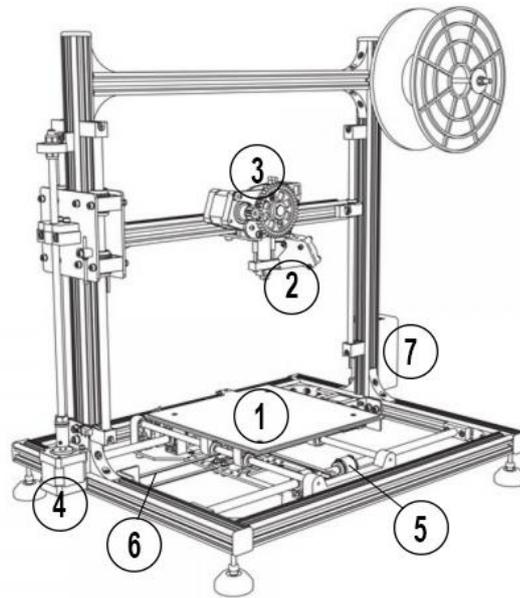


Figura 31 - Representação de impressora 3D [59].

Processo

O processo de impressão 3D é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial [60]:

1. **Programação:** configuração dos parâmetros no programa de impressão tais como velocidade de impressão, temperaturas da cama e da extrusora, preenchimento e espessura de paredes, entre outros.
2. **Preparação:** colocação do rolo de filamento termoplástico na impressora e pré-aquecimento da cama e da extrusora até às temperaturas definidas.
3. **Execução:** Inicialização do programa, a partir do qual a extrusora irá depositar na cama o filamento derretido em finas camadas até alcançarmos a peça pretendida.

3.5. Soldadura

A soldadura é um processo de fabricação que visa a união localizada de materiais, geralmente metais ou termoplásticos, de forma permanente, sendo que, por norma, aplica-se calor na união para proceder a soldadura [61].

A soldadura é um processo amplamente usado na indústria em geral e que serve para a fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas metálicas. A sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos (pontes, navios, carros, etc.). Embora geralmente seja um processo realizado em meio industrial, a soldadura pode ser realizada em muitos ambientes diferentes, ao ar livre, debaixo de água e no espaço [62].

Existem diversas fontes de energia para realizar soldadura como arco elétrico, termoquímico, resistência, laser, feixe de elétrons, fricção e ultrassom [63]. Apenas será aprofundada a soldadura por arco elétrico visto ter sido a única utilizada no processo de realização deste robô.

3.5.1. Arco elétrico

A soldadura por arco elétrico é um processo usado para unir metal com metal, utilizando eletricidade para criar calor suficiente para derreter o metal que, quando arrefece, resulta na ligação de ambos os metais. Este tipo de soldadura utiliza uma fonte de alimentação para criar um arco elétrico entre o eletrodo e o material para derreter no ponto de contato. Neste processo pode-se usar corrente contínua (CC) ou alternada (CA) e eletrodos consumíveis ou não consumíveis[62].

3.5.1.1. Soldadura MIG (Metal Inert Gas)

A soldadura MIG (*Metal Inert Gas*) é um processo de junção de metais no qual um arco elétrico se forma entre o fio consumível e a peça de trabalho, estes são aquecidos e unidos. Este processo pode usar gases inertes ou ativos, como gás de proteção para a soldadura [63], ou não recorrer a utilização de nenhum gás [64].

Modos de transferência

Na Figura 32 é apresentada a classificação de vários modos de transferência na soldadura MIG [65]:

1. No método de transferência por curto-circuito, o fio consumível é alimentado a uma velocidade superior à da taxa de fusão. Isto cria uma pequena poça de metal que rapidamente solidifica, sendo algumas vezes também chamado de "*fast freezing*".
2. No método globular, o fio é aquecido por mais tempo criando de gotas com um diâmetro superior ao do fio consumível, sendo que a taxa transferência é pequena e irregular. Este método apenas pode ser utilizado em soldaduras planas e na horizontal.
3. No método de transferência "spray", pequenas gotas de metal fundido são pulverizadas na junta de solda. Esse método utiliza alta entrega térmica de calor e uma grande taxa de depósito de material, correndo assim o risco de queimar materiais mais finos e podendo apenas ser utilizado na posição horizontal.
4. A transferência pulsada permite uma variação da transferência por "spray", mais estável e uniforme, e que pode ser utilizada também em outras posições, para além da horizontal. Essa variação foi planeada para permitir que se obtenha uma transferência semelhante à tipo "spray" para baixos valores de corrente. Consegue-se este método de transferência com a alternância dos valores alto e baixo da corrente, sob uma frequência determinada.

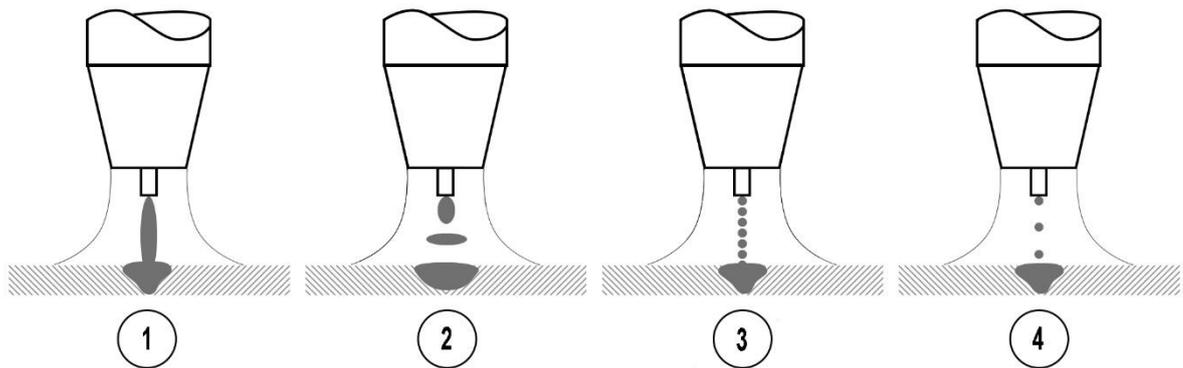


Figura 32 - Classificação dos modos de transferência [66].

Equipamento

Na Figura 33 é exposto um esquema de uma máquina de soldadura MIG, composta pelos seguintes componentes [64], [66]:

1. Fonte - de corrente contínua, caracteriza-se por uma elevada estabilidade porque se baseia no facto que o arco elétrico criado ser alimentado a tensão e corrente constantes e gerado sobre um fio consumível, que é adicionado em velocidade constante, e isto, tender a estabilizar-se naturalmente. Os parâmetros da tensão e da velocidade do fio podem ser parametrizados com uma certa tolerância devido à flexibilidade do processo.
2. Pistola de soldadura - transfere o metal de adição para a área de soldadura, tem o corpo isolado e, para além disso, permite a passagem do fio consumível, do gás e da corrente para a criação do arco elétrico.
3. Alimentador de fio - aparelho acionado por um motor cuja função é a de alimentar o fio consumível, para efetuar a soldadura. A escolha do valor da velocidade de avanço do fio é efetuada no dispositivo. Em bastantes equipamentos o alimentador encontra-se integrado no equipamento.
4. Cilindro de gás com sistema de regulação – pode conter gás de proteção ou misturas gasosas e é equipado com um manómetro e um redutor de pressão, utilizado para indicar a quantidade de gás no interior do cilindro, assim como uma electroválvula, comandada por um botão situado na pistola, que abre e fecha o fluxo de gás.
5. Pinça com cabo de massa - permite a ligação elétrica entre a fonte e o material para soldar. O cabo deve ter uma secção e um comprimento em função da corrente máxima da fonte do equipamento.

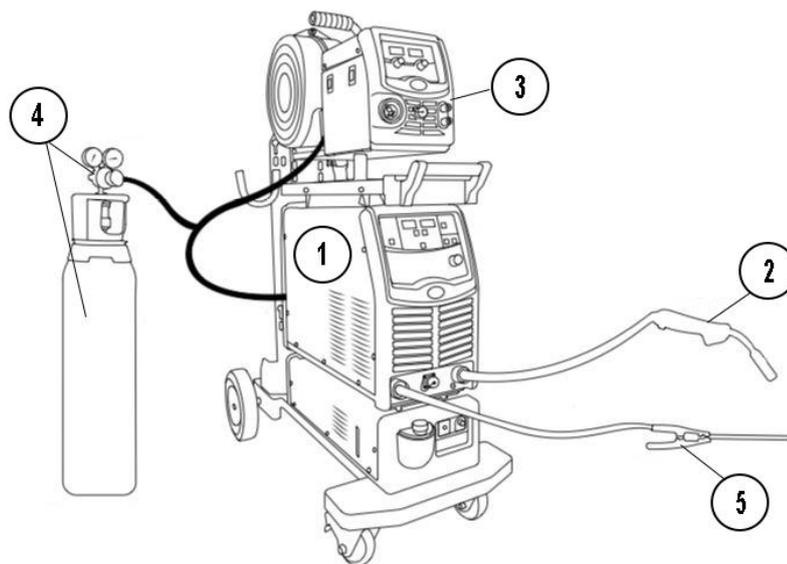


Figura 33 - Esquema de máquina de soldadura MIG.

Processo

O processo de soldadura MIG exposto na Figura 34 é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial [68]:

Preparação: Realização da limpeza da peça de trabalho, configuração de todos parâmetros do equipamento e ativação do sistema de gás.

Execução: Premir o gatilho da pistola de solda e realizar a soldadura.

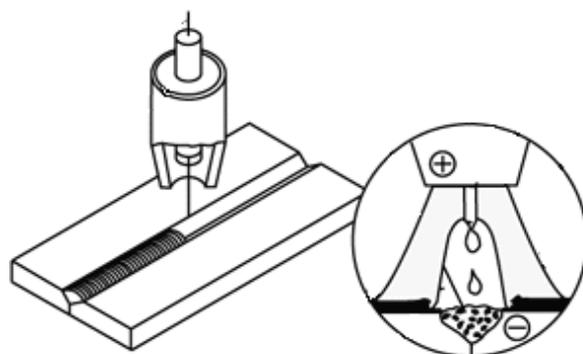


Figura 34 - Ilustração do processo de soldadura MIG [68].

3.5.1.2. Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas)

A soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo de soldadura que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível para produzir a solda. A área de solda e o eletrodo são protegidos contra oxidação ou outra contaminação atmosférica por um gás inerte de proteção (árgon ou hélio) e, normalmente, é usado um metal de adição, embora algumas soldas, conhecidas como soldas autógenas, não o exijam [63].

Configurações da soldadura

Na Tabela 2 encontram-se descritos os diferentes tipos de processos da soldadura TIG [69].

Tabela 2 - Tipos de processo de soldadura TIG [69].

Tipo de corrente	Continua		Alternada
	Direta CC-	Inversa CC+	CA
Caraterísticas			
Objetivo	Soldaduras de penetração profunda sem afetar o eletrodo	Soldaduras superficiais e limpeza do óxido superficial	Preservação do eletrodo e limpeza do óxido a cada meio ciclo
Aplicação	Em aços carbono macio/duro, inoxidáveis, cobre e prata	Viável apenas para pequenas espessuras	Alumínio, magnésio e ligas resultantes destes materiais
Balanço de calor no arco elétrico (aprox.)	70% na peça 30% no eletrodo	30% na peça 70% no eletrodo	50% na peça 50% no eletrodo

Elérodos de Tungsténio

Os eléctrodos de soldadura TIG são não consumíveis, pois não são derretidos durante o processo, e deve-se ter cuidado para não deixar que o eletrodo entre em contato com a soldadura, de forma a evitar contaminação da mesma. Inclusão de tungsténio é o nome dado podendo resultar numa falha na soldadura. Na Tabela 3 são apresentados os diversos eléctrodos disponíveis, constituição e em que situação poderão ser utilizados.

Tabela 3 - Tipos de eléctrodos de tungsténio [70].

Tipos de eléctrodos	Aplicação
2% Cério	Pode ser utilizado em soldaduras em CC como CA, mas apenas para correntes baixas usado em soldadura de chapas finas e pequenos reparos
1.5-2% Lantânio	Ideal para soldar com correntes baixas podendo utilizar CC e CA. Excelente performance de soldadura, durabilidade, fácil ignição e boa estabilidade de arco. Ideal para soldar alumínio, magnésio e ligas resultantes
2% Tório	Comummente usado em CC, sendo que uso em CA não é recomendado. Suportam elevados valores de corrente, sendo indicados para soldadura de aços.
Tungsténio puro	Utilizado em intensidades reduzidas de corrente e em CA porque resulta num arco mais estável.

Equipamento

Na Figura 35 é exposto um esquema de uma máquina de soldadura TIG, composta pelos seguintes componentes [70], [71]:

1. Fonte - TIG funcionam a corrente constante (tensão variável). Produz uma corrente relativamente constante com uma mudança limitada na tensão de carga
2. Tocha de soldadura - dispositivo que engloba o eléctrodo e que está conectada por cabos à fonte, os quais têm a tarefa de alimentá-la e de transportar o gás de proteção. Em função do tipo de uso pode haver tochas com arrefecimento natural, por meio do gás protetor, se as correntes forem de baixa intensidade, e tochas com arrefecimento a água, quando forem exigidas correntes elevadas (200 - 500 A) e soldaduras de longa duração.
3. Cilindro de gás com circuito de pressão – pode conter gás de proteção ou misturas gasosas e é equipado com um manómetro e um redutor de pressão, utilizado para indicar a quantidade de gás no interior do cilindro, assim como uma electroválvula, comandada por um botão situado na pistola, que abre e fecha o fluxo de gás.
4. Pinça com cabo de massa - permite a ligação eléctrica entre a fonte e o material para soldar. O cabo deve ter uma secção e um comprimento em função da corrente máxima da fonte do equipamento.
5. Pedal - dispositivo opcional que tem como objetivo controlar a corrente, rampas de início e fim, entre outros, dependendo da complexidade do equipamento. Este dispositivo dá maior controlo da soldadura ao operador enquanto a executa.

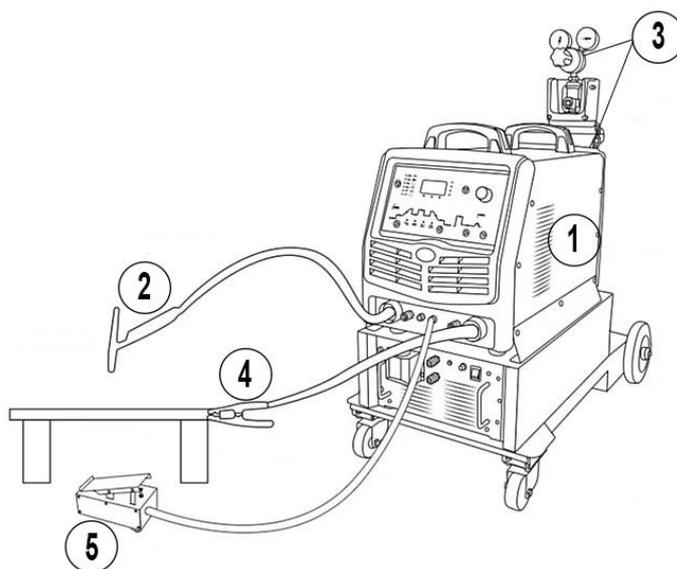


Figura 35 - Equipamento de soldadura TIG [71].

Processo

O processo de soldadura TIG exposto na Figura 36 é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial [68]:

1. **Preparação:** Este tipo de soldadura requer mais preparação prévia do que outros métodos, como limpeza da peça de trabalho, seleção e preparação do eletrodo conforme a soldadura a realizar e configuração de todos parâmetros do equipamento como rampas, tipo de corrente e potência.
2. **Execução:** Seleção do modo de abertura do arco elétrico, aquecimento da zona de início da soldadura até à temperatura desejada e adição de material, se necessário.

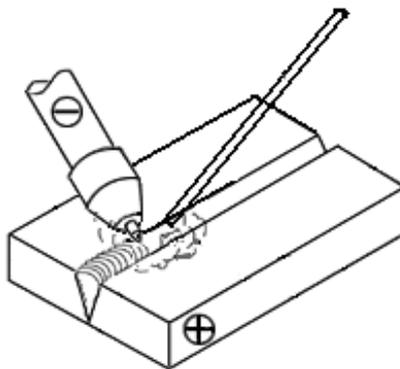


Figura 36 - Representação do processo de soldadura TIG [72].

3.6. Compósitos

Nos compósitos, o material de reforço é geralmente uma fibra, como fibra de carbono, vidro ou kevlar, e é o principal responsável por adicionar rigidez ao conjunto. A matriz é uma resina, como por exemplo a epóxi, que adiciona estrutura ao material compósito, preenchendo os intervalos entre os materiais de reforço, mantendo-os nas suas posições relativas e proporcionando resistência à compressão [73].

A vantagem dos materiais compósitos é que, geralmente, possuem melhores qualidades do que os seus constituintes isolados. Algumas propriedades podem ser melhoradas, nomeadamente: rigidez, resistência a corrosão, resistência ao desgaste, peso, durabilidade, isolamento térmico, condutibilidade térmica, isolamento acústico.

3.6.1. Fibras

A fibra de vidro (ver Figura 37) é usada extensivamente como uma fibra de reforço para resinas, como epóxi e poliéster insaturado. A rigidez da fibra de vidro é menor que a de outras fibras de reforço, mas possui a vantagem distinta de combinar uma resistência muito alta com uma baixa densidade e, acima de tudo, um custo bastante razoável [74].



Figura 37 - Exemplos de tipologias de fibra de vidro [75].

A fibra de carbono é um material muito forte e bastante leve. Muitos tipos desta fibra (ver Figura 38) possuem uma resistência à tração até cerca de 5 GPa, o que a torna quase cinco vezes mais forte que o aço. A principal vantagem das fibras de carbono em comparação com outras fibras são a alta resistência à tração, alta rigidez, baixa densidade e alta resistência química [76].



Figura 38 - Exemplos de tipologias de fibra de carbono [77].

O Kevlar, conforme apresentado na Figura 39, é uma fibra sintética de aramida, muito resistente e leve. Trata-se de um polímero resistente ao calor e cinco vezes mais resistente que o aço por unidade de peso. O Kevlar é usado na fabricação de cintos de segurança, cordas, construções aeronáuticas, velas, coletes à prova de bala entre muitas outras [78].



Figura 39 - Exemplo de fibra de kevlar [79].

3.6.2. Resinas

Vários tipos de resina são utilizados na fabricação de compósitos. Todas essas resinas são termoendurecíveis, mas diferem na sua composição química. As resinas mais usadas na indústria são poliéster, viniléster e epóxi [80].

As resinas de poliéster são as mais simples e econômicas, são fáceis de preparar e apresentam um bom desempenho. Normalmente, juntamente com reforços de fibra de vidro, as resinas de poliéster adaptam-se bem a uma variedade de processos. As propriedades das fórmulas da resina podem ser modificadas para atender a critérios de desempenho específicos, por exemplo, o estireno pode ser adicionado para reduzir a viscosidade, facilitando o processamento da resina.

Um grande benefício das resinas epóxi em relação às resinas de poliéster não saturadas é o menor encolhimento. As resinas epóxi também podem ser formuladas com diferentes materiais ou misturadas com outras resinas epóxi para obter características específicas de desempenho. Os epóxios são usados principalmente para a fabricação de compósitos de alto desempenho com propriedades mecânicas superiores, resistência a líquidos e ambientes corrosivos, bom desempenho a temperaturas elevadas ou uma combinação desses benefícios. As resinas epóxi não têm, no entanto, uma resistência UV particularmente boa.

Resinas viniléster são resinas termoendurecíveis que incorporam e baseiam-se nas excelentes propriedades físicas da resina epóxi. As suas aplicações são semelhantes à da resina poliéster, principalmente quando é necessário um desempenho superior.

Processo

O processo de fabricação de compósitos exposto na Figura 40 é composto pelas seguintes tarefas realizadas de forma sequencial [74]:

1. **Preparação:** Corte de todas as peças de fibra necessárias para a construção do objeto, preparação da resina seguindo as diretrizes indicadas em termos de quantidades de resina e catalisador a usar e preparação dos equipamentos e saco para fazer vácuo. Esta é a fase mais importante pois, se alguma coisa estiver errada, será muito difícil de recuperar.
2. **Execução:** Colocação do tecido no molde e, de seguida, da resina e compactação de tudo com um rolo de aplicação. Para se otimizar o processo de cura, coloca-se tudo num saco de vácuo e leva-se a um forno.
3. **Finalização:** Remoção de todos os equipamentos de vácuo antes da cura total da resina, caso contrário tornar-se-á um processo muito mais complicado.

