



# **Sistema robótico cooperativo móvel autónomo por abordagem líder-seguidor Aplicação ao transporte de palotes**

**Ricardo Emanuel Reis Nunes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
2º Ciclo de Estudos

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

**outubro de 2023**



## **Declaração de Integridade**

Eu, Ricardo Emanuel Reis Nunes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10348 de/o Mestrado em Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã

09/10/2023



## **Agradecimentos**

Agradeço a todas as pessoas envolvidas na minha vida, que sempre me apoiaram e aconselharam em todas as decisões. Nem sempre foi fácil, com alturas atribuladas onde sem a ajuda deles seria impossível terminar esta jornada.

Agradeço ao meu orientador, Professor Pedro Dinis Gaspar por me apoiar e ajudar ao longo deste tempo para o desenvolvimento correto deste projeto.



## Resumo

Desde tempos longínquos que o ser humano tenta encontrar formas e maneiras de modo a facilitar e simplificar todas as tarefas necessárias para a agricultura, desde o cultivo, ao trato e à sua colheita. Milhares de anos passaram e com isso veio o conhecimento de melhores maneiras de cultivo, as épocas e o seu tratamento, tanto para uma melhor qualidade como para uma maior quantidade. Essa evolução de conhecimento aliado ao avanço tecnológico traduz-se no desenvolvimento de robôs nas diversas áreas da agricultura, contribuindo assim para a chamada *Indústria 4.0*.

Nos dias que correm existe um grande consumo de frutas, o que reflete numa grande necessidade de mão-de-obra, que por sua vez é cada vez mais escassa. Maioritariamente os terrenos agrícolas situam-se em zonas longe das grandes cidades e com o passar dos anos tem-se verificado uma grande despovoação nestas áreas, juntamente com o aumento da média de idades dos habitantes. Estes fatores obrigam a que existam alternativas para combater a pouca mão-de-obra face ao aumento da procura. Uma dessas alternativas é a utilização de robôs nas diferentes tarefas agrícolas. Esta dissertação tem como principal foco a construção de uma estrutura metálica autónoma capaz de suportar e transportar palotes de fruta até 500kg em solo agrícola, auxiliando o processo de apanha de fruta, reduzindo o esforço físico e reduzindo a necessidade de mão-de-obra. O robô é capaz de acompanhar um outro que apanha a fruta caída no chão e a coloca no palote até este ter 500kg de produto. Quando tiver esse peso, é capaz de ir colocar o palote num sítio previamente designado e apanhar um outro vazio e volta a acompanhar o robô de apanha para começar um novo ciclo. Tudo isto será possível graças aos sensores implementados no robô. A implementação de sensores é completamente imprescindível, pois sem estes era impossível o robô ser completamente autónomo. São utilizados diversos sensores como, sensores de GPS, sensores de temperatura, células de carga, sensores IMU. Estes diversos sensores estão interligados a um Arduíno que faz a parte de controlo, processando assim a informação enviada pelos sensores. Este é constituído por uma estrutura em aço capaz de suportar todo o peso a que está sujeito. Para que exista locomoção, são ser implementados 4 motores elétricos independentes, um por cada roda, facilitando o ângulo de viragem, visto que como cada

roda será independente ele é capaz de girar em torno do seu próprio eixo. O robô para ser totalmente independente possui sensores de distância, de temperatura para prevenir que o robô trabalhe em situações de calor extremas e assim danificar a bateria ou algum componente eletrônico. Também são integrados sensores de velocidade, de posição e de GPS. Para o sistema de controlo e de processamento de informação é utilizado um Arduino Mega capaz de recolher toda a informação obtida através dos sensores e através dela tomar decisões de trajeto, carga/descarga.

## **Palavras-chave**

Robótica, Robô autónomo, transporte fruta, Agricultura 4.0, Indústria 4.0, Agricultura, Sensor, Arduino

## **Abstract**

Since ancient times, human beings have tried to find ways and means to facilitate and simplify all the tasks necessary for agriculture, from cultivation, processing and harvesting. Thousands of years have passed and with that came the knowledge of better cultivation methods, seasons and treatment, both for better quality and greater quantity. This evolution of knowledge combined with technological advancement translates into the development of robots in different areas of agriculture, thus contributing to the so-called Industry 4.0.