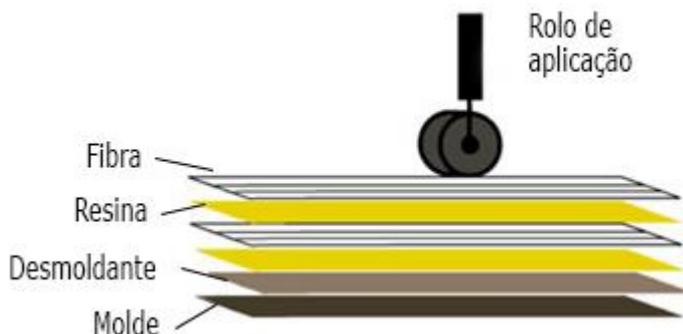


Figura 40 - Exemplo de fabricação de compósito.

3.7. Nota Conclusiva

Ao longo deste capítulo foram apresentadas todas as tecnologias, técnicas e materiais utilizados na construção e dimensionamento da plataforma robótica.

O desenvolvimento iniciou-se pela modelação 3D, dando esta origem ao modelo do protótipo. Passando para as tecnologias associadas à construção, começou-se pela fabricação subtrativa, como a maquinação CNC, o corte por jato de água e o torneamento mecânico e recorreu-se também a fabricação aditiva, para a criação de suportes. Detalharam-se ainda os processos de soldadura, sendo necessário utilizar soldadura MIG e TIG por causa dos materiais utilizados na construção, aço e alumínio, respetivamente. Por fim, abordaram-se alguns dos compósitos existentes de forma a seleccionar qual o melhor a aplicar na construção da caixa de protecção das baterias e controlo.

4. Protótipo

O objetivo do desenvolvimento deste robô consiste em elaborar um sistema capaz de executar funções de recolha dos frutos caídos e, em outro momento da campanha, de pulverização de precisão para o controlo de infestantes. Para tal, após toda a pesquisa e investigação, foi desenvolvido o protótipo experimental do robô, sendo que este capítulo vem descrever todo o processo e está dividido em três partes: dimensionamento, desenho e construção. Na primeira parte, dimensionam-se todos os componentes e características mais importantes do robô e justificam-se as decisões tomadas ao longo do seu desenvolvimento. Após a primeira fase, passa-se para a elaboração do desenho CAD do robô. Nesta segunda parte, analisam-se dimensões e interseções e adicionam-se todos os componentes previamente dimensionados, obtendo assim uma primeira visão do produto final. É ainda nesta fase que são retirados todos os desenhos técnicos necessários para a construção do robô. A terceira parte deste capítulo detalha a construção, passo a passo, todos os obstáculos encontrados durante o desenvolvimento e a forma encontrada para os solucionar.

4.1. Formulação concetual

Esta seção apresenta a evolução da formulação concetual do robô e as variações iterações de projetos até ser atingida a configuração final. Toda a formulação concetual assentou num conjunto de requisitos que se configuram como as condições iniciais de projeto:

1. Robô para recolha dos frutos caídos no chão do pomar, auxiliado por um drone que iria realizar pulverização de precisão de herbicida.
2. Altura máxima do robô: 50 cm, para que lhe seja possível passar por baixo das copas das árvores sem danificar ramos e frutos.
3. Carga útil: ± 2 kg caixa da fruta + 50 pêssegos ≈ 170 g/cada $\rightarrow 8,5$ kg.
4. Comprimento e largura não definidos, mas a premissa inicial era a criação de um robô de pequenas dimensões, ágil e bastante manobrável, facilitando assim a deslocação entre árvores.

A escolha desta configuração teve como principal objetivo o desenvolvimento de um robô pequeno e ágil. O sistema de recolha dos pêssegos seria bastante simples, recorrendo apenas a um mecanismo que conseguisse recolher e transportar os frutos até a caixa de carga. Este sistema foi pensado para que o robô pudesse executar uma rápida recolha dos frutos.

Os problemas desta configuração encontram-se na altura ao chão do robô e no sistema de torção da correia. A altura ao chão do robô seria uma dificuldade no momento de transpor obstáculos, como por exemplo pedras ou até mesmo ramos caídos. Quanto ao sistema de torção da correia, que serviria para alterar o ângulo dos pinos de recolha e transporte, seria muito complexo de

desenvolver de maneira fiável e com baixo nível de manutenção. Na Figura 41 pode-se observar o primeiro esboço do robô.

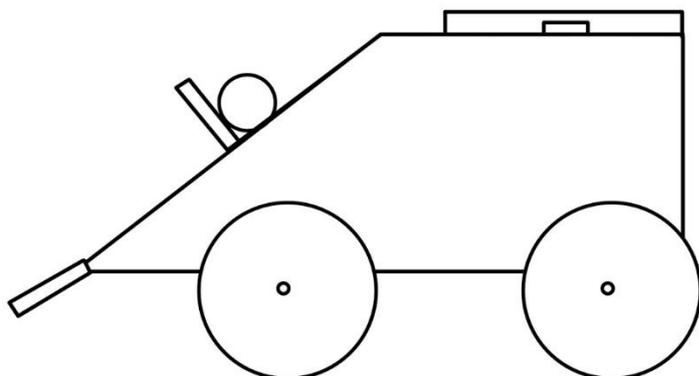


Figura 41 - Primeiro esboço do robô.

Numa segunda abordagem exposta na Figura 42, o sistema de recolha dos frutos seria semelhante ao da primeira ideia, aumentando a altura do robô ao chão de forma a conseguir ultrapassar obstáculos mais facilmente. A estrutura seria em perfil de alumínio 45x45, por forma a ser possível obter uma estrutura fácil de contruir, leve e resistente.

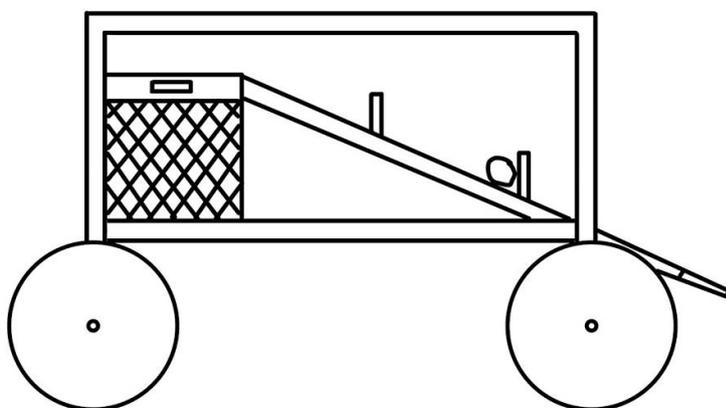


Figura 42 - Segundo esboço do robô.

Neste ponto, houve uma alteração das condições iniciais, com a introdução da pulverização de precisão no robô, bem como a possibilidade de este servir com plataforma de auxílio ao drone, enquanto executaria as suas funções.

No terceiro modelo exposto na Figura 43 manteve-se a estrutura, visto esta ter diversas vantagens (peso, flexibilidade de montagem, resistência), tendo-se verificado que apenas o sistema de recolha não era o mais adequado e, por isso, abrindo-se a possibilidade da introdução de um robô delta. O problema desta opção é não existirem robôs deltas com amplitude suficiente para dimensões tão reduzidas.

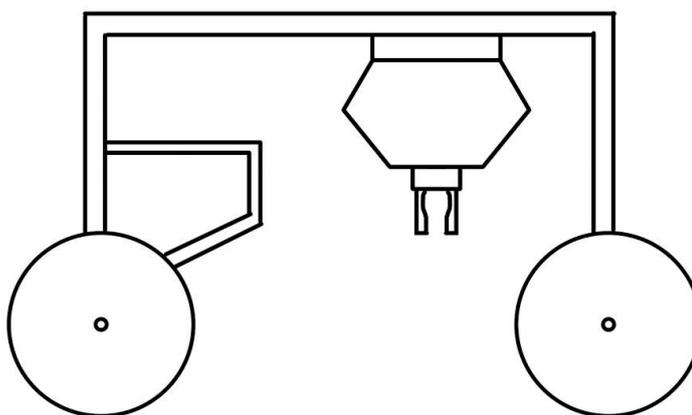


Figura 43 - Terceiro esboço do robô.

No quarto modelo alterou-se o sistema de recolha por um robô cartesiano instalado na frente do protótipo, com uma pequena garra de 2 dedos em forma de forquilha, a qual pega nos frutos, transporta-os até à altura máxima do eixo e roda a garra para trás, colocando-os num tapete rolante ou rampa que os leva até a caixa. Este modelo recorre a outro eixo linear para conseguir deslocar o mecanismo de posicionamento da garra para fora da estrutura do robô, possibilitando assim que execute funções junto aos troncos das árvores. A Figura 44 exemplifica este modelo.

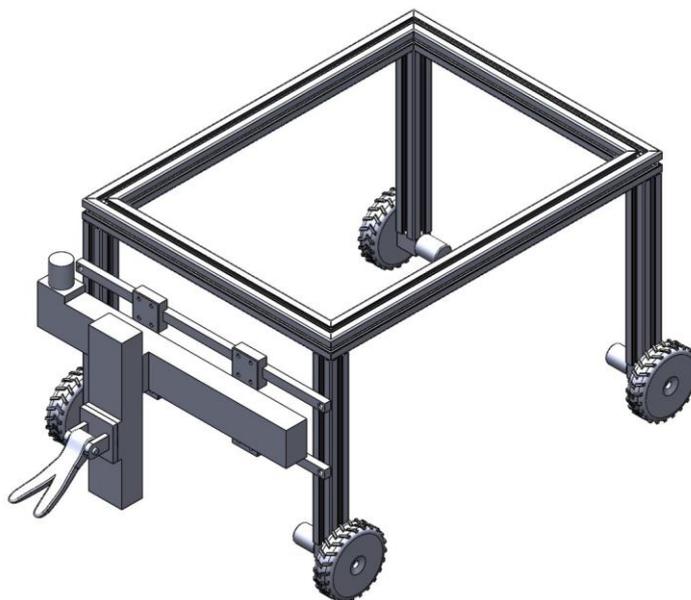


Figura 44 - Quarto esboço do robô.

O quinto modelo exposto na Figura 45 utiliza um sistema cartesiano para a recolha dos frutos, mas aplicado na parte superior do robô. Apesar deste sistema ser muito melhor em termos de recolha e transporte até a caixa, quando analisado mais profundamente, verifica-se que as opções de eixos lineares para o eixo y são bastante dispendiosas e não existem eixos para o eixo z que

cumpram a dimensão e força necessárias. Para além disso, necessita da criação de mecanismos proteção para o eixo x , que não seriam possíveis de realizar, pois iriam limitar o espaço disponível.

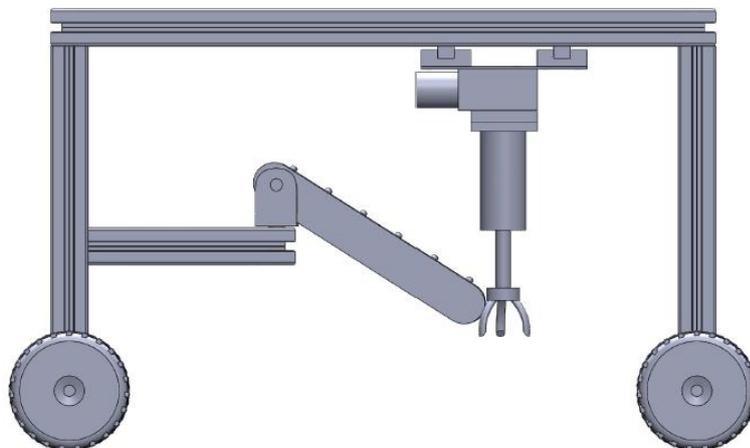


Figura 45 - Quinto esboço do robô.

No modelo final exposto na Figura 46, um sistema cartesiano é aplicado na parte central do robô, de forma a obter uma melhor distribuição de peso, tendo as baterias na frente e, na parte traseira, o sistema de pulverização ou a caixa para recolha dos frutos. A seleção deste sistema de eixos deve-se ao facto de ser a proposta mais economicamente viável.

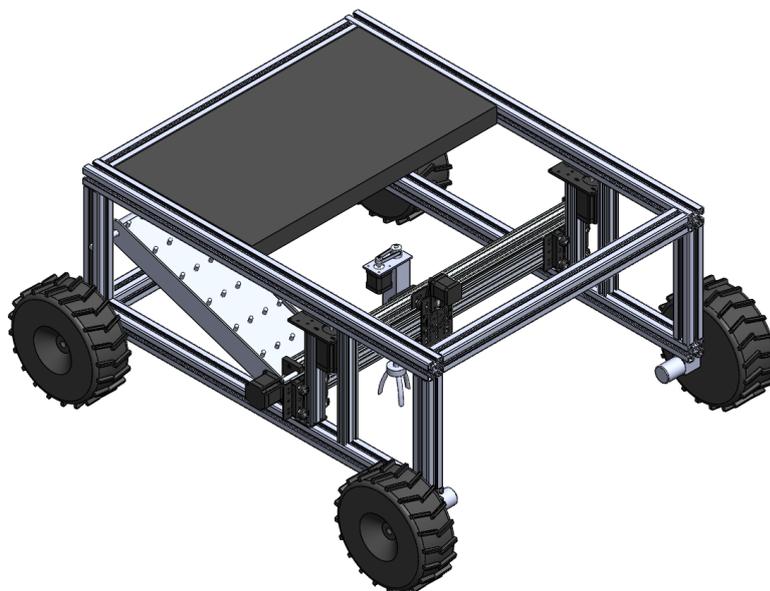


Figura 46 - Esboço final do robô.

4.2. Dimensionamento

4.2.1. Dimensionamento mecânico

Motores e caixas redutoras

Para o dimensionamento dos motores e caixas redutoras, começou-se por definir os dados como a massa do robô (m), a aceleração desejada (a), a inclinação máxima (α) que terá que transpor, o raio das rodas (r) e a aceleração gravitacional, sem do problema ilustrado na Figura 47. A massa do robô foi estimada com base nos robôs analisados no Capítulo 2, tendo em conta as dimensões e o equipamento que utiliza para a realização de tarefas.

Dados iniciais

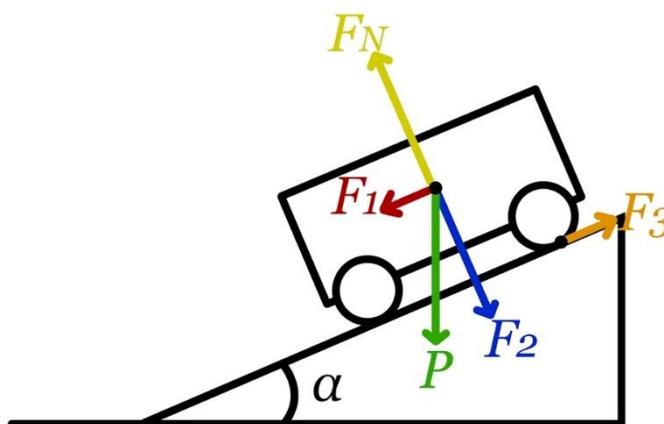


Figura 47 - Imagem ilustrativa do problema

Massa, m : 110 kg

Velocidade, v : 1 m/s

Inclinação máxima, α : 15°

Raio das rodas, r : 0.18 m

Aceleração gravítica, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Primeiramente é calculado o peso através da Equação (1)

$$p = m \times g \quad (1)$$

p - Peso [N]

$$p = 110 \times 9,81$$

$$p = 1079,1 \text{ N}$$

A força F_2 , será anulada pela força normal (F_N)

Sabendo que a força $F_3 \geq F_1$, obtém-se F_1 através da decomposição de forças, dada pela Equação (2)

$$F_1 = P \times \sin \alpha \quad (2)$$

F_1 – Força segundo a direção x [N]

$$F_1 = 1079,1 \times \sin 15^\circ$$

$$F_1 = 279,3 \text{ N}$$

Para calcular o binário mínimo nos motores, recorre-se à Equação (3)

$$T = F_3 \times r \quad (3)$$

T- Binário [Nm]

F_3 - Força tangencial a roda [N]

r – Raio da roda [m]

$$T = 279,3 \cdot 0,18$$

$$T = 50,27 \text{ Nm}$$

Através da Equação (4) é possível determinar a velocidade angular, ω .

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4)$$

ω – Velocidade angular [rad/s]

v – Velocidade [m/s]

O cálculo da potência mínima dos motores de locomoção, é dado pela Equação (5)

$$P = T \times \omega \quad (5)$$

P – Potencia mínima

$$P = (p \times \sin 15^\circ) \times r \times \frac{v}{r}$$

$$P = 279,3 \times 1$$

$$P = 279,3 \text{ W}$$

Para o protótipo foram selecionados 4 motores com um binário combinado de 100 Nm, devido ao facto do mesmo não ter suspensão, necessitando assim de ser dimensionado para o dobro da potência, no caso de acontecer deslocar-se em 2 rodas, tendo assim potência suficiente para se mover.

Foram selecionados 4 motores de passo, NEMA 23 com controlador integrado, conseguindo produzir um binário de 1 Nm, a 600 rpm, com alimentação a 24V. Já para as caixas redutoras, optou-se por uma caixa redutora sem fim com um rácio de redução de 25, ficando assim a saída com 25 Nm. Na Figura 48 pode-se observar o conjunto motor/caixa redutora selecionados.

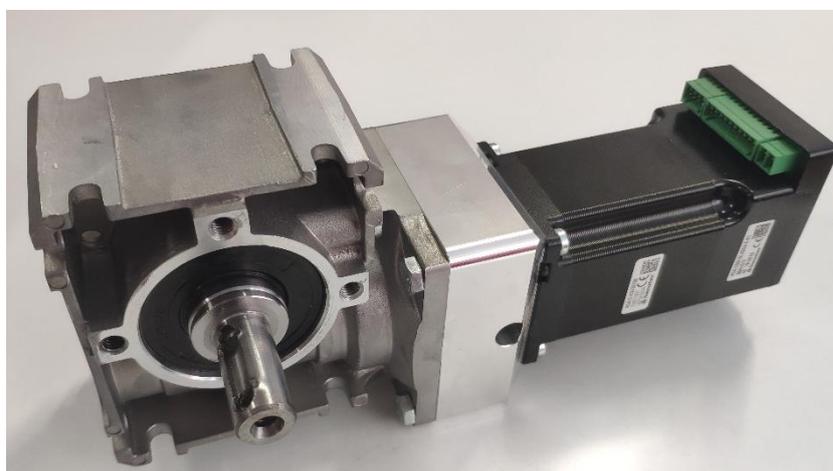


Figura 48 - Conjunto motor/caixa redutora selecionado.

Estrutura

A configuração da estrutura do robô desenvolvida foi pensada de forma a ser capaz de se deslocar sob da copa das árvores. Após a análise de vários robôs no Capítulo 2, concluiu-se que, alguns deles, na sua fase de protótipo, utilizam perfil T-slot de alumínio, sendo que o myce_vigne [82] recorre também a este perfil para a sua versão comercial. O seu uso deve-se ao facto de apresentar uma relação peso/resistência muito boa.

Para a estrutura do robô aqui desenvolvido foi escolhido o perfil T-slot 45x45 mm da Bosch Rexroth. Esta medida foi selecionada para se conseguir ter uma boa base que permitisse uma fácil instalação dos suportes dos motores, visto estes apertarem diretamente na estrutura. Outra vantagem da aplicação deste tipo de perfil é a facilidade que existe na alteração de fixações, bem como na introdução de novos componentes quando necessário.

Na Figura 49 pode-se observar o perfil, em corte, vendo-se assim os quatro rasgos que se encontram nas faces deste e que servem para a colocação de parafusos com cabeça em forma de T ou martelo (duas terminologias utilizadas), possibilitando assim um fácil acoplamento de componentes.

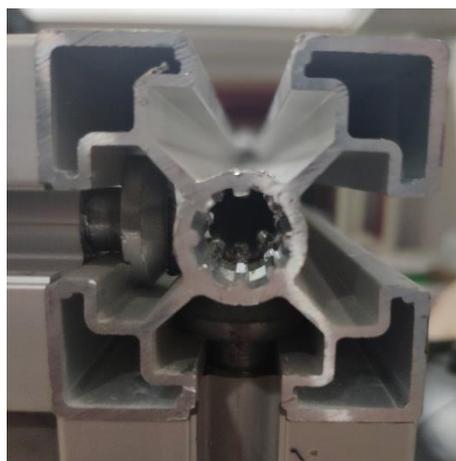


Figura 49 - Detalhe do perfil de alumínio.

Caixa de proteção das baterias e controlo

Este foi um dos componentes mais difíceis de desenvolver pois tinha de ser bastante leve e resistente. Existiam algumas possibilidades para a sua construção, portanto recorreu-se a uma matriz de tomada de decisão de forma a proceder à análise dos diferentes materiais e, assim, escolher o mais adequado. A Tabela 4 avalia quatro parâmetros, classificados de 1 a 5, sendo 1 mau e 5 muito bom.

Tabela 4 – Matriz de tomada de decisão do material de construção da caixa de proteção.