These days there is a large consumption of fruit, which reflects a great need for labor, which in turn is increasingly scarce. Most of the agricultural land is located in areas far from large cities and over the years there has been a great depopulation in these areas, together with the increase in the average age of the inhabitants. These factors require that there are alternatives to combat the lack of labor in the face of increased demand. One of these alternatives is the use of robots in different agricultural tasks. This dissertation's main focus is the construction of an autonomous metallic structure capable of supporting and transporting pallets of fruit weighing up to 500kg on agricultural land, assisting the fruit picking process, reducing physical effort and reducing the need for labor. The robot is able to follow another robot that picks up the fruit that has fallen on the ground and places it on the pallet until it contains 500kg of product. Once it has that weight, it is able to place the pallet in a previously designated place and pick up another empty one and then follow the picking robot again to start a new cycle. All this will be possible thanks to the sensors implemented in the robot. The implementation of sensors is completely essential, as without them it would be impossible for the robot to be completely autonomous. Various sensors are used, such as GPS sensors, temperature sensors, load cells, IMU sensors. These various sensors are interconnected to an Arduino that performs the control part, thus processing the information sent by the sensors. This is made up of a steel structure capable of supporting all the weight to which it is subjected. For locomotion to exist, 4 independent electric motors must be implemented, one for each wheel, facilitating the turning angle, since as each wheel will be independent

it is capable of rotating around its own axis. The robot, to be completely independent, has distance and temperature sensors to prevent the robot from working in extreme heat situations and thus damaging the battery or any electronic component. Speed, position and GPS sensors are also integrated. For the control and information processing system, an Arduino Mega is used, capable of collecting all the information obtained through the sensors and using it to make decisions on the route, loading/unloading.

## **Keywords**

Robotics, Autonomous robot, fruit transport, Agriculture 4.0, Industry 4.0, Agriculture, Sensor, Arduino

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
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.....	3
<b>2. Estado da Arte</b> .....	<b>5</b>
2.1. Evoluções na agricultura .....	5
2.1.1. História .....	5
2.1.2. Agricultura 4.0.....	7
2.1.3. Tecnologias Atuais.....	7
2.2. Robótica na agricultura .....	8
2.2.1. The Thorvald II.....	9
2.2.2. Naïo Technologies' Oz .....	11
2.2.3. Agrobot.....	12
2.3. Formas de Locomoção.....	13
2.3.1. Rodas.....	13
2.3.2. Lagartas.....	14
2.4. Sensores.....	15
2.4.1. Sensores Mecânicos.....	15
2.4.2. Sensores Magnéticos .....	16
2.4.3. Sensores Térmicos.....	16
2.4.4. Sensores de Força/Toque.....	17
2.4.5. Sensores LiDAR.....	18
2.4.6. Sensores IMU .....	18

---

2.4.7. Sensor GPS .....	19
2.5. Motores elétricos .....	20
2.5.1. Motores de Corrente Contínua .....	20
2.5.2. Motores de passo.....	20
2.6. Microcontrolador Arduíno .....	20
2.6.1. Arduíno Uno .....	21
2.6.2. Arduíno Mega .....	21
2.7. Nota Conclusiva .....	22
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>25</b>
3.1. Materiais .....	25
3.1.1. Estrutura.....	25
3.1.2. Locomoção.....	26
3.1.3. Dimensionamento de motores .....	27
3.1.4. Eletrónica.....	36
3.1.5. Sensores .....	36
3.1.6. Sistema de energia .....	40
3.1.7. Dimensionamento da energia da bateria .....	41
3.1.8. Sistemas de proteção .....	44
3.2. Métodos.....	46
3.2.1. Desenhos.....	46
3.2.2. Esboço estrutural .....	47
3.2.3. Análise estrutural .....	50
3.2.4. Esquema de ligação.....	53
3.2.5. Dimensionamento da cablagem .....	56
3.2.6. Sistema perseguidor.....	58
3.2.7. Código .....	60
3.3. Nota conclusiva.....	67
<b>4. Análise de Discussão de Resultados .....</b>	<b>69</b>
4.1. Introdução.....	69
4.1.1. Cálculo do peso do robô.....	69
4.1.2. Controlo .....	72
4.2. Nota conclusiva.....	82
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>83</b>
5.1. Conclusões gerais .....	83
5.2. Sugestões de trabalhos futuros .....	84
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>85</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DAS REVOLUÇÕES SOFRIDAS NA AGRICULTURA (ZHAI <i>ET AL.</i> , 2020).....	6
FIGURA 2. ROBÔ DE DETEÇÃO ERVAS DANINHAS (ASTRAND & BAERVELDT, 2002). .....	9
FIGURA 3. THE THORBALD II ( GRIMSTAD & FROM, 2017). .....	10
FIGURA 4. THE THORBALD II - LUZ UV (GRIMSTAD & FROM, 2017).....	11
FIGURA 5. NAÏO TECHNOLOGIES' Oz (ROBERT <i>ET AL.</i> , 2020). .....	12
FIGURA 6. AGROBOT (DEFTERLI, 2021).....	13
FIGURA 7. RODAS PNEUMÁTICAS, SAKAWA - 400x8.....	14
FIGURA 8. ROBÔ PHOENIX DE LAGARTAS (SITE LINAK). .....	15
FIGURA 9. FIM DE CURSO, KAP-M3L.....	16
FIGURA 10. SENSOR MÁGNETICO, WEG - LINHA SL. ....	16
FIGURA 11. SENSOR TÉRMICO. WAVESHARE, MLX90640-D55.....	17
FIGURA 12. EXEMPLO RESISTÊNCIA DE UM MATERIAL. ....	17
FIGURA 13. VISTA SENSOR LIDAR. ....	18
FIGURA 14. SENSOR IMU. DIGILENT, PMOD NAV. ....	19
FIGURA 15. ESQUEMA SATÉLITES ESPAÇO. ....	19
FIGURA 16. EXEMPLO ARDUINO UNO (NAYYAR <i>ET AL.</i> , 2016). ....	21
FIGURA 17. ARDUINO MEGA (NAYYAR <i>ET AL.</i> , 2016).....	22
FIGURA 18. FRENTE DO ROBÔ (TABASSUM <i>ET AL.</i> , 2017). ....	22
FIGURA 19. RODA DE TRACÇÃO, TOYAMA, 500-12.....	27
FIGURA 20. ESQUEMA DE FORÇAS. ....	27
FIGURA 21. MOTOR ATO, MODELO ATOD-110BLD1500-48A.....	30
FIGURA 22. CONTROLADOR ATO BLD-50A.....	32
FIGURA 23. ESQUEMA LIGAÇÃO ATO BLD-50A.....	33
FIGURA 24. CONTROLADOR DA DFRobot COM O MODELO QUAD MOTOR DRIVE. ....	34
FIGURA 25. ATUADOR DA MARCA KALATEC COM O MODELO KTC-LA-J-B. ....	34
FIGURA 26. ESQUEMA DE LIGAÇÕES PARA MOTOR COM MICROSTEP TB6600 E ARDUÍNO.....	35
FIGURA 27. ESQUEMA ARDUINO MEGA. ....	36
FIGURA 28. SENSOR GPS, UBLOX - VK2828U7G5LF. ....	37
FIGURA 29. SENSOR IMU, MPU-6050.....	37
FIGURA 30. SENSOR HC-SR04.....	38
FIGURA 31. CÉLULA DE CARGA ZEMIC 150 KG.....	38
FIGURA 32. LOAD COMBINATOR.....	39

FIGURA 33. AMPLIFICADOR SINAL.....	39
FIGURA 34. ESQUEMA DE LIGAÇÕES ENTRA AS CÉLULAS DE CARGA E O ARDUÍNO.....	40
FIGURA 35. BATERIA SLBATT, LIFePO4.....	43
FIGURA 36. TRANSFORMADOR ORION-Tr   12-20. ....	43
FIGURA 37. FUSIVEL DA MACA LITTLEFUSE. ....	44
FIGURA 38. SEPARADOR GALVANICO DA MARCA APLISENS COM O MODELO SP-11. ....	45
FIGURA 39. SOFTWARE FUSION 360: CAD, CAE E CAM.....	46
FIGURA 40. PALOTE. ....	47
FIGURA 41. PRIMEIRO ESBOÇO ESTRUTURAL.....	47
FIGURA 42. SEGUNDO ESBOÇO ESTRUTURAL. ....	48
FIGURA 43. CÉLULA DE CARGA REBATIDA. ....	48
FIGURA 44. ESBOÇO DA LOCALIZAÇÃO DA ELETRÔNICA.....	49
FIGURA 45. ESBOÇO DA LOCALIZAÇÃO DA BATERIA.....	49
FIGURA 46. DESTAQUE VENTOINHAS. ....	50
FIGURA 47. PREVISÃO DO DESLOCAMENTO ATRAVÉS DO <i>FUSION 360</i> .....	51
FIGURA 48. PREVISÃO DA TENSÃO SUPOSTADA ATRAVÉS DO <i>FUSION 360</i> .....	52
FIGURA 49. PREVISÃO DA DEFORMAÇÕES ATRAVÉS DO <i>FUSION 360</i> .....	52
FIGURA 50. ESQUEMA DE LIGAÇÃO. ....	53
FIGURA 51.ESQUEMA LIGAÇÃO ARDUINO-ATO BLD50A-MOTOR.....	54
FIGURA 52. ESQUEMA LIGAÇÃO ARDUINO-TB6600-ATUADOR. ....	54
FIGURA 53. ESQUEMA DO SISTEMA DE POTÊNCIA PRINCIPAL.....	55
FIGURA 54. ESQUEMA LIGAÇÃO SENSORES – ARDUINO.....	56
FIGURA 55. CABO PV-ZZ-F 10MM <sup>2</sup> .....	58
FIGURA 56. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA.....	58
FIGURA 57. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA.....	59
FIGURA 58. FLUXOGRAMA DO CONTROLO.....	61
FIGURA 59. FUNÇÃO 1.1. VELOCIDADE CONSTANTE. ....	73
FIGURA 60. FUNÇÃO 1.2. AUMENTO VELOCIDADE A DIREITO.....	74
FIGURA 61. FUNÇÃO 1.3. VELOCIDADE MÁXIMA A DIREITO.....	75
FIGURA 62. FUNÇÃO 2.1. DISTÂNCIA LADO ESQUERDO 10°. ....	77
FIGURA 63. FUNÇÃO 2.1. SIMULAÇÃO VIRAR À DIREITA 10°. ....	77
FIGURA 64. FUNÇÃO 2.2. DISTÂNCIA LADO ESQUERDO 30°. ....	78
FIGURA 65. FUNÇÃO 2.2. SIMULAÇÃO VIRAR À DIREITA 30°. ....	79
FIGURA 66. FUNÇÃO 2.3. DISTÂNCIA LADO ESQUERDO 50°. ....	80
FIGURA 67. FUNÇÃO 2.3. SIMULAÇÃO VIRAR À DIREITA 50°. ....	80