	Material			
	Alumínio	Aço	Fibra de vidro	Plástico
Preço	2	5	4	1
Peso	3	1	5	4
Resistência	4	5	4	4
Dificuldade de construção	3	4	3	1
Total	12	15	16	10

Através da tabela comparativa, chegou-se à conclusão de que o melhor material para a construção da caixa será a fibra de vidro que, apesar do tempo que é necessário despendido para a sua construção, demonstrou ser a opção mais viável.

Para a sua construção, foi necessário dimensionar um molde de forma a criar o inverso da caixa, garantindo assim que esta tenha o melhor acabamento possível. A caixa de proteção é constituída por poliestireno extrudido envolvido por fibra de vidro, criando assim um material tipo “sandwich”, extremamente resistente.

Suportes de motores de locomoção

Para a elaboração dos suportes recorreu-se a barra de alumínio EN-AW 6063 com 80x5 mm. Este suporte foi pensado para envolver o motor e caixa, permitindo fixar o conjunto através de parafusos situados na caixa redutora. Outra das razões para o uso deste tipo de suporte é a sua fácil instalação, necessitando apenas da colocação de três parafusos, diretamente na estrutura.

4.2.2. Dimensionamento elétrico

Baterias

Para o cálculo da autonomia da bateria como valores de referência, foi usada a corrente máxima de cada componente utilizado. O cálculo da potência total do equipamento é dado pela Equação (6).

$$P = V \times I \quad (6)$$

P - Potência [W]

V - Tensão de alimentação [V]

I – Corrente [A]

$$P_{total} = \text{Motores de locomoção} + \text{Eixos Z1} + \text{Eixo Y1} + \text{Bomba} + \text{Arduino} + \text{Rasperry Pi}$$

$$P_{total} = (24 \times 4,2) \times 4 + (12 \times 3) \times 2 + (12 \times 2,8) + (12 \times 0,7) + (5 \times 0,5) + (5 \times 2)$$

$$P_{total} = 529,7 \text{ W}$$

Após determinação da potência do sistema, calcula-se a energia da bateria através da Equação (7).

$$E = V \times I \quad (7)$$

E - Energia [Wh]

I – Carga elétrica [Ah]

$$E = 24 \times 55$$

$$E = 1320 \text{ Wh}$$

Para determinação da autonomia da bateria, basta dividir a energia da bateria pela energia total, conforme exposto na Equação (8).

$$\Delta t = \frac{E}{P_{total}} \quad (8)$$

Δt - Tempo [h]

E - Energia [Wh]

P_{total} – Potência total do circuito [W]

$$\Delta t = \frac{1320}{529,7}$$

$$\Delta t = 2,49 \text{ h}$$

Na Tabela 5 encontram-se avaliados três parâmetros, aos quais será atribuída uma cotação de 1 a 5, sendo 1 mau e 5 muito bom e que servirá para decidir qual o tipo de bateria a usar no robô.

Tabela 5 – Matriz de tomada de decisão das baterias.

	Tipos de bateria		
	Gel	Lítio	Chumbo-acido
Preço	4	1	5
Ciclos	4	5	2
Peso	3	5	2
Total	11	11	9

Analisando a Tabela 5, observa-se que, relativamente às baterias de gel e lítio, os prós e os contras são muito semelhantes. Apesar das baterias de lítio terem melhor desempenho, o que prevaleceu na escolha de baterias gel foi o facto das baterias de lítio custarem mais do dobro para a mesma capacidade. Apesar das baterias de lítio terem metade do peso e conseguirem fazer mais ciclos, a diferença monetária não justificava. Então foram escolhidas 2 baterias gel de 12v 55 Ah, podendo-se observar na Figura 50, a bateria seleccionada.



Figura 50 - Bateria de gel de 12v 55 Ah selecionada.

Controlo

Para o controlo do robô, pensou-se inicialmente em usar uma Pixhawk, devido à possibilidade desta controlar o robô terrestre (rover) e o robô aéreo (drone) em simultâneo. Esta seria uma forma de ter o controlo do drone e do rover na mesma plataforma, sendo que este controlador também dispõe da possibilidade de efetuar navegação autónoma apenas com a marcação de waypoints, o que tornaria toda a programação bastante mais acessível, para além de todos os parâmetros que consegue monitorizar e controlar [83].

A não utilização deste controlador deve-se ao facto de, aquando a aquisição deste produto, haver algum desconhecimento de todas as limitações do mesmo, pois quando se trata de controlar motores de passo este apenas consegue um controlo simples do motor, não possuindo capacidades suficientes para executar navegação autónoma – esta funcionalidade só se encontra disponível com a utilização de servo motores. A razão da sua não utilização deve-se à intenção existente de padronizar os motores a usar. Visto que os eixos lineares já usam motores de passo pensou-se que, em termos de programação, seria útil a escolha de motores iguais.

Após o abandono da ideia do uso da Pixhawk, a outra solução em mente era o uso de microcontroladores. Depois de analisadas as hipóteses disponíveis, optou-se pela utilização de um Arduino mega e um Rasperry Pi 3b+. Estes dois microcontroladores têm funções distintas, sendo que o Arduino controla toda a componente de locomoção e o Rasperry Pi a componente da deteção de frutos e infestantes, bem como o posicionamento dos eixos lineares e da garra e ainda gere o sistema de pulverização.

Sistema de pulverização

O sistema de pulverização escolhido é bastante simples, sendo muito similar ao sistema utilizado num pulverizador elétrico para a aplicação de químicos manualmente. Este é composto por uma pequena bomba de água, um depósito com capacidade para 5 litros, um solenóide e um bico de pulverização. A bomba tem uma tensão de alimentação compreendida entre 6 a 12 V e produz um caudal máximo de 3 L/min, sendo o suficiente para alimentar o sistema.

Dadas as semelhanças entre este sistema e o do pulverizador elétrico, foram adquiridos componentes com características similares para o sistema desenvolvido. No caso do bico de pulverização eram várias as possibilidades, pois cada bico serve para a aplicação de produtos químicos diferentes, e então selecionou-se um bico que permite o controlo da abertura do leque de pulverização. A diferença mais significativa entre os referidos sistemas é a abertura e o fecho do bico de pulverização, pois este é controlado através dum solenóide demonstrado da Figura 51.

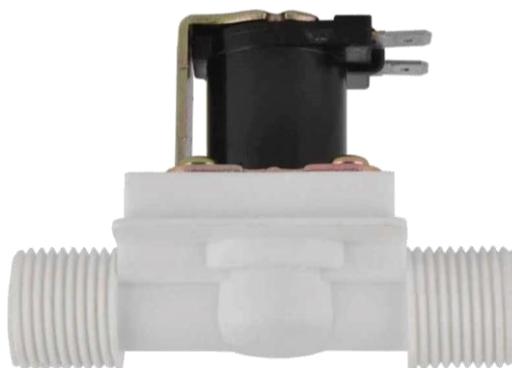


Figura 51 - Válvula Solenóide.

4.3. Desenho

O desenvolvimento do desenho tridimensional (3D) iniciou-se com o objetivo era desenvolver um robô capaz de executar pulverização de precisão e recolha dos pêssegos caídos no chão do pomar, como se pode observar na Figura 52. Esta foi a primeira configuração criada, sendo que os conhecimentos sobre os componentes a usar ainda eram poucos e, para além disso, não havia sido definido o sistema de posicionamento do bico de pulverização e da garra. Contudo, este serviu como ponto de partida para o desenvolvimento do robô.

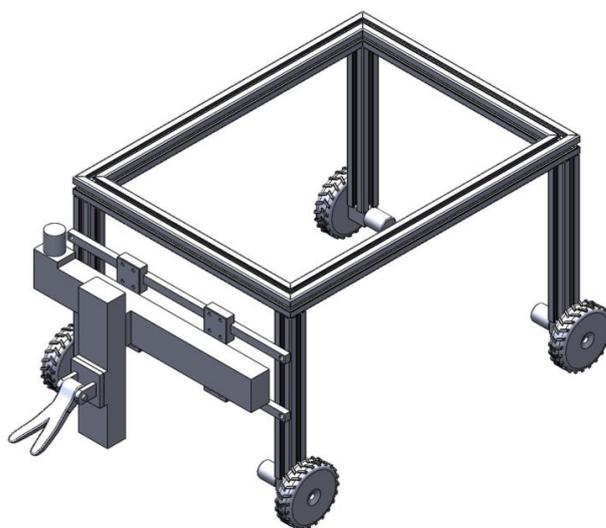


Figura 52 - Primeiro modelo 3D do robô.

Até se atingir um desenho de conjunto completo foram necessárias várias alterações até porque, nestes primeiros desenhos, alguns componentes são apenas representações feitas com o intuito de se ter uma noção de dimensões e distribuição de componentes, assim como para servir de base de pesquisa dos componentes com as características procuradas.

O desenho foi desenvolvido com recurso ao software CAD Solidworks, pois assim foi possível planejar toda a construção antes de ser iniciada, de forma a evitar falhas. A criação do modelo 3D do robô foi bastante útil pois permitiu ter uma ideia concreta do que construir, possibilitou o melhoramento de componentes e a retificação de erros e falhas de projeto. Desta forma, os erros iniciais de projeto puderam ser corrigidos antes de iniciar a construção, evitando assim custos desnecessários. Por outro lado, também permitiu a elaboração de uma lista de material necessário, fazendo com que a construção não fosse interrompida por falta de peças e componentes. Por último, a partir do modelo CAD, foi possível extrair os desenhos técnicos que ajudaram na construção do robô, incluindo os desenhos de todos os componentes fabricados em máquinas CNC, seja o caso do corte por jato de água (por exemplo o corte da maioria das peças de alumínio), Router CNC (o fabrico do molde da caixa de proteção) ou para impressora 3D. Na Figura 53 pode-se observar uma vista geral explodida do robô através de uma imagem criada no programa acima referido.

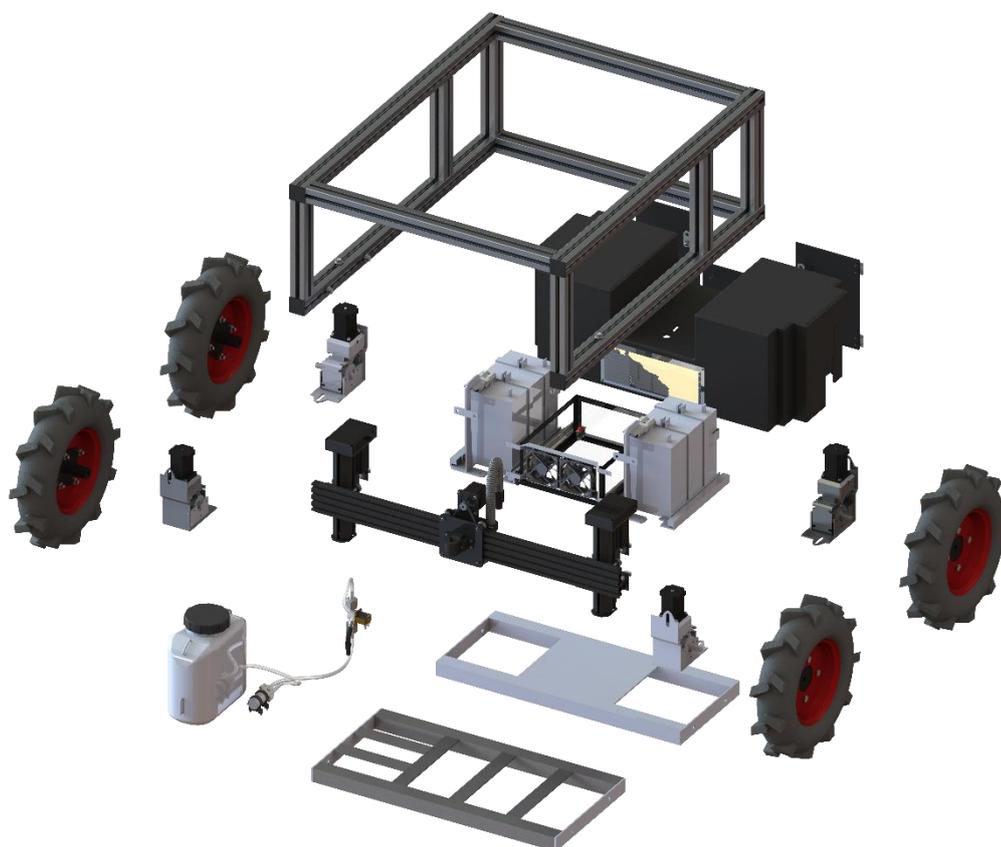


Figura 53 - Vista explodida do robô.

Como expetável, existiu ao longo do desenvolvimento várias alterações a componentes. Por exemplo, quando se começou a elaborar o suporte para o eixo z_1 , pretendia-se um suporte simples e resistente, mas foi desenhado sem grande consideração ao material usado e às forças aplicadas.

Por isso, foi necessário evoluir para uma segunda versão, inserindo uma barra que atravessa o arco de forma a este não fechar. No entanto, quando construído, verificou-se que o reforço não era suficiente e então colocaram-se dois cantos entre o arco e a base do suporte. Na Figura 54 está representado todo o processo evolutivo deste componente.

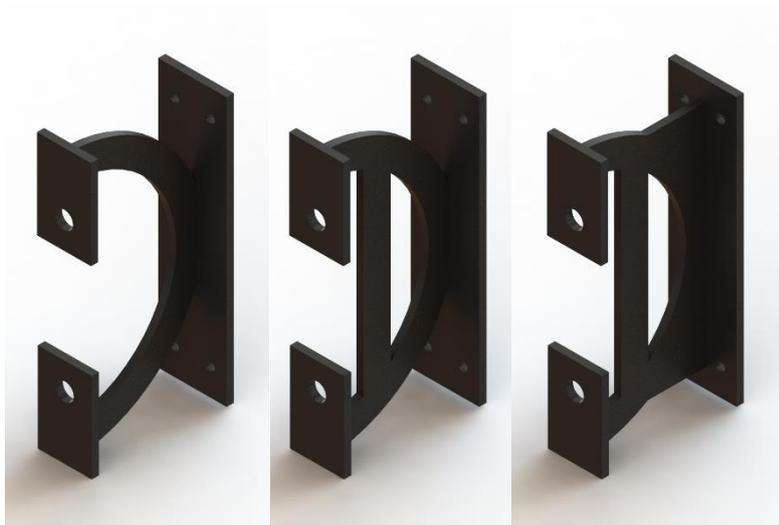


Figura 54 - Processo evolutivo do suporte do eixo z_1 .

O desenho prévio da estrutura, demonstrado na Figura 55, permitiu obter todas as medidas necessárias para realizar a sua construção e, dessa forma, requerer os perfis de alumínio com as dimensões exatas, evitando desperdício de material.



Figura 55 - Estrutura do robô.

O desenho do motor foi o primeiro passo para o desenvolvimento do sistema de locomoção, seguindo-se o desenho do suporte que o fixa à estrutura. Para a produção do suporte, as peças foram cortadas por jato de água, recorrendo aos desenhos CAD do mesmo. Foi necessário desenhar também o sistema de acoplamento da roda ao motor, estando esse conjunto representado na Figura 56.



Figura 56 - Conjunto roda e motor.

Os eixos lineares, expostos na Figura 57, foram desenhados para se ter uma noção do envelope de trabalho, bem como para permitir desenhar os suportes que os fixam à estrutura. Foi necessário elaborar uma placa, que é montada na frente do eixo y_1 , onde será fixado o bico de pulverização e numa fase posterior o eixo z_2 .

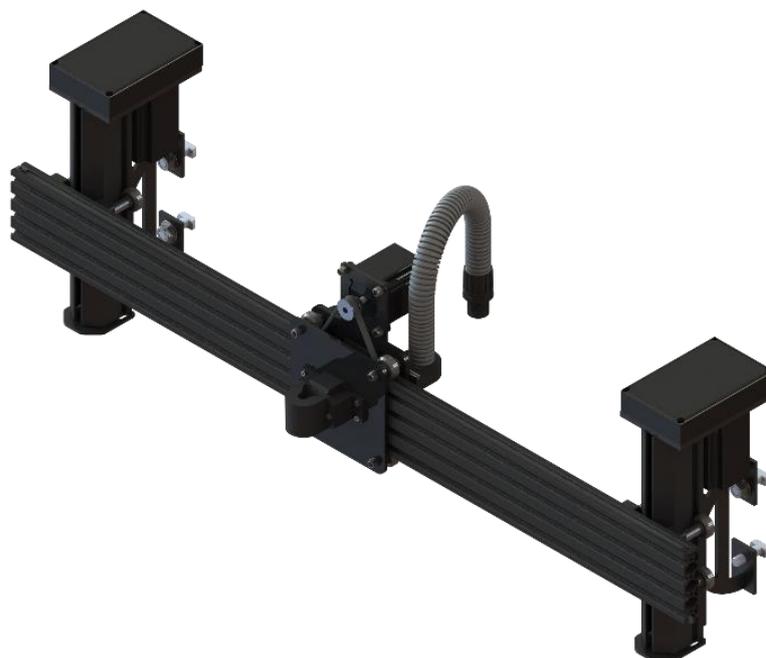


Figura 57 - Sistema de eixos cartesianos.

A caixa de proteção das baterias e controlo, foi um dos componentes que necessitou de mais atenção, pois precisava de encaixar na perfeição na estrutura e, para além disso, os eixos lineares montam-se na parte traseira da caixa e estes têm de ficar paralelos à frente do robô. Daí a necessidade de precisão na sua elaboração. A partir do desenho desta estrutura elaborou-se o molde que serviu para a construção da mesma. Na Figura 58 encontra-se exposta a caixa de proteção completa.

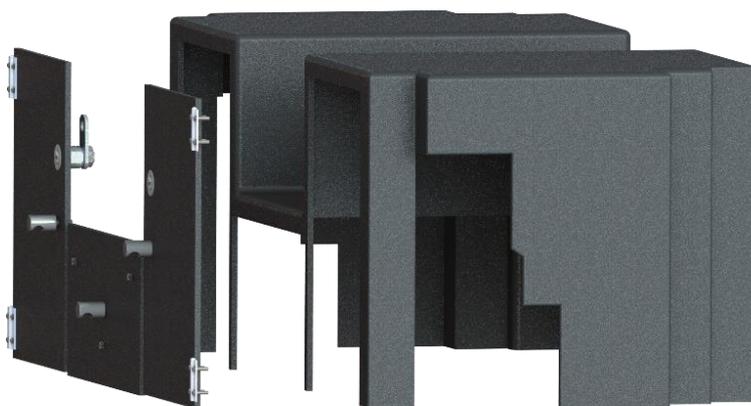


Figura 58 - Caixa de proteção das baterias e sistema de controlo.

O desenho das baterias e da gaveta de controlo permitiu estudar qual a melhor distribuição dos componentes. A gaveta de controlo é um dos elementos principais, pois contém todo o controlo do robô e, portanto, necessita de ser um sítio isolado e ventilado para um bom funcionamento dos componentes eletrónicos. O seu desenho serviu para auxiliar a sua construção e ainda permitiu ver qual a melhor disposição dos componentes dentro dela.

Na fase de projeto tinham-se desenhado suportes para as fichas da bateria, de forma a permitir uma substituição rápida das mesmas. No entanto, aquando da sua construção, verificou-se que a caixa de proteção das baterias, não tinha resistência suficiente para aguentar o suporte apertado nela e então preferiu-se abandonar esta ideia. Na Figura 59 pode-se observar todo o sistema de baterias e a gaveta de controlo.

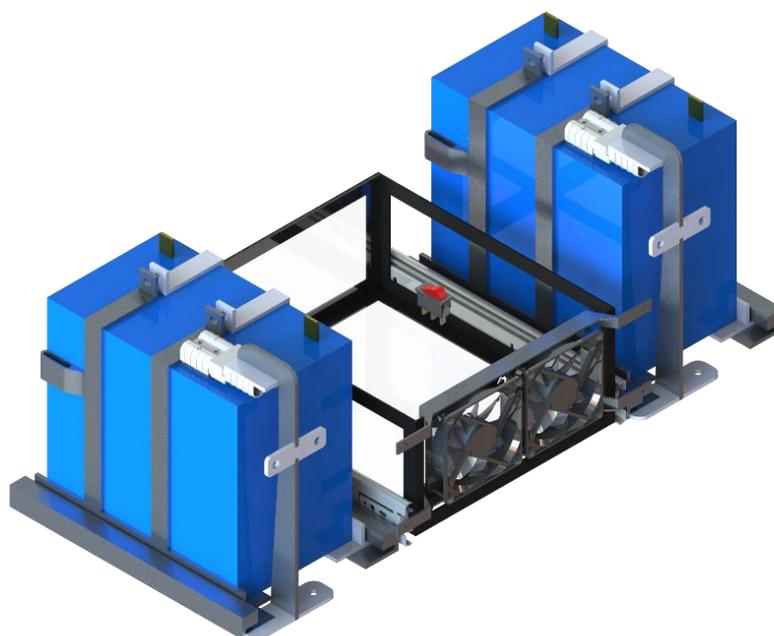


Figura 59 - Baterias e gaveta do sistema de controlo.

4.4. Construção

4.4.1. Estrutura

A construção deste robô iniciou-se pela sua estrutura, feita com recurso a perfil T-slot de alumínio 45x45 mm. Como esta estrutura como foi previamente dimensionada no Solidworks, aquando da aquisição dos perfis, estes foram requeridos já com as medidas necessárias para apenas ser necessário montar toda a estrutura. Para acoplar os perfis recorreu-se a parafusos sextavados interiores M10x30, sendo reforçados com cantoneiras em alumínio fixadas com dois parafusos M10 com cabeça T. Nesta estrutura serão adicionados todos os componentes necessários para a execução do robô.

Após a montagem da estrutura, iniciou-se a execução do molde para a construção da caixa protetora das baterias e do sistema de controlo. O molde foi elaborado a partir do desenho CAD, na Router CNC do Laboratório de Fabricação (Fablab) da Universidade da Beira Interior (UBI), utilizando 2 placas de poliestireno extrudido com 2000x600x100 mm. Devido à altura necessária para maquinar o molde, este teve de ser seccionado em 3 partes, cada uma com 100mm de altura, pois não existem no Fablab ferramentas com o tamanho necessário para maquinar 283mm de profundidade. Maquinar o molde todo de uma vez teria sido uma opção mais benéfica, pois o acabamento ficaria muito melhor, contudo, esta foi a melhor solução encontrada. Na Figura 60 pode-se ver o molde depois de maquinado, faltando uni-lo e acabá-lo.



Figura 60 - Molde da caixa de proteção.

As três partes do molde foram coladas e foram ainda introduzidos quatro varões de aço para garantir maior integridade, de forma a poder utilizar vácuo caso necessário. Foi ainda preciso lixar, aplicar betume poliéster nas uniões das partes e cobrir todo o interior do molde com resina epóxi, sendo que, entre cada um destes processos, foi sempre necessário lixar novamente até atingir uma superfície sem imperfeições. Após terminado o molde, foi aplicada uma camada de cera e outra de vaselina, para, aquando do desmolde da caixa de proteção, fosse mais fácil a sua remoção.

4.4.2. Proteção de fibra

Iniciou-se por cortar a fibra de vidro necessária para cobrir todo o molde, como visível na Figura 61, e preparou-se a resina epóxi. De seguida, aplicaram-se duas camadas de fibra e resina depois de cada uma delas. Após este processo, o ideal seria utilizar uma máquina de vácuo durante a cura da resina, para assim se obter um melhor acabamento e uma maior qualidade na fibra, ficando sem bolhas de ar entre camadas. A sua utilização não foi possível devido à indisponibilidade do equipamento na altura necessária.



Figura 61 - Fibra de vidro necessária para a construção da caixa.

Aquando da primeira vez que a caixa de proteção foi removida do molde, esta apresentou bastantes falhas nos cantos, como se pode ver na Figura 62.



Figura 62 - Primeiro resultado da caixa de proteção.

Até alcançar a forma correta, a caixa necessitou de ser colocada no molde mais duas vezes para que todos os seus cantos fossem reforçados, cortando os excedentes e aplicando duas camadas de reforço cada vez que o processo era repetido. Para a caixa de proteção ter mais integridade, foi-lhe adicionado poliestireno extrudido com 4 mm de espessura, colado em todas as superfícies da caixa e, para finalizar, uma camada de fibra, criando assim um material tipo “sandwich”, extremamente resistente. Na Figura 63 pode-se observar a caixa antes de ser acabada e pintada.



Figura 63 - Caixa de proteção antes do acabamento.

No acabamento da caixa foi necessário lixar toda a sua superfície e aplicar betume poliéster várias vezes, voltando sempre a lixar entre cada aplicação, até à obtenção de uma superfície uniforme, como se pode observar na Figura 64.



Figura 64 - Caixa de proteção em processo de acabamento.

Quando se montou a caixa protetora pela primeira vez, verificou-se um dos lados - onde encaixa o perfil para fixar o eixo z_1 - estava 10 mm maior que o outro lado. Esta pequena diferença iria influenciar bastante o sistema cartesiano pois este deixaria de estar paralelo com a frente do robô. Assim, foi necessário cortar o canto e refazê-lo, estando o processo demonstrado na Figura 65.



Figura 65 - Detalhe da reparação da caixa de proteção.

Depois de feitas as correções, foram cortadas as portas, a gaveta e o local para os motores da caixa protetora, pois esta foi elaborada como uma caixa e só depois foram feitas as aberturas necessárias. As portas tiveram de ser furadas para se abrir roscas para a colocação das dobradiças. Abriam-se ainda furos para os puxadores e os fechos das portas.

Os puxadores foram realizados no torno mecânico e na fresadora a partir de um varão de aço de 20 mm de diâmetro. Desbastou-se uma parte, com 25 mm de comprimento, até ficar com 5 mm de diâmetro por forma abrir rosca, servindo esta para fixar o puxador. A outra parte foi desbastada 5 mm e arredondadas as arestas. De seguida, o puxador foi levado à fresadora para executar uma reentrância com uma fresa de 12 mm, de forma a ser mais fácil agarrar o puxador. Na Figura 66 pode-se observar o material inicial ao resultado final dos puxadores.



Figura 66 - Puxadores das portas e gaveta.

Na Figura 67 encontra-se a caixa protetora finalizada, a qual teve de ser integralmente pintada, assim como todos os componentes a si acoplados.

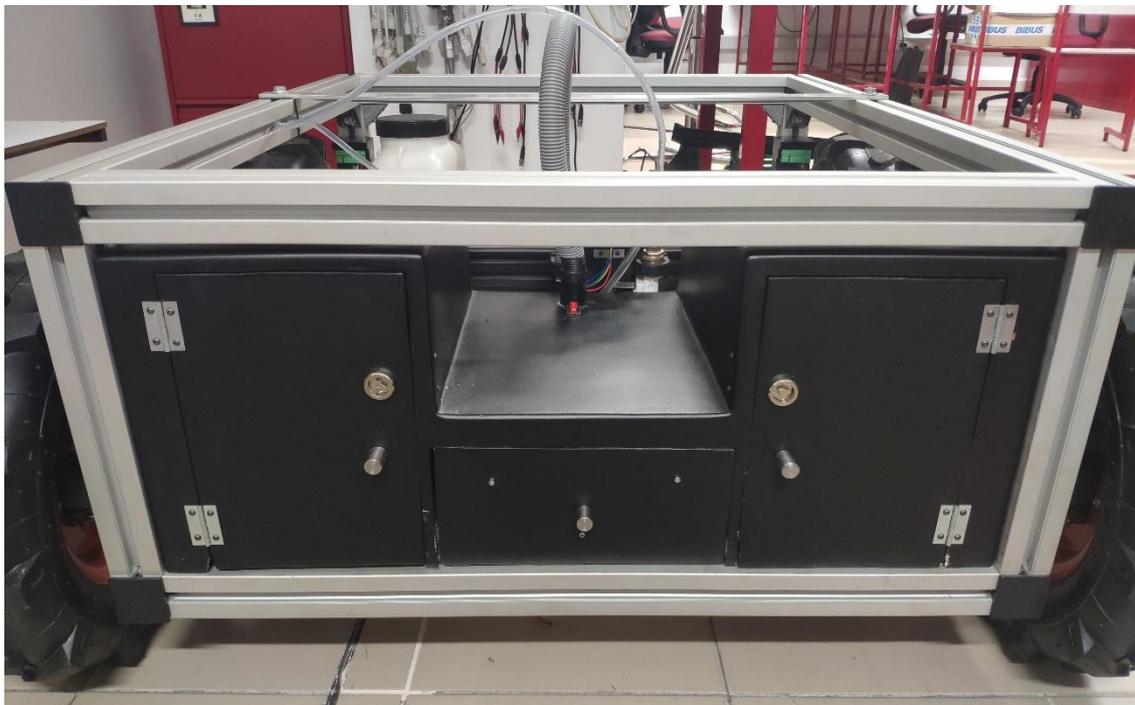


Figura 67 - Caixa de proteção finalizada.

4.4.3. Suporte da caixa de proteção

Este suporte foi elaborado com tubo de alumínio 40x40x2 mm, cortados no jato de água em duas peças com 702 mm, que serão posteriormente soldadas às laterais e à base onde a gaveta será aplicada.

As calhas da bateria foram obtidas a partir do desenho CAD e cortadas também no jato de água. São constituídas por duas peças, a base e o perfil U que foi obtido por quinagem de chapa em dois pontos a 90°, as peças foram soldadas, como se pode ver na Figura 68.



Figura 68 - Calha das baterias.

Concluídas as calhas, estas foram soldadas ao suporte da caixa de proteção e montadas na estrutura do robô, fixas por 4 parafusos M10 com cabeça T. Na Figura 69 pode-se observar o resultado final do suporte da caixa de proteção.

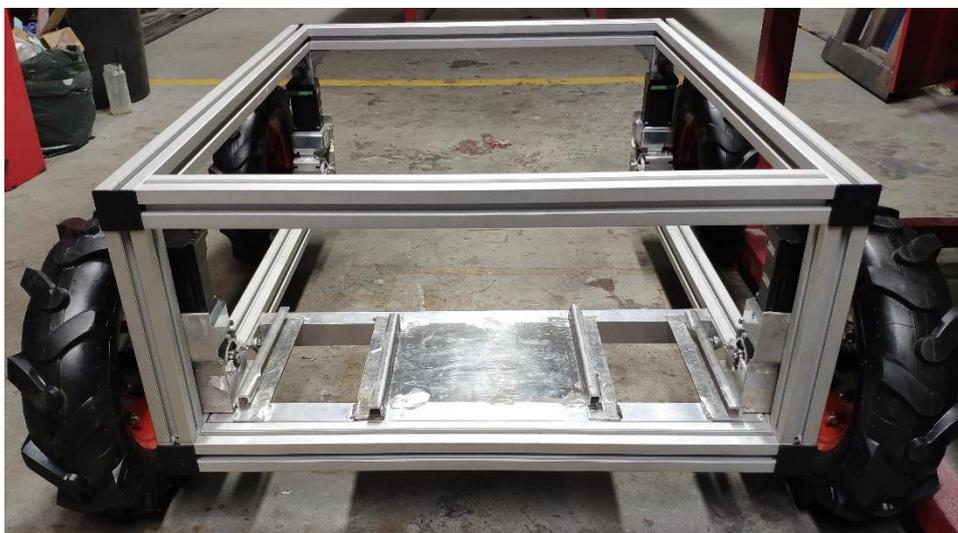


Figura 69 - Suporte finalizado e aplicado na estrutura.

4.4.4. Suporte das baterias

Os suportes das baterias foram elaborados segundo o desenho CAD, tendo sido cortados no jato água, e são constituídos por três peças – uma base e duas laterais iguais. As peças desenvolvidas têm encaixes para facilitar o posicionamento das mesmas quando forem soldadas. As laterais precisaram de ser dobradas em dois pontos a 90° para ficarem com o formato da bateria e furadas na parte superior para a colocação de 2 parafusos M8, que garantem que a bateria não saia do suporte. Na Figura 70 é apresentada a evolução do suporte de baterias.

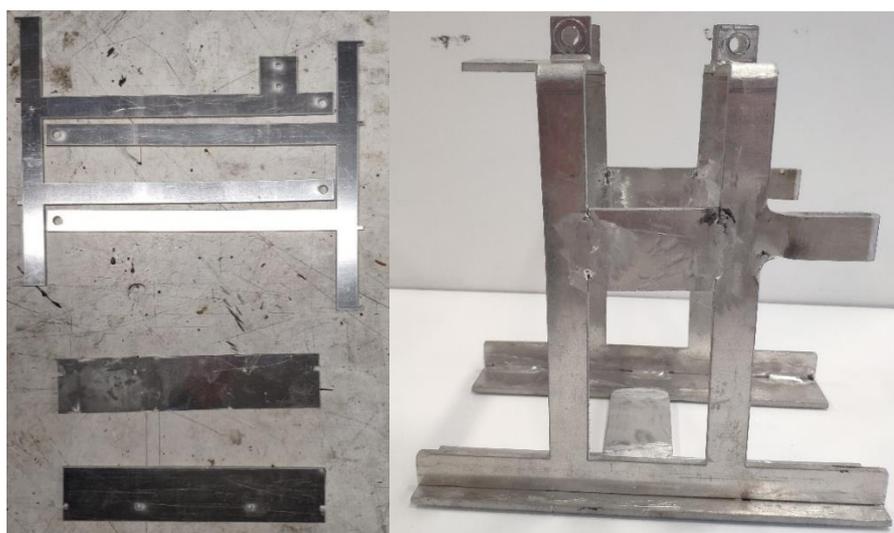


Figura 70 - Suporte de bateria.

4.4.5. Suporte de carga/depósito

Este suporte necessitou de 2 tubos 40x40x2 mm com um comprimento de 702 mm, 2 laterais e 5 barras, cortadas usando o jato de água. Todas as peças foram soldadas para formarem o suporte, como se pode ver na Figura 71. Numa das barras abriram-se 4 furos com 4,5 mm para a colocação da bomba do sistema de pulverização, tendo sido usados 4 parafusos M4x20 para a sua fixação. O suporte é acoplado à estrutura com 4 parafusos M10 com cabeça T e o depósito preso com 2 braçadeiras plásticas.

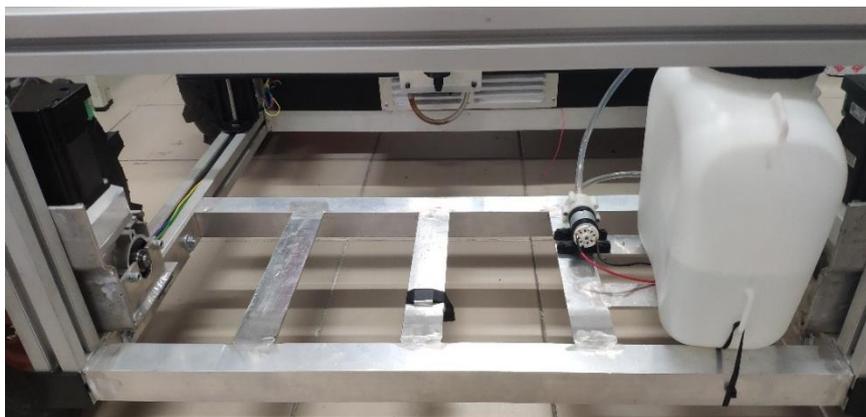


Figura 71 - Suporte traseiro.

4.4.6. Sistema de eixos cartesianos

Alguns dos eixos lineares adquiridos necessitaram de certas alterações, devido ao facto de não existirem com as configurações necessárias. Para o eixo y_1 , representado na Figura 72, foi necessário cortar a barra principal do mesmo para 800 mm de comprimento, adicionar uma placa na parte frontal de forma a aumentar a sua resistência, criar novos pontos para fixar o bico de pulverização, o eixo z_2 e, futuramente, o eixo que permitirá executar operações fora da estrutura do robô e, por fim, montar todos os seus componentes.

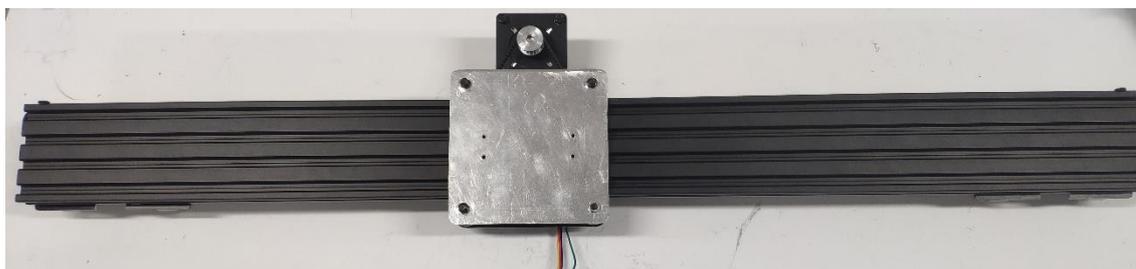


Figura 72 - Eixo linear y_1 .

Já os dois eixos denominados de z_1 necessitaram de mais algumas alterações pois foi preciso aplicar o motor do eixo na parte traseira do mesmo, enquanto no eixo normalmente adquirido, o motor é montado na parte superior. Para realizar esta alteração, adaptou-se a placa de aplicação do motor na retaguarda, representado na Figura 73, que anteriormente se destinava apenas para outra configuração de eixo linear.



Figura 73 - Placa de acoplamento do motor na traseira a do eixo.

A adaptação deste eixo deve-se apenas ao facto de ocupar menos espaço que a configuração a que o kit se destina. As alterações na placa de montagem do motor foram apenas a fixação da placa ao eixo, a barra principal e o parafuso de avanço. Para alterar a fixação foi necessário abrir três rasgos na fresadora com uma fresa de 4mm e cortar a barra principal e o parafuso de avanço, pois não existiam com o tamanho pretendido. Após efetuadas as alterações, montaram-se todos os componentes no eixo, como se pode ver na Figura 74.

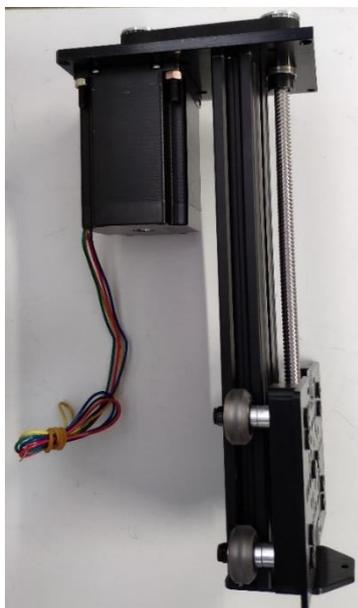


Figura 74 - Eixo linear z_1 .

O eixo z_2 , como se pode observar na Figura 75, foi construído a partir de um tubo de alumínio com 40x40x2 mm com tampas nas suas extremidades. A tampa superior é constituída por duas chapas de alumínio com 4 mm de espessura coladas, sendo que na chapa superior é fixo o motor e na inferior é acoplado o rolamento que garante que o parafuso de avanço se mantém centrado e a

rodar livremente. A tampa inferior é de alumínio com 10 mm de espessura e tem um furo centrado com 12mm de diâmetro para alinhar a haste do eixo. A aplicação deste eixo revelou alguns problemas: a tampa superior necessitava de ser um pouco maior e o sistema de acoplamento do rolamento necessitava de ser invertido. Estas alterações ainda aguardam para ser realizadas, pois para a utilização do sistema de pulverização não é necessário recorrer a este eixo. Como apenas seria utilizado para a recolha de frutos, e esse sistema não foi desenvolvido durante este trabalho, optou-se apenas por habilitá-lo para executar essa função com pequenas alterações.

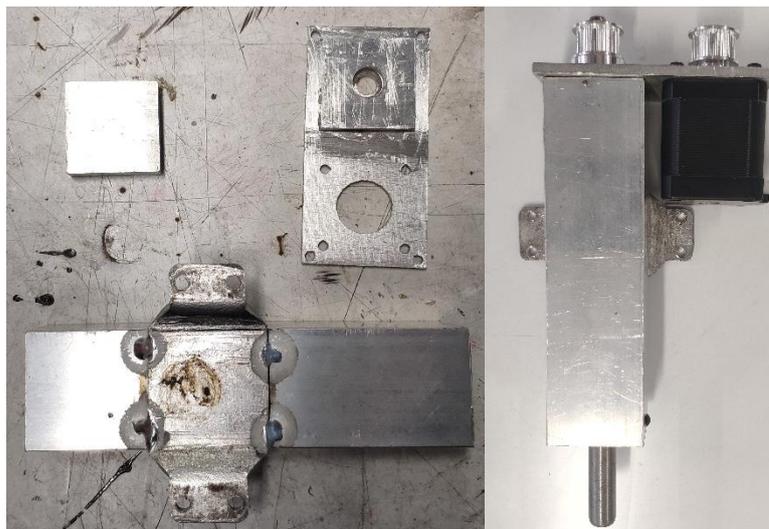


Figura 75 - Elaboração do eixo z_2 .

Para o eixo y_2 , representado na Figura 76, foi necessário apenas cortar a barra principal e o parafuso de avanço e montar todos os seus componentes.



Figura 76 - Eixo linear y_2 .

4.4.7. Suportes dos eixos z_1

Estes suportes foram inicialmente dimensionados para permitirem um fácil acesso ao local de aperto dos parafusos, mas, devido à aquisição de uma placa de alumínio EN-AW5005, que é uma liga bastante dúctil, revelaram não ter resistência suficiente. Assim, foi necessário proceder a alterações aos suportes iniciais, podendo-se observar na Figura 77 a sua construção. Para melhorar a rigidez do suporte, acrescentou-se uma pequena barra no meio do arco deste e aumentou-se a área que está soldada na base onde aperta ao eixo.