---

## Lista de Tabelas

TABELA 1. MATRIZ DECISÃO: MATERIAL.....	25
TABELA 2. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS (SHIGLEY, 2011).....	26
TABELA 3. MATRIZ DECISÃO: MEIOS DE LOCOMOÇÃO.....	26
TABELA 4. COEFICIENTE DE ATRITO (KOSHKIN & SHIRKÉVICH, 1975).....	28
TABELA 5. TABELA CONSUMO DE CORRENTE.....	35
TABELA 6. MATRIZ DECISÃO TIPO DE BATERIA.....	41
TABELA 7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS FUSIVEL.....	44
TABELA 8. CONFIGURAÇÕES DE ENTRADA.....	45
TABELA 9. RESISTIVIDADE DO COBRE.....	57
TABELA 10. PESO DO TUBO 100x100x2, (AÇOS CONTINENTE, 2010).....	69
TABELA 11. PESO DOS COMPONENTES.....	70
TABELA 12. CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES.....	72
TABELA 13. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA DISTÂNCIA DOS SENSORES NA GAMA $45 < x < 55$ .....	73
TABELA 14. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA DISTÂNCIA DOS SENSORES NA GAMA $55 < x < 75$ .....	74
TABELA 15. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA DISTÂNCIA DOS SENSORES DE $x > 75$ .....	75
TABELA 16. FUNÇÃO 2.1. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA VIRAR À DIREITA $10^\circ$ .....	76
TABELA 17. FUNÇÃO 2.2. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA VIRAR À DIREITA $30^\circ$ .....	78
TABELA 18. FUNÇÃO 2.3. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA VIRAR À DIREITA $50^\circ$ .....	79
TABELA 19. FUNÇÃO 3.1. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA VIRAR À ESQUERDA $10^\circ$ .....	81
TABELA 20. FUNÇÃO 3.2. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA VIRAR À ESQUERDA $30^\circ$ .....	81
TABELA 21. FUNÇÃO 3.3. ALIMENTAÇÃO DOS MOTORES PARA VIRAR À ESQUERDA $50^\circ$ .....	82



## Nomenclatura

### **Geral:**

a	aceleração [m/s <sup>2</sup> ];
D	Diâmetro [m];
E	Energia [Wh];
F	Força [N];
F <sub>a</sub>	Força atrito [N];
g	Aceleração gravítica [m/s <sup>2</sup> ];
I	Intensidade Corrente [A];
m	Massa [kg];
P	Peso [kg];
P	Potência [W];
r	Raio [m];
V	Tensão [V];
T	Binário [Nm];
t	Tempo [s];
S	Secção transversal [mm <sup>2</sup> ];

### ***Índices inferiores:***

In	Entrada;
out	Saída;

### ***Simbologia grega:***

$\alpha$	Ângulo inclinação [°];
$\mu$	Coeficiente de atrito;
$\omega$	Velocidade angular [rad/s];
$\Delta$	Varição;
v	Velocidade linear [m/s];
$\rho$	Resistividade [ $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m];

***Acrónimos:***

2D	Bidimensional;
3D	Tridimensional;
CAD	Computer Aided Design;
CAE	Computer Aided Engineering;
CAM	Computer Aided Manufacturing;
SAE	Society of Automotive Engineers;
AISI	American Iron And Steel Institute;

# 1. Introdução

Vivemos na era da tecnologia, onde todos os dias existe uma constante evolução em todas as vertentes. Constantemente são elaborados estudos para que a tecnologia nos facilite a vida em todas as áreas, e a agricultura não é exceção. Há muitos anos atrás, a agricultura era totalmente desenvolvida em todos os seus processos por mão-de-obra humana. Com os avanços tecnológicos esta condição vem a mudar de dia para dia. Existem imensos fatores que influenciam diretamente a necessidade de mão-de-obra não humana, entre os quais a escassez de pessoas a trabalhar em campos agrícolas (Tibério *et al.*, 2008), o aumento da procura dos alimentos, a qualidade e controlo até à própria segurança das pessoas. Juntando todos estes fatores é de bastante interesse a criação de robôs para otimização da produção de alimentos, desde a plantação, ao tratamento até à colheita. (Mazoyer & Roudart, 2009).

Apesar de já existirem robôs para as diversas áreas da agricultura, desde a plantação, tratamento e análise dos solos até há colheita continua a ser bastante importante a evolução, para uma maior segurança e qualidade do serviço. Há uma etapa da cultura agrícola que tem passada despercebida em maior parte dos pomares. A fruta que cai e fica no solo pode ser reaproveitada numa lógica de economia circular, para produção de fertilizantes naturais como para alimentação animal. Dependendo da quantidade de fruta caída deixada no campo, esta pode ter efeitos prejudiciais para a campanha seguinte, promovendo o estabelecimento de colónias de fungos e bactérias, o que reverte como consequência direta um aumento no gasto de herbicidas e pesticidas. Porém, apanhar toda a fruta que fica caída nos pomares é tarefa com reduzido retorno face ao custo da mão-de-obra em relação ao lucro dessa apanha. Juntando todos este fator é importante o desenvolvimento de robôs capazes de efetuar esta tarefa, é o principal objetivo desta dissertação. É um projeto que tem que ter em conta a locomoção em terrenos agrícolas que são muito irregulares, o sistema de controlo, os sensores, o sistema de navegação independente, a capacidade das baterias, entre outras especificações técnicas e requisitos do processo.

## 1.1. Enquadramento

*“Consequência da falta de competitividade agrícola é o abandono da atividade e o despovoamento, particularmente se as possibilidades de recurso e atividades alternativas ou complementares forem limitadas” 1 (Tibério *et al.*, 2008).*

Já foi tempo em que a agricultura era somente semear e colher. Estima-se que até 2050 a população mundial deverá chegar a cerca de 9,8 mil milhões de pessoas. Devido a esse facto, a agricultura está sob uma enorme pressão para conseguir corresponder à enorme procura por alimentos (Juliane & Fabio, 2020). Perante este cenário de enorme crescimento da população é obrigatoriamente necessário aumentar a produção de alimentos, o que com a diminuição de mão-de-obra qualificada torna-se uma tarefa bastante difícil. Como vivemos na era da tecnologia é imprescindível não abdicar dela neste setor para se conseguir corresponder à procura de alimentos com qualidade. Graças aos avanços atuais tecnológicos é possível estudar o clima e o solo com detalhe, de maneira a produzir mais, com melhor qualidade e com mais rapidez. (Aggarwal *et al.*, 2019).

Um grande avanço somente conseguido nas últimas décadas foi a introdução de robôs de locomoção totalmente independentes. Estes são capazes de transportar utensílios, alimentos, fertilizantes pelos terrenos agrícolas adaptando-se ao solo em questão (Gomes *et al.*, 2016). Nesta presente dissertação vai ser estudado um robô de locomoção de frutas desde o pomar até ao armazém.

## **1.2. O problema em estudo e a sua relevância**

A agricultura é fundamental para a sobrevivência da humanidade, e cada vez enfrenta mais problemas, a desertificação das áreas rurais, falta de mão-de-obra, escassez dos recursos, o aumento da procura, a degradação dos solos, alterações climáticas, etc (Zhai *et al.*, 2020). Com todos esta contrariedade é de interesse comum o desenvolvimento de técnicas capazes de solucionar alguns dos principais problemas. Com os avanços tecnológicos a crescer exponencialmente foram criadas formas decisivas para a preparação do solo, a irrigação, a plantação de sementes, adubação e controlo de pragas, controlo, qualidade e colheita (De Clercq *et al.*, 2018).

O presente problema em estudo reside na falta de mão-de-obra nos pomares na colheita de frutas. Nos dias que correm existem cada vez menos pessoas a trabalhar em campos agrícolas, pelo que é de elevada importância a criação de alternativas para combater este problema. Com recurso às novas tecnologias vai ser elaborado um projeto de um robô autónomo de locomoção para transporte de frutas. Este será capaz de transportar até 500 kg de fruta desde o pomar até ao local de armazenamento, não precisando de força humana para realizar qualquer tarefa.

## **1.3. Objetivos e contribuição da dissertação**

O principal objetivo desta presente dissertação reside no projeto de um robô autónomo de transporte de frutas desde o pomar até ao armazém. Este será capaz de se locomover

paralelamente a um outro que apanha a fruta do chão. Ambos trabalharão em conjunto, o que apanha a fruta do chão deita a mesma para o palote inserido no robô até esta caixa ter 500 kg. Atingido o peso, este desloca-se ao local pré-definido e deixa o palote. Quando esta primeira tarefa estiver concluída, o robô será capaz de carregar um palote autonomamente e voltar para o lado do robô que apanha a fruta do chão.

Para tal projetada uma estrutura metálica automatizada capaz de suportar 500 kg de fruta para transportar desde o pomar até ao armazém de destino. Existem diversas opções para satisfazer os requisitos necessários para este projeto, onde todas as decisões da escolha do metal, sistema de controlo e sistema de locomoção irão ser tomadas por matrizes decisão. Esperando assim elaborar um robô robusto capaz de se adaptar ao solo agrícola. Através de softwares computacionais irão ser elaboradas, análises estruturais ao tipo de metal, desenhos técnicos, esboços e simulação de circuitos.