Figura 77 - Suporte do eixo z_1 .

Este suporte leva 4 parafusos M4x10 para fixar o eixo e mais 2 parafusos M10x25 com cabeça T para prender o suporte ao perfil da estrutura.

4.4.8. Suporte bico de pulverização

Este suporte é constituído por duas partes e obtido através de impressão 3D, necessitando do desenho CAD do objeto para a sua realização. Essas duas partes são de PLA, sendo a base fixa diretamente na placa do eixo y_1 , com 4 parafusos M3x20 e a outra parte fixada com 2 parafusos M3x20 que mantém o bico de pulverização na posição correta. Na Figura 78 pode-se ver o suporte finalizado e montado.



Figura 78 - Bico de pulverização.

4.5. Testes

Realizaram-se dois testes ao robô, de forma a analisar aspetos como locomoção, elementos construtivos, sistema de pulverização, entre outros, um no interior e outro no pomar. Após a elaboração destes testes, concluiu-se que os comportamentos foram bastante diferentes.

No teste realizado no interior, o robô deslocou-se sem qualquer problema. A manobrabilidade foi boa e, quando executados testes para a mesma distância, este não apresentou qualquer problema tendo sempre tempos muito semelhantes.

Já aquando do teste no pomar, os resultados não foram os mesmos, pois este apresentou algumas dificuldades a transpor pedras, ramos caídos e até buracos. Isto fez com que o robô não conseguisse manter um ritmo constante, tendo-se verificado resultados bastantes díspares em termos de tempo despendido a percorrer a mesma distância. Outro problema que se verificou foi as rodas traseiras patinharem devido ao robô ter maior concentração de peso na parte dianteira, podendo este corrigido com a colocação de peso nas rodas traseiras.

O sistema de pulverização também foi testado para que se pudesse analisar o comportamento do mesmo na formação do leque de pulverização e nos tempos de resposta da abertura e fecho do solenoide, assim como na produção de pressão para alimentar o bico de pulverização e se esta seria suficiente. Na formação do leque não se verificou nenhum problema, tendo sido experimentadas várias aberturas do bico de pulverização a alturas diferentes. Através de futuros testes conseguir-se-á chegar à altura ao chão e à abertura ideais para pulverizar.

Apenas ficou por testar o sistema de eixos lineares, pois não foi possível concluir o sistema de controlo a tempo dos testes. Na Figura 79 pode-se observar o robô nos testes do pomar.



Figura 79 - Robô no teste do pomar.

4.6. Nota Conclusiva

Ao longo deste capítulo foram descritas todas as etapas para a obtenção do robô, passando pela formulação da ideia, o desenho, o dimensionamento, a construção e, por fim, os testes.

Na primeira parte, retratou-se a evolução da ideia até ao esboço final, desde o dimensionamento mecânico - que ajudou no processo de seleção dos motores e caixas redutoras - à escolha da estrutura mais adequada, bem como os materiais a usar na construção da caixa de proteção das baterias e controlo. Dimensionaram-se também os componentes elétricos, como as baterias, as opções de controlo do robô e ainda o sistema de pulverização. Após o dimensionamento, passou-se para o desenho dos componentes do protótipo. Quando concluído o desenho, começou-se por construir alguns dos componentes e, seguidamente, montou-se todo o robô. Por fim, estão descritos alguns dos problemas existentes nos primeiros testes.

5. Conclusões

5.1. Conclusões gerais

O desenvolvimento da plataforma robótica para controlo de infestantes através de pulverização de precisão envolveu as mais diversas áreas científicas.

Este foi um projeto bastante complexo de desenvolver devido à forte componente prática, tendo-se revelado um desafio enorme abraçar a construção deste robô. Devido à quantidade de trabalho que este requereu, uma das funções do robô inicialmente pensada – o sistema de recolha de frutos - não foi concluída, ficando apenas habilitado a receber todos os componentes necessários para a construção desse sistema. Diversos contratemplos e imprevistos no desenvolvimento, como os atrasos na receção de componentes, as alterações constantes no desenho até à obtenção do resultado final, a indisponibilidades de equipamentos, entre outras, condicionaram o desenvolvimento desta parte.

Para a construção deste robô recorreu-se a técnicas e tecnologias como o corte por jato de água, para o corte das peças de alumínio; a maquinação CNC, para a elaboração do molde da caixa de proteção das baterias e controlo; o torneamento mecânico, no fabrico de casquilhos e dos puxadores; a impressão 3D, para a elaboração de suportes e, por último; a soldadura MIG e TIG para soldar alguns dos componentes. Na construção da estrutura do robô utilizaram-se perfis T-Slot 45x45. Já para a sua locomoção, utilizaram-se motores de passo NEMA 23 high torque, combinados com caixas redutoras sem fim, conseguindo assim produzir um binário de saída de 25 N, sendo todo o circuito alimentado por duas baterias 12 V 55Ah, ligadas em série.

Ao longo do desenvolvimento do robô foram aparecendo alguns problemas construtivos como na caixa de proteção das baterias e controlo, onde foi necessário refazer um dos cantos da caixa que, inicialmente, ficou maior do que os restantes e também na traseira da caixa, na qual foram detetadas folgas significativas que podem causar problemas pela entrada de lixo para a gaveta de controlo mas que, infelizmente, não puderam ser corrigidas. Já nos suportes dos motores não se conseguiu aplicar um terceiro ponto de apoio, deixando-os assim mais instáveis. Outro dos problemas é o facto de não se ter executado um escatel no acoplamento da roda ao motor de locomoção, então este tende a desparafusar devido à falta de uma cavilha para o manter na posição. O último problema construtivo encontrado foi no eixo y_1 que, devido à fragilidade do mecanismo de afinação do eixo, facilmente perde a afinação. Prevê-se que com testes frequentes isto se traduza num problema de precisão no posicionamento do bico de pulverização que se irá agravar aquando da colocação do eixo y_2 .

Foram realizados dois testes ao robô, um deles no interior e o outro no pomar. Nesses dois testes obteve-se resultados um pouco diferentes: no interior, o robô comportou-se como expectável, boa manobrabilidade e sem nenhum problema de locomoção. Já no pomar teve alguns problemas, nomeadamente a ultrapassar obstáculos como ramos caídos no chão, buracos e pedras maiores.

Devido a estes obstáculos, o robô não conseguiu manter um ritmo constante, facto verificado tirando algumas medições para a mesma distância e verificando assim que os tempos eram bastante díspares entre si. Outro dos problemas é a distribuição de peso, pois o robô tem grande parte do seu peso concentrado na parte dianteira, o que faz com que as rodas traseiras patinhem quando têm que ultrapassar obstáculos. Estes testes também serviram para observar o comportamento do sistema de pulverização, em particular do bico de pulverização na formação do leque, concluindo-se que este será o mais adequado ao caso de estudo, pois possibilita um grande ajuste do leque.

Este projeto despertou uma enorme curiosidade devido a ser tão abrangente e conseguir associar tantas áreas distintas como maquinaria CNC, soldadura, impressão 3D, entre outras, tornando-se assim num dos maiores desafios ultrapassados a nível pessoal, servindo desse modo para abrir novos horizontes.

5.2. Trabalhos futuros

Devido à abrangência deste projeto ficaram inúmeras ideias por concretizar e, por isso, serão enumeradas de seguida algumas propostas para trabalhos futuros.

Em primeiro lugar, sugere-se algumas alterações no sistema de tração do robô com a adição de um terceiro ponto de apoio nos suportes dos motores de locomoção, de forma a estabilizá-los um pouco mais. Bem como a introdução de uma cavilha, no acoplamento entre a roda e o motor, para manter em posição, de modo a não desapertar.

De seguida, seria interessante a introdução do eixo y_2 para possibilitar que o robô execute funções fora da sua estrutura. Após esta alteração, também seria necessário alterar o eixo z_2 , possibilitando assim a utilização do sistema de recolha dos frutos.

Outra das propostas é o desenvolvimento de uma base de carregamento de baterias e reabastecimento de herbicida, com substituição rápida das baterias, podendo assim o robô operar sem assistência em testes de longa duração.

Devido a esta plataforma ser de fácil alteração, a introdução de um braço robótico articulado seria interessante para a realização da colheita dos frutos, entre outras tarefas a estudar.

Por fim, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de recolha e substituição das caixas da fruta.

Referências Bibliográficas

- [1] P. D. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, “Population 2030: Demographic challenges and opportunities for sustainable development planning,” *United Nations*, p. 58, 2015.
- [2] S. Bachche, “Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: A survey,” *Robotics*, vol. 4, no. 2, pp. 194–222, 2015.
- [3] M. De Clercq, A. Vats, and A. Biel, “Agriculture 4.0: the Future of Farming Technology,” *Proc. World Gov. Summit, Dubai, UAE*, no. February, p. 30, 2018.
- [4] G. Hechavarría, Rodney; López, “Sumário do Relatório WWF / CEABN ‘O Sobreiro, uma barreira contra a Desertificação,’” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [5] T. Abbas, Z. A. Zahir, M. Naveed, and R. J. Kremer, *Limitations of Existing Weed Control Practices Necessitate Development of Alternative Techniques Based on Biological Approaches*, 1st ed., vol. 147. Elsevier Inc., 2018.
- [6] A. M. Peerzada and B. S. Chauhan, *Thermal Weed Control: History, Mechanisms, and Impacts*. Elsevier Inc., 2018.
- [7] “The autonomous robot weeder from Ecorobotix.” [Online]. Available: <https://www.ecorobotix.com/en/autonomous-robot-weeder/>. [Accessed: 10-Jun-2019].
- [8] R. N. Jørgensen *et al.*, “Hortibot: A system design of a robotic tool carrier for high-tech plant nursing,” *CIGR Ejournal*, vol. IX, no. 1, p. Manuscript ATOE 07 006, 2007.
- [9] “FroboMind Robot.” [Online]. Available: http://frobomind.org/oldwiki/index.php%3Ftitle=FroboMind_Robot:Archive.html. [Accessed: 09-May-2020].
- [10] A. Wendel and J. Underwood, “Self-supervised weed detection in vegetable crops using ground based hyperspectral imaging,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2016-June, pp. 5128–5135, 2016.
- [11] S. Sukkarieh, “An Intelligent Farm Robot for the Vegetable Industry,” Horticulture Innovation Australia, Final Report, Project Number: VG12104, Sydney, Australia, 2016.
- [12] R. Klose, M. Thiel, A. Ruckelshausen, and J. Marquering, “Weedy - a sensor fusion based autonomous field robot for selective weed control,” *Conf. Agric. Eng. - Land-Technik 2008 Landtechnik Reg. und Int.*, pp. 167–172, 2008.
- [13] “Asterix-Automatic detection and spraying of weeds in crop rows.” [Online]. Available: <https://www.adigo.no/portfolio/asterix/?lang=en>. [Accessed: 02-May-2020].
- [14] C. McCool *et al.*, “Efficacy of Mechanical Weeding Tools: A Study into Alternative Weed Management Strategies Enabled by Robotics,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 1184–1190, 2018.
- [15] “OZ WEEDING ROBOT.” [Online]. Available: <https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/weeding-robot-oz/>. [Accessed: 06-Mar-2019].
- [16] “AUTONOMOUS VEGETABLE WEEDING ROBOT - DINO.” [Online]. Available: <https://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/large-scale-vegetable-weeding-robot/>. [Accessed: 10-Oct-2019].
- [17] “VINEYARD WEEDING ROBOT TED.” [Online]. Available: <https://www.naio->

- technologies.com/en/agricultural-equipment/vineyard-weeding-robot/. [Accessed: 20-Sep-2019].
- [18] W. Bangert *et al.*, “Field-Robot-Based Agriculture: ‘Remote Farming.1’ and ‘BoniRob-Apps,’” *71th Conf. AgEng Proc.*, pp. 2–9, 2013.
- [19] P. Biber, U. Weiss, M. Dorna, and A. Albert, “Navigation System of the Autonomous Agricultural Robot ‘BoniRob,’” *Work. Agric. Robot. Enabling Safe, Effic. Afford. Robot. Food Prod.*, pp. 1–7, 2012.
- [20] B. Keresztes, C. Germain, J.-P. Da Costa, G. Grenier, and X. D. Beaulieu, “Vineyard Vigilant & INNovative Ecological Rover (VVINNER): an autonomous robot for automated scoring of vineyards,” 2014, pp. 6–10.
- [21] “MOWING FARM ROBOT.” [Online]. Available: <https://www.agriexpo.online/prod/vitirover/product-177234-28632.html>. [Accessed: 27-Apr-2020].
- [22] David Reiser, “Perception for context awareness of agricultural robots,” University of Hohenheim, 2018.
- [23] “The eye-catcher - Phoenix robot with LINAK technology.” [Online]. Available: <https://www.linak.com/segments/techline/case-stories/the-eye-catcher-phoenix-robot-with-linaktechnology/>. [Accessed: 03-May-2020].
- [24] “A revolution in soil grassing management.” [Online]. Available: <https://www.vitirover.fr/en-home>. [Accessed: 25-Mar-2020].
- [25] A. De Preter, J. Anthonis, and J. De Baerdemaeker, “Development of a Robot for Harvesting Strawberries,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 17, pp. 14–19, 2018.
- [26] “Harvest CROO.” [Online]. Available: <https://harvestcroo.com/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [27] “Agrobot.” [Online]. Available: <http://agrobot.com/>. [Accessed: 06-Jun-2019].
- [28] “ROBOTIC HARVESTING.” [Online]. Available: <https://dogtooth.tech/>. [Accessed: 25-Nov-2019].
- [29] “GRoW.” [Online]. Available: <https://metomotion.com/>. [Accessed: 04-May-2019].
- [30] “Root AI.” [Online]. Available: <https://root-ai.com/>. [Accessed: 20-May-2019].
- [31] X. Ling, Y. Zhao, L. Gong, C. Liu, and T. Wang, “Dual-arm cooperation and implementing for robotic harvesting tomato using binocular vision,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 114, pp. 134–143, 2019.
- [32] “SWEEPER demonstrated its harvesting robot for the first time.” [Online]. Available: <http://www.sweeper-robot.eu/11-news/48-sweeper-demonstrated-its-harvesting-robot-for-the-first-time>. [Accessed: 10-Sep-2019].
- [33] “Sweet Pepper Harvesting Robot.” [Online]. Available: <http://www.sweeper-robot.eu/>. [Accessed: 20-May-2019].
- [34] C. Lehnert, A. English, C. McCool, A. W. Tow, and T. Perez, “Autonomous Sweet Pepper Harvesting for Protected Cropping Systems,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, pp. 872–879, 2017.
- [35] “Crux Agribotics.” [Online]. Available: <https://cruxagribotics.com/>. [Accessed: 15-Feb-2020].
- [36] “Crux Agribotics develops cucumber robot with machine learning.” [Online]. Available: <https://hortinext.digitalezaken.com/crux-agribotics-develops-cucumber-robot-with-machine-learning/>. [Accessed: 24-Apr-2020].
- [37] K. Strohmeier, “Automation in agriculture Lightweight robots harvest cucumbers,” 2018.
- [38] “Abundant robotics.” [Online]. Available: <https://www.abundantrobotics.com/>. [Accessed: 05-Jun-2019].

- [39] “How Abundant Robotics, Inc. is Changing Agribusiness.” [Online]. Available: <http://thinkagribusiness.com/2019/05/08/how-abundant-robotics-inc-is-changing-agribusiness/>. [Accessed: 15-Apr-2019].
- [40] “FFRobotics.” [Online]. Available: <https://www.ffrobotics.com/>. [Accessed: 13-Jun-2019].
- [41] A. J. Scarfe, R. C. Flemmer, H. H. Bakker, and C. L. Flemmer, “Development of an autonomous kiwifruit picking robot,” *ICARA 2009 - Proc. 4th Int. Conf. Auton. Robot. Agents*, no. January, pp. 380–384, 2009.
- [42] “SOLIDWORKS in Industry.” [Online]. Available: <https://www.solidsolutions.co.uk/solidworks-industries/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [43] “3D Modeling.” [Online]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/3d-modeling/17977>. [Accessed: 01-May-2020].
- [44] SolidWorks, “Introducing Solidworks Contents,” Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Mass., USA, 2015.
- [45] “Conheça 10 dos melhores softwares de modelagem 3D para projetos mecânicos!” [Online]. Available: <https://3dlab.com.br/10-softwares-de-modelagem-3d/>. [Accessed: 15-Apr-2020].
- [46] 3D Hubs, “CNC machining: The Complete Engineering Guide,” *Www.3Dhubs.Com*, pp. 1–39, 2019.
- [47] V. Stenberg, “Student CNC Guide.” KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.
- [48] “The marvellous Multicam Trident Series 3000 CNC router.” [Online]. Available: <https://medium.com/@fab9au/the-marvellous-multicam-trident-series-3000-cnc-router-1debd19713ed>. [Accessed: 20-Apr-2020].
- [49] “How Waterjet Works.” [Online]. Available: <https://www.flowwaterjet.com/Learn/How-Waterjet-Works.aspx#pure>. [Accessed: 10-Apr-2020].
- [50] “How can water cut through steel?” [Online]. Available: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/question553.htm>. [Accessed: 01-May-2020].
- [51] “Water Jet.” [Online]. Available: <https://alphalaser cutting.com/water-jet/>. [Accessed: 01-May-2020].
- [52] Y. Natarajan, P. K. Murugesan, M. Mohan, and S. A. Liyakath Ali Khan, “Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review,” *J. Manuf. Process.*, vol. 49, no. November 2019, pp. 271–322, 2020.
- [53] J. Viswanath, C. L. Tulasi, and K. Anand Babu, “Optimizing the process parameters of AWJM using Taguchi method and ANOVA on Inconel 625,” *ARN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, pp. 1578–1586, 2018.
- [54] A. Gupta, H.C ; Gupta, R.C.; Mittal, *Manufacturing Processes*, Second. New Delhi: New Age International (P) Ltd., 2009.
- [55] S. M. Umbert, “Cutting Forces in Turning Operations,” Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2017.
- [56] 3DPI, “The Free Beginner’s Guide to 3D Printing,” *3D Print. Ind.*, p. 77, 2014.
- [57] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018.
- [58] K. Yayla, B. Ozdemir, S. Burmaoglu, and H. Yalcin, “3D Printing Technology Diffusion,” no. December, pp. 1–10, 2014.
- [59] “Drukarka 3D K8200 - KIT.” [Online]. Available: <http://electropark.pl/drukarki->

- 3d/4918-drukarka-3d-k8200-kit.html. [Accessed: 26-Apr-2020].
- [60] C. Bell and C. Bell, "Introduction to 3D Printing," *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer*. pp. 3–52, 2014.
- [61] MAE Design & Manufacturing Laboratory, "Welding Intro to Welding Shielded Metal Arc Welding (SMAW)," *EML 2322l , Spring 2010*, no. Welding, p. 21, 2015.
- [62] M. Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems," *John Wiley Sons*, pp. 507–742, 2010.
- [63] K. Weman, *Welding Processes Handbook*, Fisrt. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2003.
- [64] C. Holdheide, "How to Use a MIG Welder Without Gas." [Online]. Available: <https://welderslab.com/how-to-use-a-mig-welder-without-gas>. [Accessed: 10-May-2020].
- [65] T. M. V. Rosado, "Inovação do Processo MIG / MAG – Análise de Produtividade e Emissão de Fumos Engenharia Mecânica," Instituto Superior Técnico, 2008.
- [66] "MIG WELDING TRANSFER METHODS." [Online]. Available: <https://www.aedmotorsport.com/news/mig-welding-transfer-methods>. [Accessed: 24-Apr-2020].
- [67] "MIG Equipment System Explained." [Online]. Available: <https://www.jasic.co.uk/post/mig-equipment-system-explained>. [Accessed: 20-Mar-2020].
- [68] "MIG welding." [Online]. Available: <http://www.advantagefabricatedmetals.com/mig-welding.html>. [Accessed: 15-Apr-2020].
- [69] "Processo de Soldagem - TIG (GTAW)." [Online]. Available: https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm. [Accessed: 28-Mar-2020].
- [70] E. R. Bohnart, *Welding Principles and Practices*, Fifth Edit. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [71] "Guide to TIG Welding." [Online]. Available: <https://www.jasic.co.uk/guide-to-tig-welding>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [72] "TIG welding." [Online]. Available: <http://www.advantagefabricatedmetals.com/tig-welding.html>. [Accessed: 12-Mar-2020].
- [73] R. Augusto *et al.*, "Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina," Instituto Superior Técnico, 2008.
- [74] V. B. Ugale, "Review Paper on Development of Polymer Composite Material and its Characterisation," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 01–05, 2016.
- [75] "Fiberglass." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass#/media/File:Glass_reinforcements.jpg. [Accessed: 05-May-2020].
- [76] J. Pusch and B. Wohlmann, "Carbon Fibers," in *Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications*, Elsevier Ltd., 2018, pp. 31–51.
- [77] "Carbon fiber." [Online]. Available: <https://steemit.com/science/@kanu1988/carbon-fiber-pt1>. [Accessed: 05-May-2020].
- [78] E. Reashad Bin Kabir and E. Nasrin Ferdous, "Kevlar-The Super Tough Fiber," *Int. J. Text. Sci.*, vol. 1, no. 6, pp. 78–83, 2013.
- [79] "WHAT IS KEVLAR? TYPES OF KEVLAR." [Online]. Available: <http://www.technologystudent.com/joints/kevlar2.html>. [Accessed: 05-May-2020].
- [80] Scott Bader Company, *Composites Handbook*. 2005. Obtained from Scott Bader Company Limited: scottbader.com/business/composites/

- [81] “WORM GEARS.” [Online]. Available: <https://en.nanotec.com/products/2276-worm-gears/>. [Accessed: 15-Jun-2020].
- [82] “MYCE_Vigne.” [Online]. Available: <https://wall-ye.com/index-2.html>. [Accessed: 13-May-2019].
- [83] “Cube Flight Controller.” [Online]. Available: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk-2.html. [Accessed: 01-Jun-2020].

Anexos

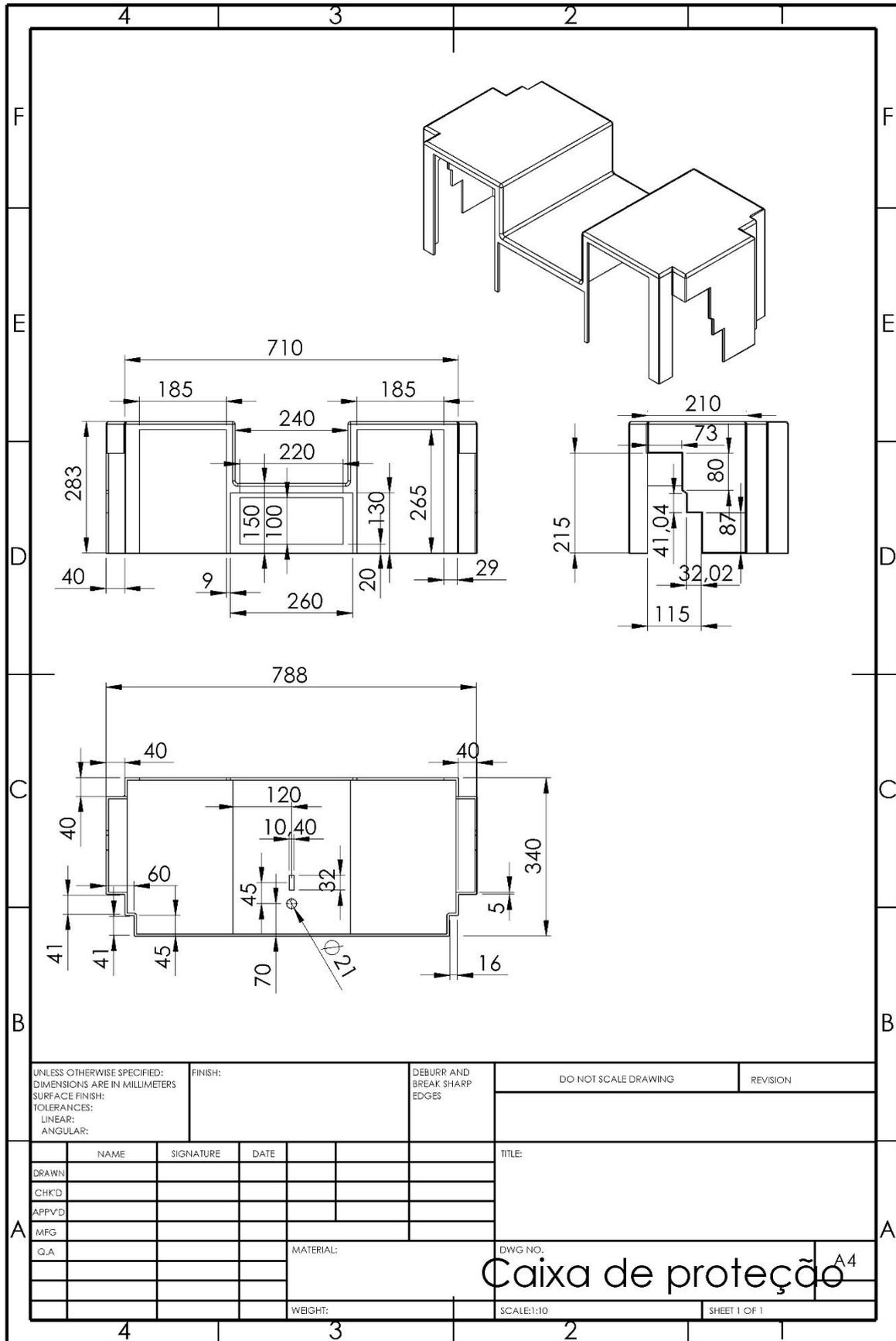


Figura 80 - Desenho técnico da caixa de proteção das baterias e controlo.

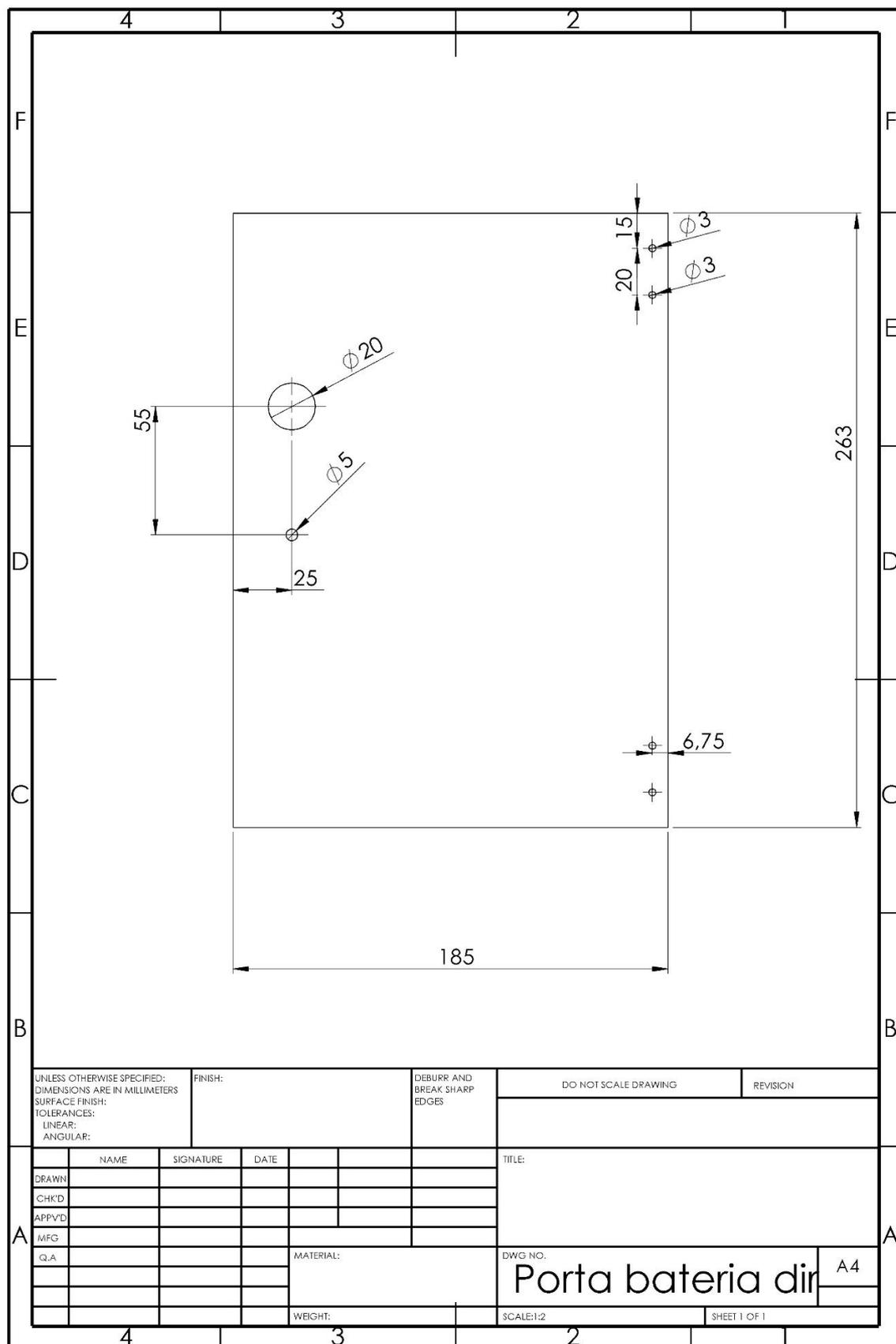


Figura 81 - Desenho técnico da porta direita da bateria.

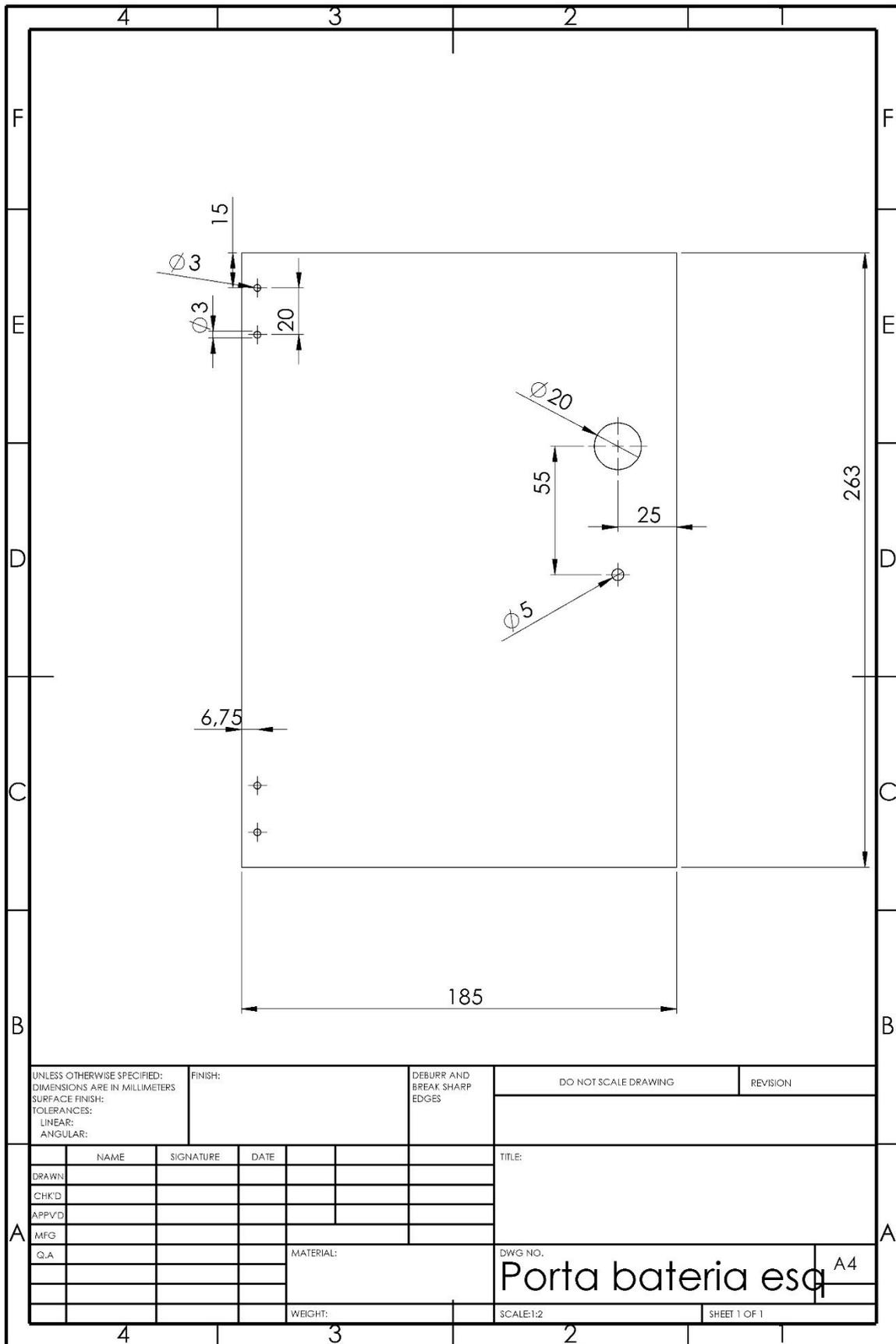


Figura 82 - Desenho técnico da porta esquerda da bateria.

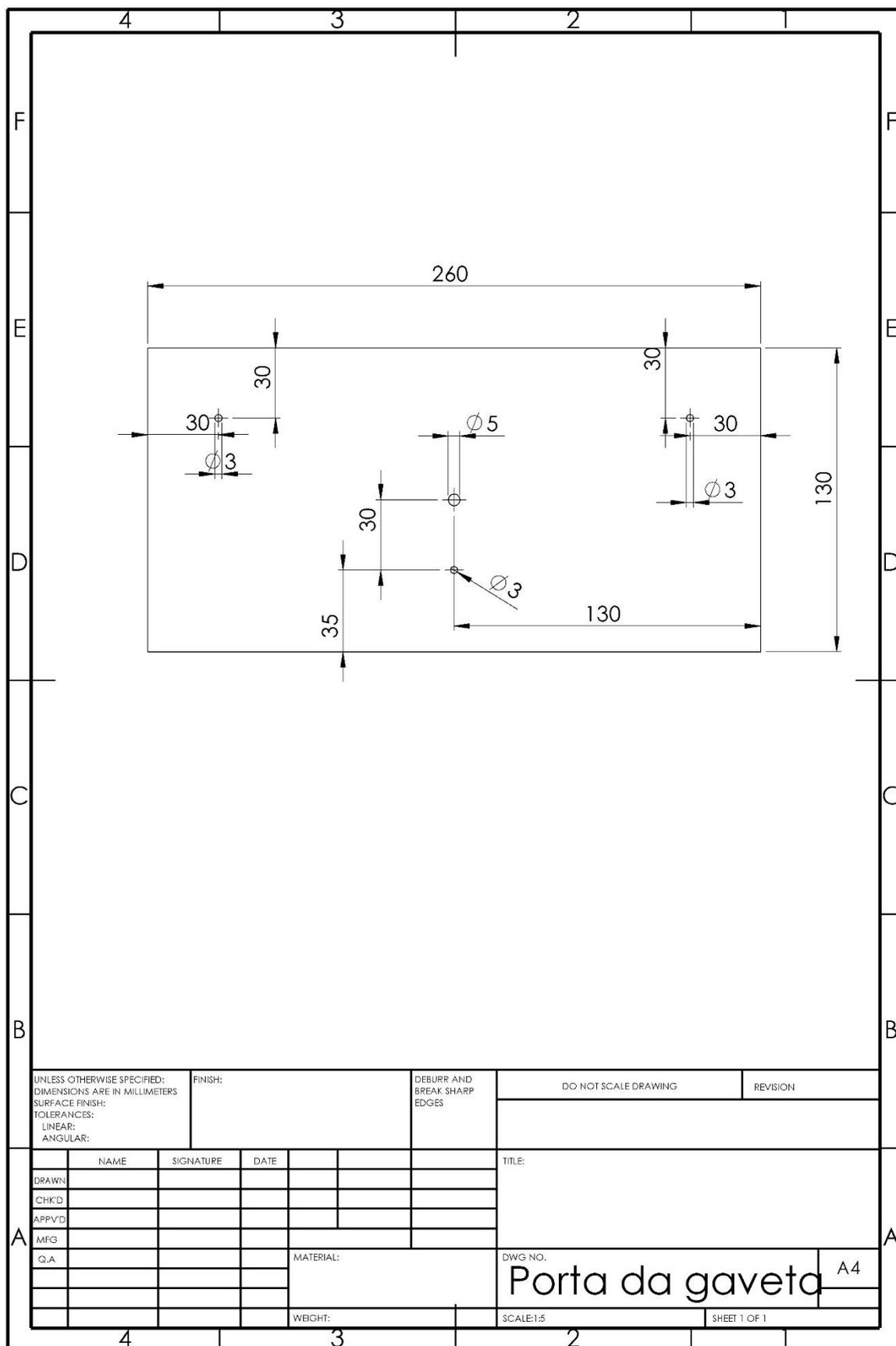


Figura 83 - Desenho técnico da tampa da gaveta.

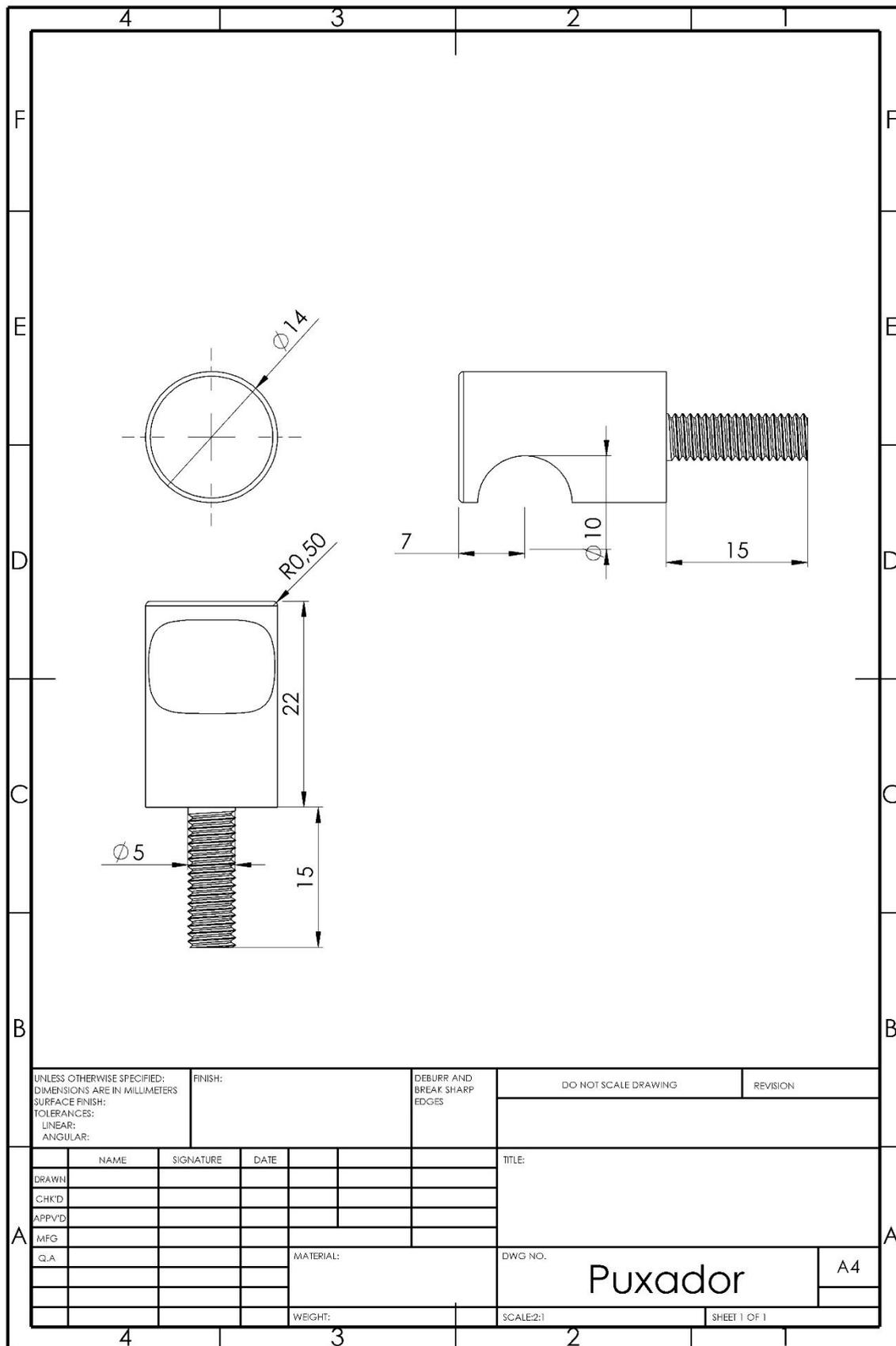


Figura 84 - Desenho técnico do puxador.