O trabalho de apanha de fruta requer muita mão-de-obra humana, o que nos tempos de hoje está bastante escassa devido a diversos fatores anteriormente referidos. Com este robot será mais fácil e mais rápido o transporte.

#### **1.4. Visão geral e organização da dissertação**

A presente dissertação está estruturada em quatro partes distintas, onde é elaborada uma abordagem abrangente à temática dos robôs agrícolas, salientando a relevância na atualidade.

O primeiro capítulo é a introdução onde se faz referência à importância dos robôs agrícolas no presente. Foi elaborado um enquadramento teórico onde se destaca a relevância da automação na agricultura, realçando os desafios que a agricultura enfrenta, tais como o aumento da produtividade imposta pelo aumento da população.

O segundo capítulo é referente ao estudo da arte, onde se identificou e analisou diversos tipos de robôs agrícolas existentes, bem como as suas principais tecnologias. Além disso, foram abordadas as tecnologias mais utilizadas nestes sistemas, incluindo os sensores e sistemas de navegação autónoma.

O terceiro capítulo é dedicado aos materiais e métodos, onde se procede à elaboração de cálculos detalhados e à seleção das matérias a utilizar na construção do robô. Foram escolhidos os materiais a utilizar, tais como, motores, sensores, eletrónica, bateria e tipo de material da estrutura. Foram elaborados esboços do robô até se chegar a uma versão final, assim como os esquemas elétricos. Foi também elaborado todo o código de controlo para os motores, de forma a cumprir todos os critérios impostos.

O quarto capítulo é referente à análise e discussão dos resultados, onde é realizada a validação das matérias escolhidos, com base nos dados finais, como peso e potência do robô. Foi elaborada uma análise minuciosa ao código de controle, onde se podem verificar as velocidades e tensões consoante os requisitos impostos.

No capítulo final realiza-se uma análise minuciosa do projeto desenvolvido. Neste capítulo são avaliados todos os aspetos importantes identificando os desafios encontrados e as soluções para estes. É elaborada uma reflexão sobre a importância da utilização dos materiais e qual a eficácia do sistema. São delineados pontos de melhoria de modo a contribuir para trabalhos futuros.

## **2. Estado da Arte**

### **2.1. Evoluções na agricultura**

#### **2.1.1. História**

A agricultura é sensivelmente uma das práticas mais antigas de sempre. Antes de se saber que era possível o cultivo, os povos, nómadas, colhiam o que crescia naturalmente nos terrenos, fazendo com que andassem sempre em movimento à procura de alimentos. O mesmo acontece ainda nos dias de hoje com os animais que se deslocam para onde há mais alimentos nas diversas estações do ano. No período Neolítico face às necessidades impostas pelo aumento da quantidade de pessoas e da procura, começaram-se a desenvolver técnicas de cultivo e utensílios, o que permitiu ao ser humano fixar-se numa determinada região. Com o cultivo de alimentos também foi possível o desenvolvimento da agropecuária, podendo assim criar animais, tanto para alimento como para trabalho nos campos agrícolas, exemplo dos bois para puxar as charruas, iniciando assim a agricultura tradicional. Com o passar dos anos, e com o intuito de facilitar o quotidiano e responder ao crescimento da população foram-se desenvolvendo práticas. O avanço da expansão marítima foi uma grande ajuda que contribuiu para que diversas civilizações, com diferentes culturas e solos discutissem as formas de cultivo e os utensílios, permitindo assim uma troca de conhecimentos importantíssima. Esta época é denominada de agricultura 1.0, onde todo o cultivo é baseado em utensílios simples como enxadas que requerem a força do ser humano e charruas de tração animal. Toda esta época foi marcada por pequenas alterações ou avanços e durou durante milhares de anos até à Revolução Industrial no Século XIX (Mazoyer & Roudart, 2009).

A chamada agricultura moderna começou a ter início na revolução industrial, onde tudo começava a ser mais mecanizado e começou a existir mais conhecimento científico. No século XX começou a agricultura 2.0. Com o aparecimento dos motores de combustão, foram inventados os tratores. Estes vieram acelerar todo o processo de cultivo e de colheita. A ciência teve um papel importantíssimo nesta época, desenvolvendo produtos para controlar fungos, bactérias e outras pragas nos cultivos, os designados pesticidas.

Nas últimas 3 décadas, observou-se um conceito com o objetivo de minimizar os custos de cultivo, reduzir o impacto ambiental provocado por fertilizantes e pesticidas, mas sempre preocupados

em aumentar a produção. Então, entre 1990 e 2010 a agricultura é designada por uma agricultura de precisão, a agricultura 3.0, que tem como principal objetivo a gestão da agricultura, onde são utilizadas técnicas digitais para monitorizar e controlar todos os processos na produção. A agricultura de precisão veio dizer as quantidades específicas de fertilizantes a utilizar para uma determinada área, a quantidade de alimento necessária para os animais, a quantidade específica de pesticidas para cada alimento consoante a área. Esta agricultura mede especificamente as necessidades e adapta-as, através de sensores, tecnologias de posicionamento, navegação por satélite (Ajena, 2018).