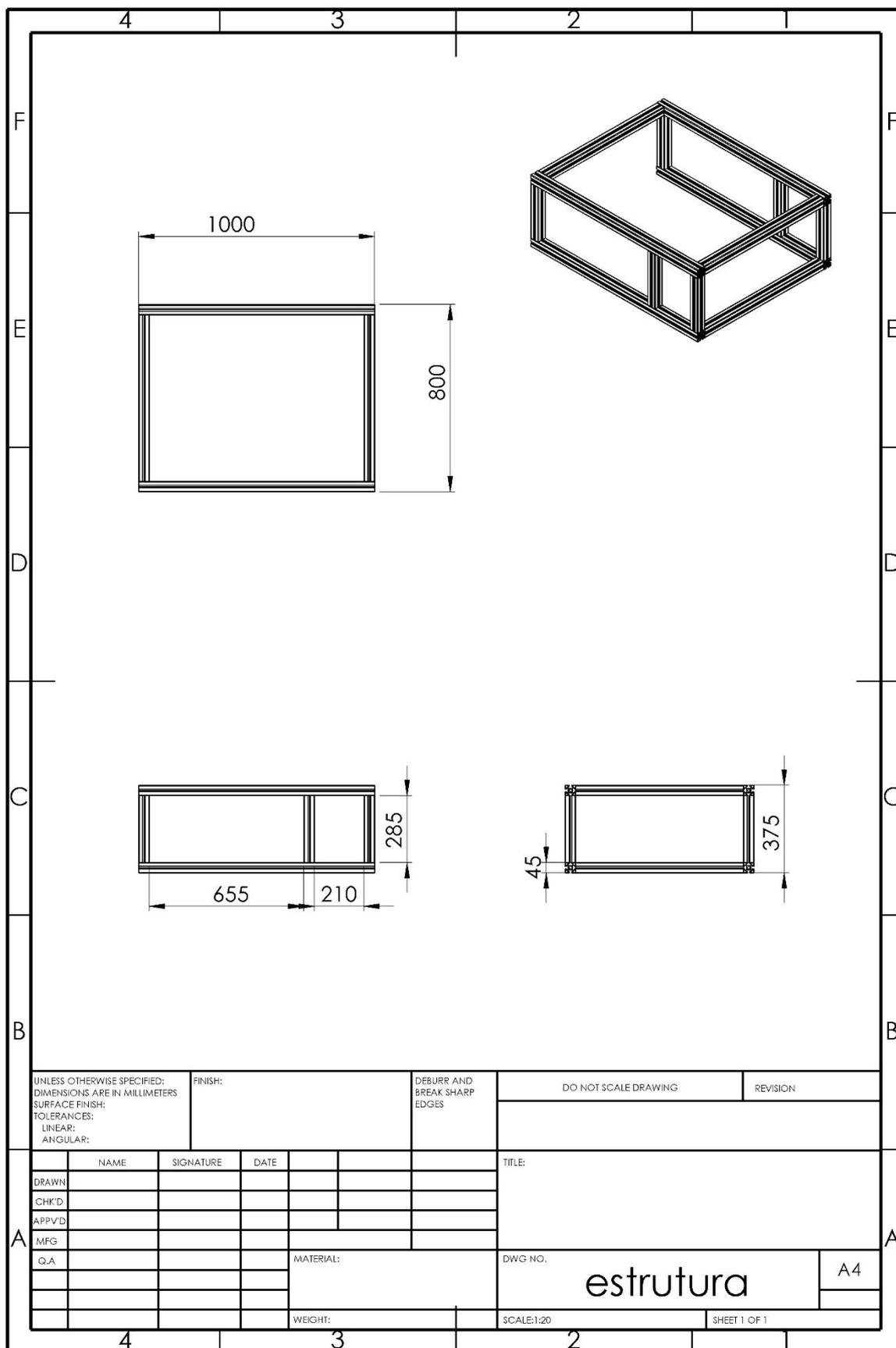


Figura 85 - Desenho técnico da estrutura do robô.

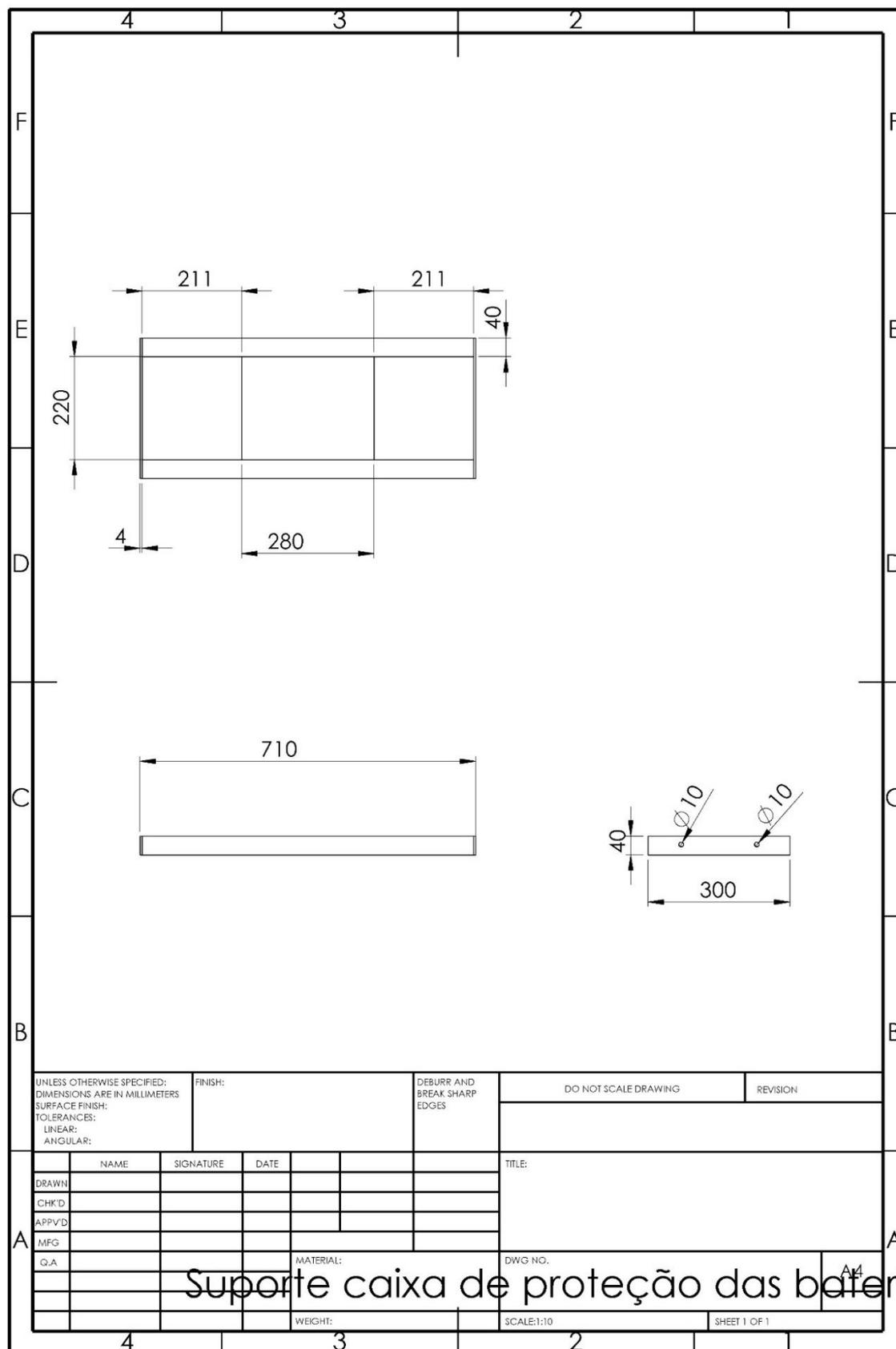


Figura 86 - Desenho técnico do suporte da caixa de proteção das baterias e controle.

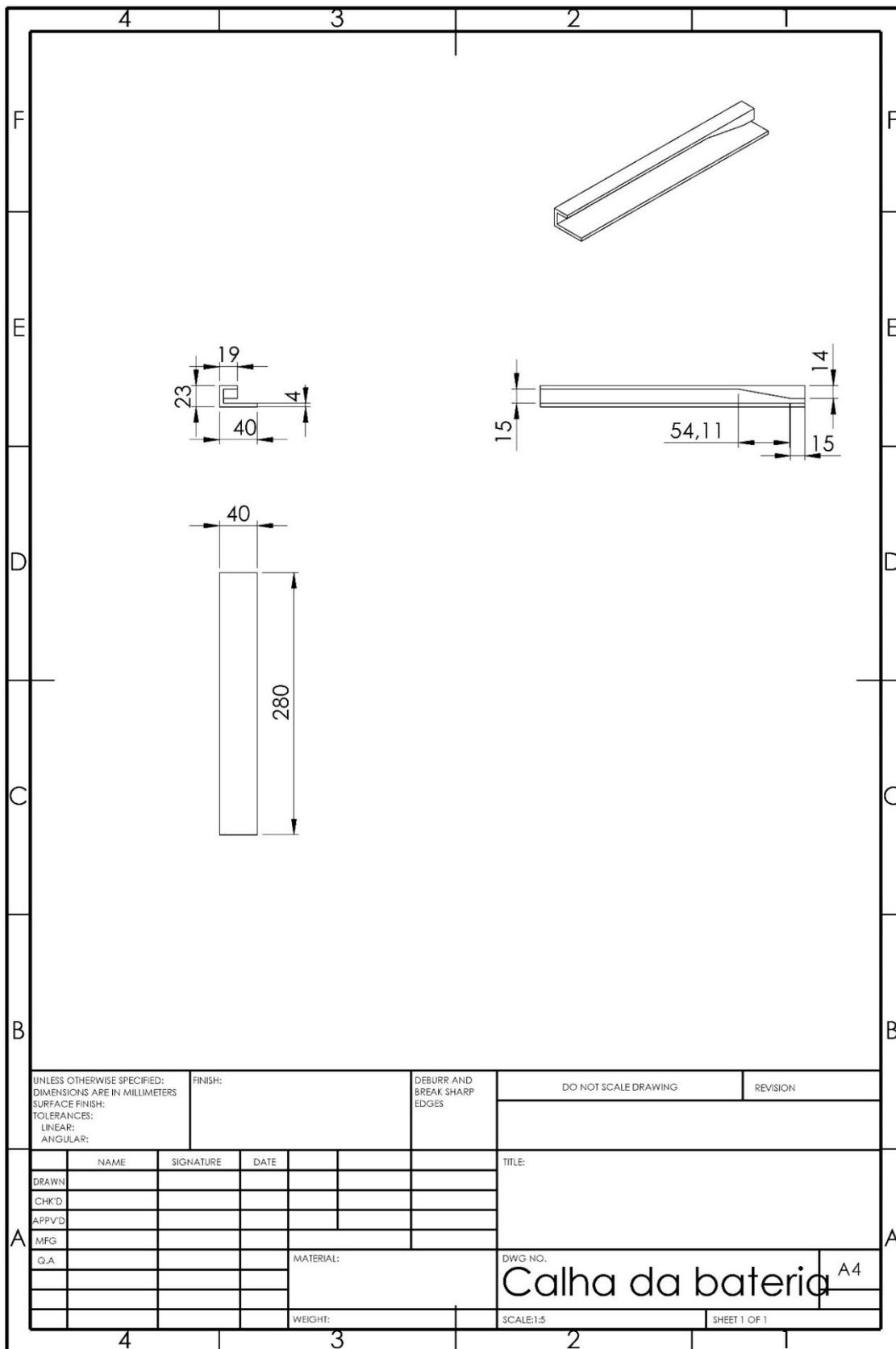


Figura 87 - Desenho técnico da calha das baterias

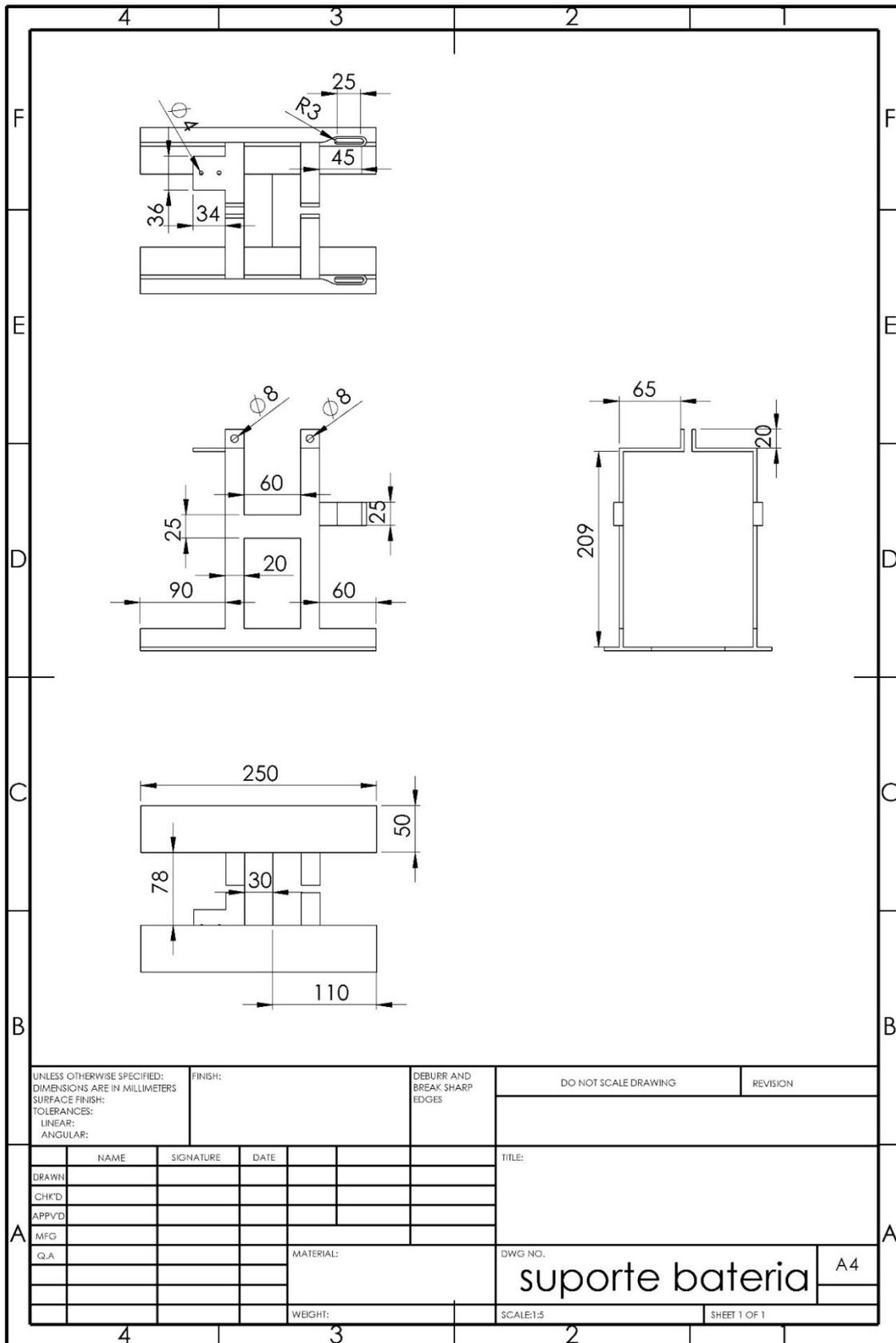


Figura 88 - Desenho técnico do suporte da bateria.

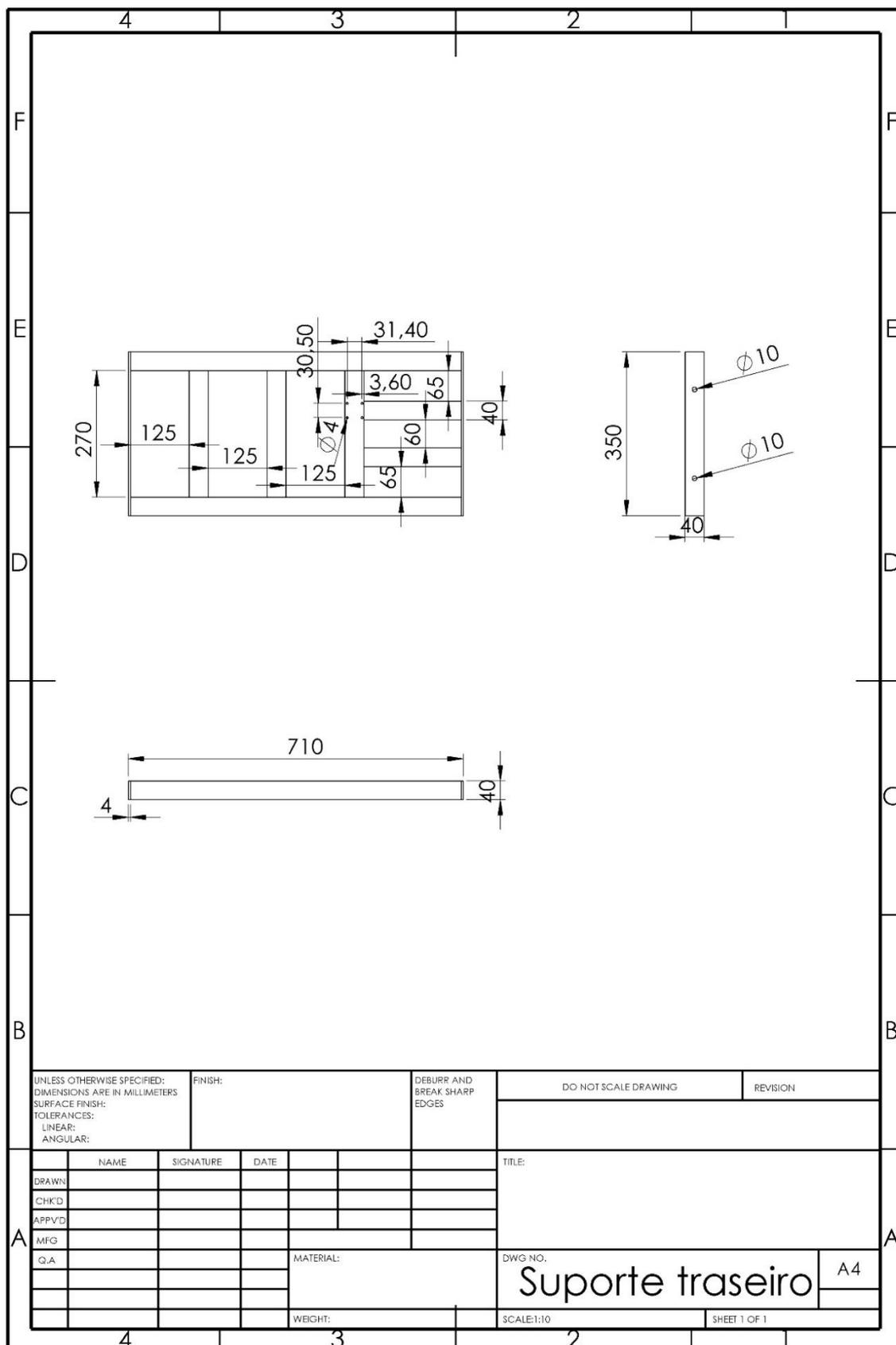


Figura 89 - Desenho técnico do suporte traseiro para o depósito e caixa de carga.

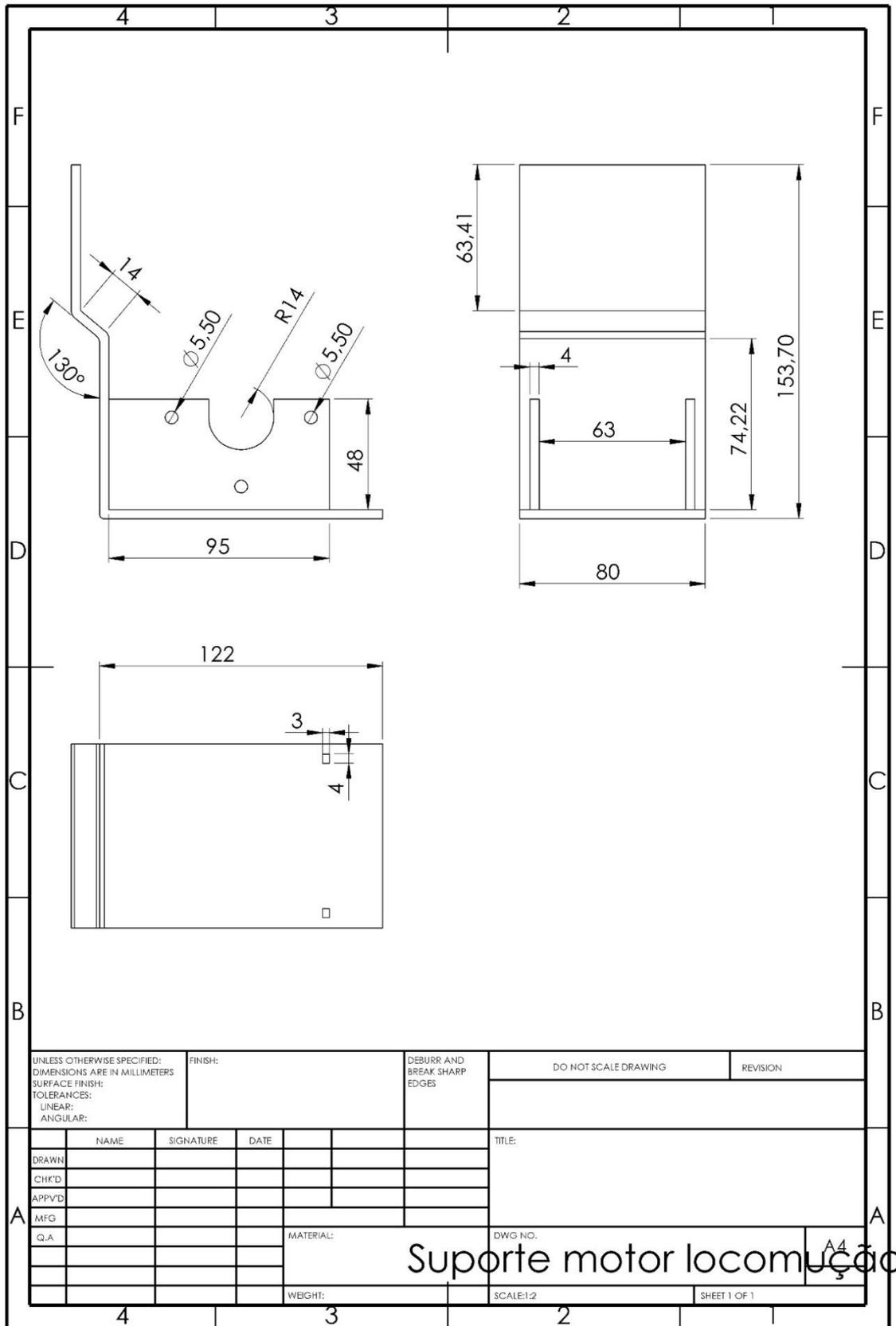


Figura 90 - Desenho técnico dos suportes do motor de locomoção.

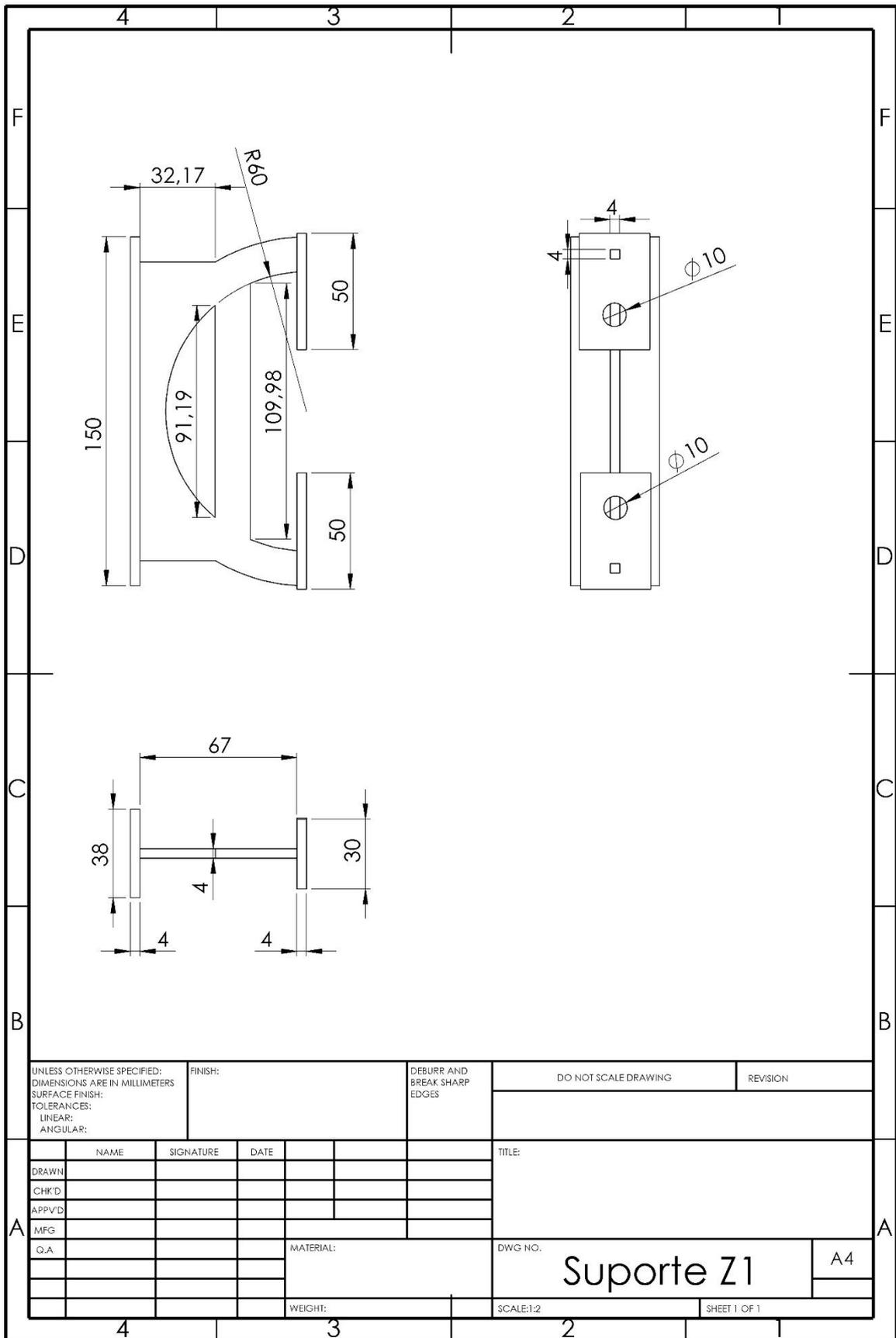


Figura 91 - Desenho técnico do suporte do eixo z₁.

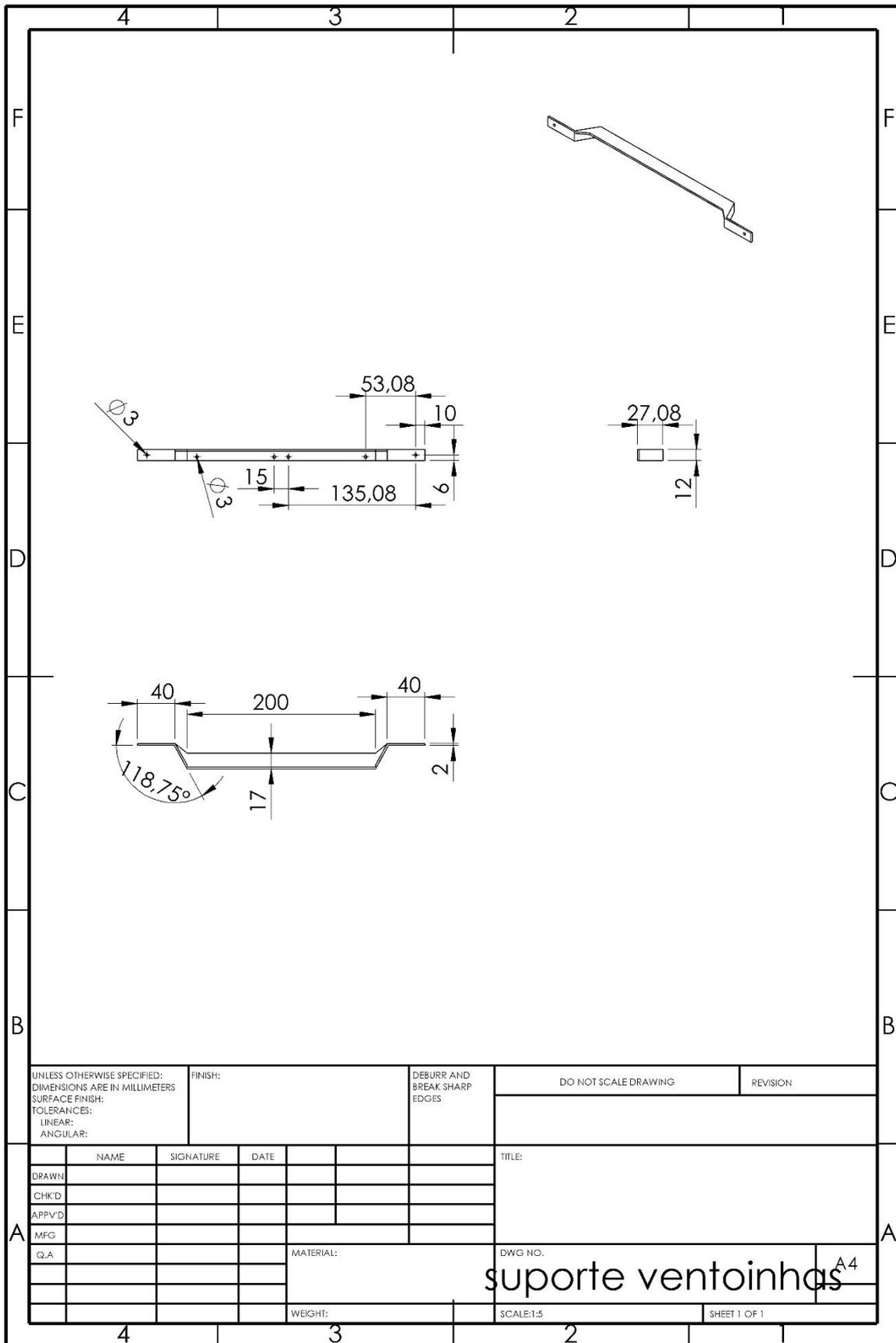


Figura 92 - Desenho técnico dos suportes das ventoinhas.

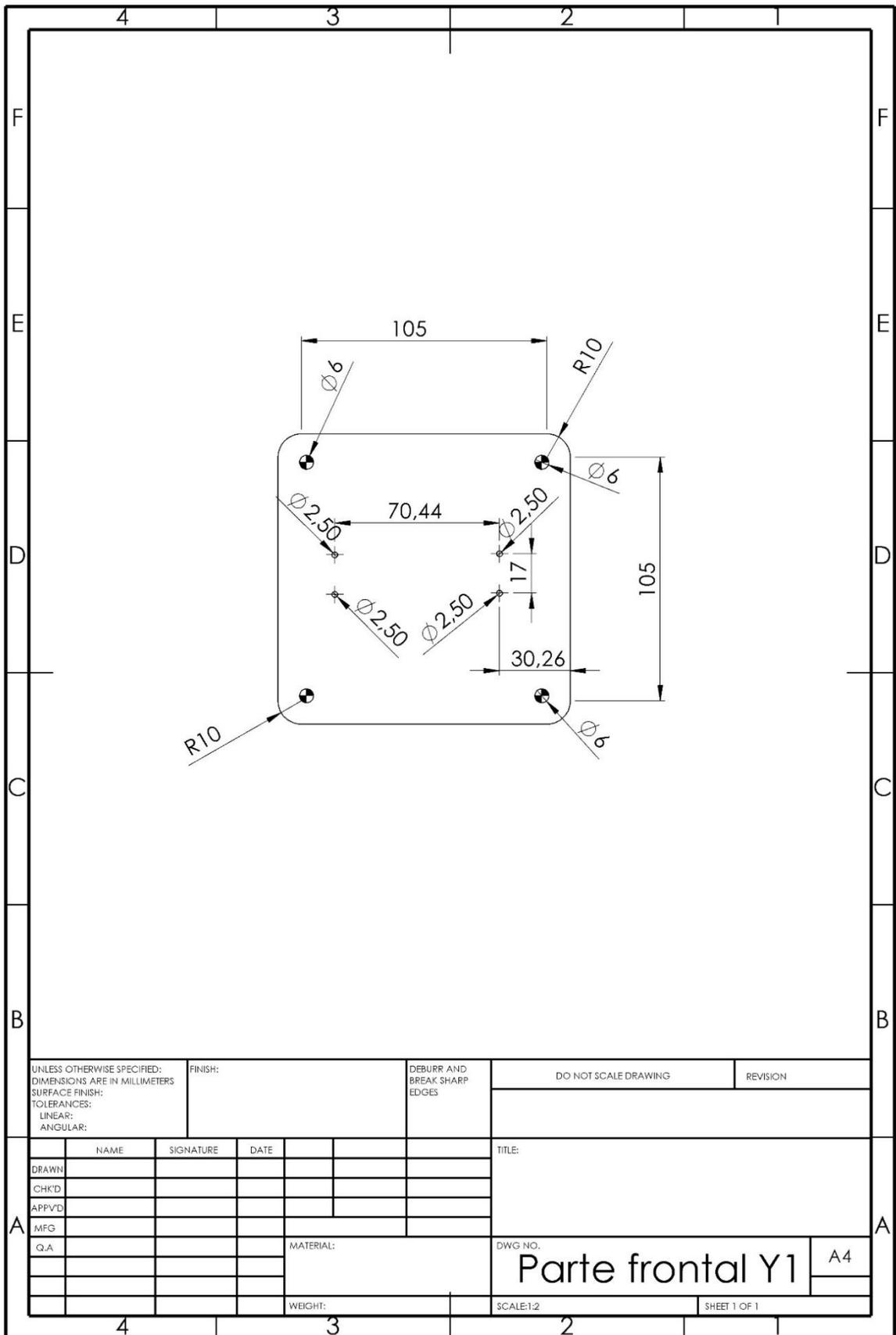


Figura 93 - Desenho técnico da parte frontal do eixo y_1 .

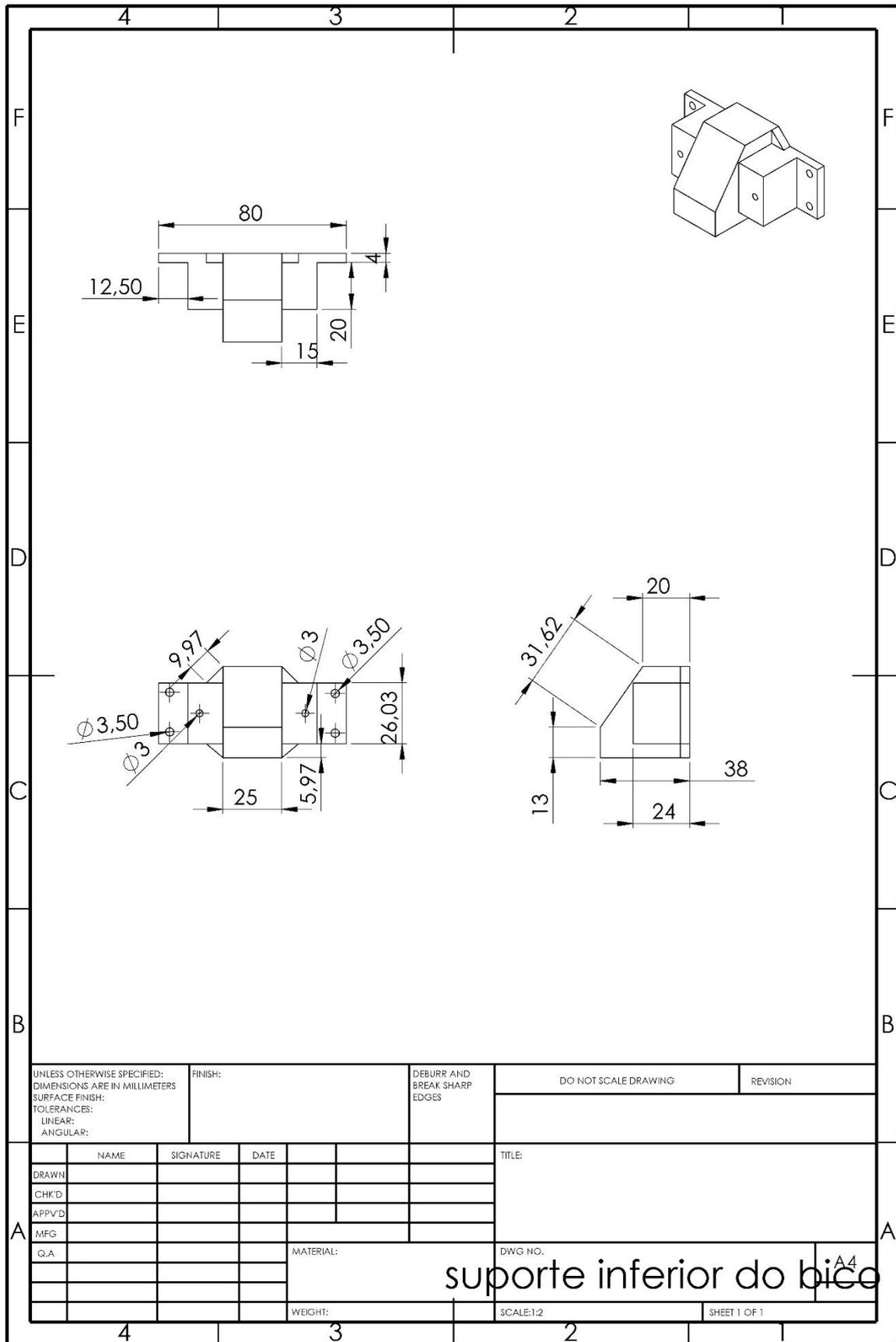


Figura 94 - Desenho técnico do suporte inferior do bico de pulverização.

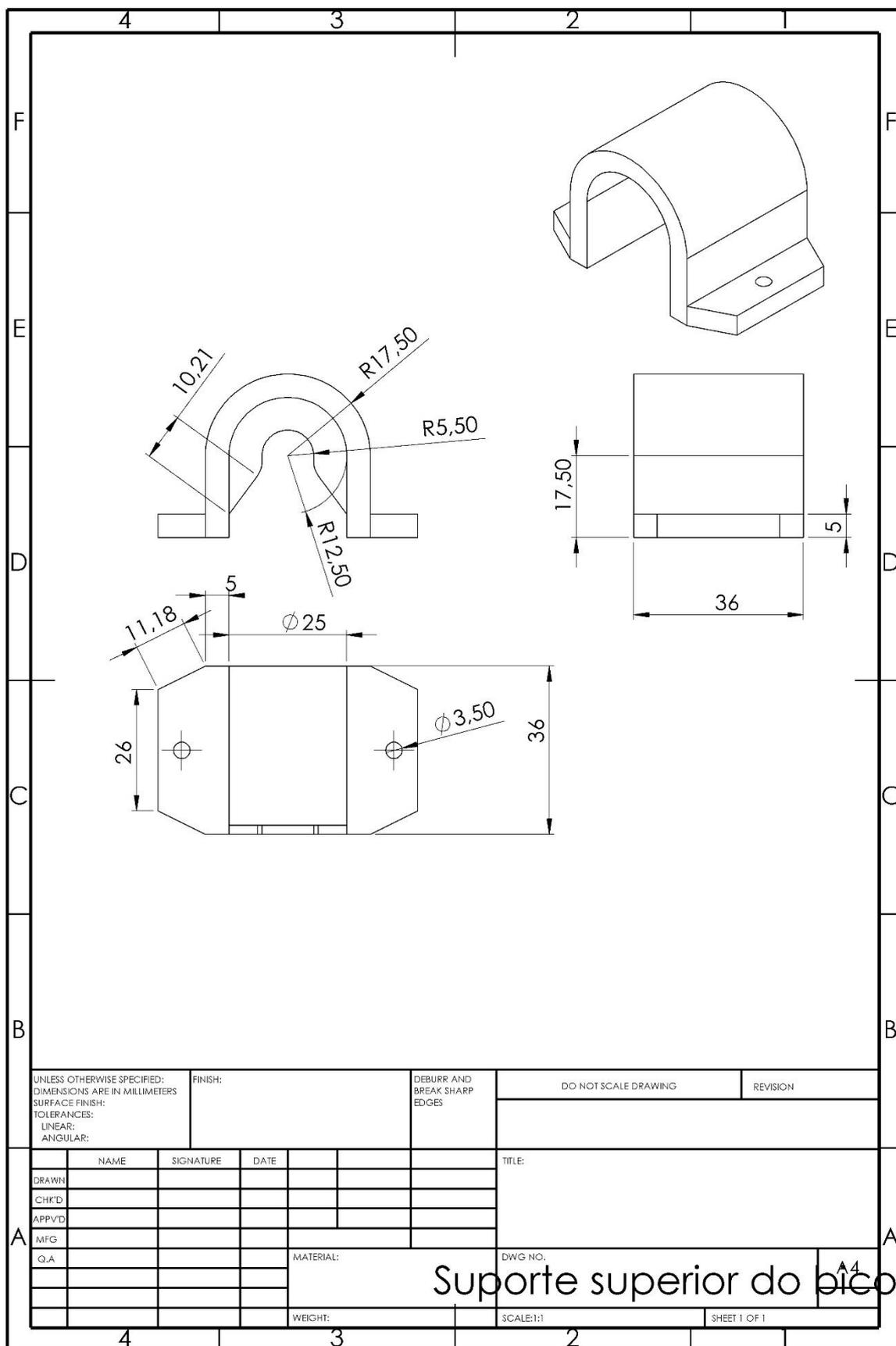


Figura 95 - Desenho técnico do suporte superior do bico de pulverização.