Na última década existiu um grande avanço na tecnologia, que veio otimizar todo o processo da produção. Graças a estes avanços é possível monitorizar e analisar um grande volume de dados, facilitando assim todo o processo de cultivo e permitindo o aumento da produção. Está-se presente na Indústria 4.0, onde a agricultura não é exceção, e passa-se da agricultura 3.0 para a agricultura 4.0, que veio aprimorar a agricultura de precisão, ajudando assim na integração de maquinaria nos *softwares* de gestão, todo o estudo dos solos, controlo de pragas, colheita, armazenamento e distribuição. Todos estes processos estão automatizados e mais fáceis que nunca de serem utilizados. Assim, desde o pequeno ao grande agricultor é possível adaptar meios e métodos que ajudem nas tarefas (Araújo *et al.*, 2021). A Figura 1 apresenta uma evolução cronológica das várias revoluções que a agricultura sofreu, descrevendo os fatores que promoveram essa revolução, assim como as suas principais características.

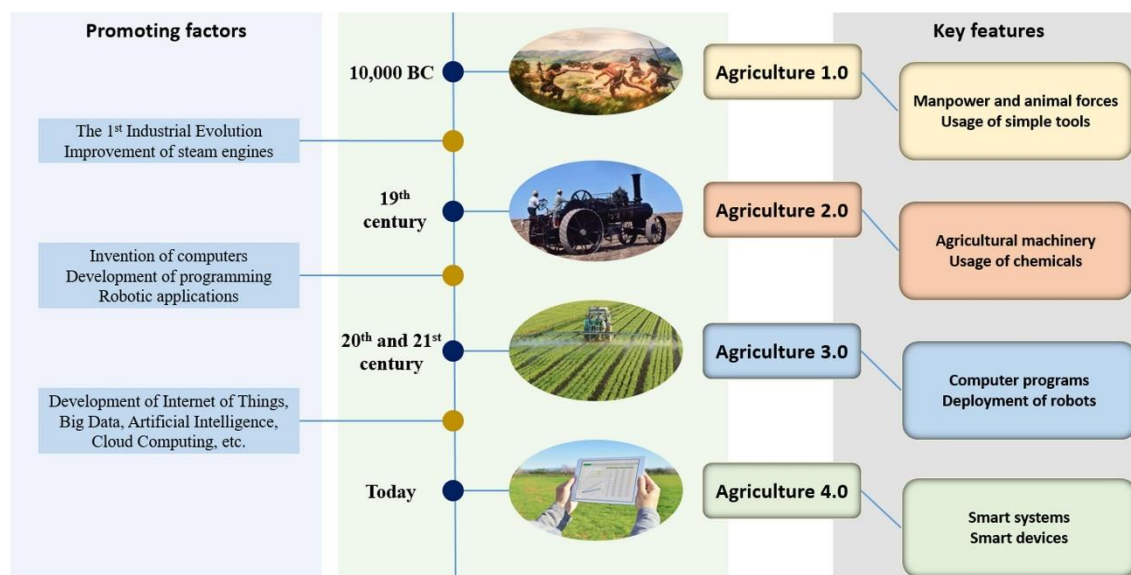


Figura 1. Evolução cronológica das revoluções sofridas na agricultura (Zhai *et al.*, 2020).

### **2.1.2. Agricultura 4.0**

Com o forte crescimento da população mundial, a procura por alimentos também sofre alterações, o que resulta numa enorme pressão na produção agrícola para conseguir satisfazer toda a procura. Assim sendo, estamos presentes a quarta revolução da agricultura, a agricultura 4.0, que tem como principais objetivos, aumentar a produtividade, aproveitamento dos recursos existentes, adaptar a produção às diferentes realidades climáticas, evitar todo o desperdício envolvente. Sempre que os avanços tecnológicos são adaptados na agricultura 4.0, existe uma menor probabilidade de falha, isto é, haverá uma maior base de dados como informações meteorológicas, das condições do solo, qual a procura por um determinado alimento e depois de serem todos processados através de *softwares*, ajudará ao produtor tomar as suas decisões com fundamentos (Zhai *et al.*, 2020). Com a revolução da mecanização dos equipamentos, hoje em dia eles são amplamente utilizados durante todo o processo de produção desde a preparação das terras, a plantação, fertilização, tratamento, colheita e toda a distribuição, reduzindo assim todo o trabalho manual implícito nestas tarefas, aumentando assim a produtividade, para que com menos agricultores se consiga ter mais produto final com o principal objetivo de conseguir responder toda a procura por alimentos face ao crescimento global (Liu *et al.*, 2020). É bastante interessante de observar toda esta evolução na produção. Graças aos avanços tecnológicos é possível integrar sistemas de comunicação na produção agrícola, resultando numa melhoria na qualidade dos produtos. Através de sensores é possível medir o estado do solo e das plantas para que exista um controlo preciso sobre o microclima. Existem também sistemas que monitorizam e elaboram uma previsão dos rendimentos que a produção vai obter. Apesar de todos os estudos, milhões investidos, a agricultura moderna só conseguiu lugar em pequenos setores de países em desenvolvimento. Aproximadamente 80% dos agricultores da África, 40% dos agricultores da Ásia e América Latina continuam a laborar com equipamentos tradicionais, e onde se estima que somente 15% a 30% têm acesso a tração animal (Mazoyer & Roudart, 2010). A agricultura 4.0 está assim bastante distante em certas localidades. Como consequência direta, essas agriculturas são menos produtivas e mergulham numa crise onde são claramente eliminados por concorrência de produtores mais evoluídos tecnologicamente. Mesmo para países com um melhor acesso às novas tecnologias, a maioria da maquinaria utilizada ainda é pré-digital, isto é, o equipamento é operado manualmente por humanos. Para um bom funcionamento de monitorização e automação na produção tem que existir uma boa conectividade entre as máquinas agrícolas e os softwares de gestão, processo este que é bastante difícil. Todo a monitorização que é efetuado em tempo real nos terrenos de produção através de sensores sem fios tem um elevado custo de implantação e de manutenção (De Clercq *et al.*, 2018).

### **2.1.3. Tecnologias Atuais**

Muito graças à revolução industrial que está numa fase de crescimento exponencial, a agricultura 4.0 ganha bastantes alternativas aos métodos tradicionais utilizados outrora. Através destes

avanços é possível obter informações em tempo real constantemente sobre toda a produção. Atualmente são diversas tecnologias presentes, das quais as mais importantes são:

- Drones e veículos não tripulados;
- Sistemas de monitorização;
- Estufas inteligentes;
- IoT (*Internet of Thing*);

Todo o agricultor é capaz de monitorizar toda a sua produção através da utilização de sensores, drones, câmaras, onde em tempo real, em qualquer dispositivo tem acesso ao estado exato da sua produção. Com estes dados é possível verificar se a produção necessita de algo, como pesticidas, água, entre outros recursos, aumentando assim a produtividade. Através da utilização de drones é possível efetuar voos autónomos nos campos de produção e tirar fotografias, mapear terrenos, ajudar no tratamento da produção. Os veículos autónomos não tripulados trazem como benefício o tratamento do cultivo em zonas específicas do campo de produção, transporte de mercadorias, entre muitas outras tarefas. Através do sistema de GPS e do mapeamento efetuado outrora, estes serão capazes de operar em zonas específicas. Todo o processo só é eficaz se existir métodos de monitorização e de observação para que o agricultor observe o que está a acontecer em tempo real. Os dados obtidos anteriormente através de sensores, câmaras, tem que ser reunido para serem elaborados relatórios, *dashboard's* para que em qualquer local seja possível a sua leitura, identificando assim problemas que possam vir a surgir, os custos associados, entre outros. Sempre com o objetivo de melhorar o rendimento das produções, as estufas inteligentes oferecem medições reais de todos os parâmetros essenciais ao desenvolvimento das plantas e se possível o tratamento necessário sem a supervisão humana. A IoT (*Internet of Thing*) é a ponte de ligação, sendo responsável pelo transporte de informação entre sensores e *softwares* de monitorização por exemplo (Raj *et al.*, 2021).

## **2.2. Robótica na agricultura**

A robótica tem um papel imprescindível na agricultura 4.0. É preciso ir ao ano de 1998 para se encontrar o primeiro robô agrícola com o objetivo de controlar ervas daninhas, desenvolvido por Astrand & Baerveldt (2002). Este robô possuía dois sistemas de visão, um a nível de cinzentos e outro baseado em cores. Através do sistema de visão a cinza era capaz de se guiar formando uma linha criada pelas culturas, e o sistema de visão a cores era capaz de distinguir as culturas das ervas daninhas. Para este feito o robô tinha que levar consigo os computadores, câmaras e todas as respetivas ligações, apesar de robusto era um enorme avanço como podemos observar na Figura 2.



Figura 2. Robô de detecção ervas daninhas (Astrand & Baerveldt, 2002).

A partir deste feito e com a evolução tecnológica de forma abrangente foram criados bastantes protótipos, dos quais são retratados alguns exemplos na seção seguinte.

### **2.2.1. The Thorvald II**

*"Acredito apaixonadamente que a robótica pode fazer uma enorme diferença positiva para os agricultores. A tecnologia está a permitir que um número cada vez maior de trabalhos realizados em muitas quintas seja facilmente transferido para robôs, libertando tempo e recursos para se concentrar nos trabalhos que exigem envolvimento humano. E os resultados estão a apoiar-nos, com os clientes economizando quantidades significativas de tempo/custo de mão-de-obra e melhorando os rendimentos. E ainda estamos apenas no início do que veremos nos próximos anos!" [Pål Johan From, CEO] (site oficial da THORBALD).*

The Thorbald II consiste numa estrutura robótica única capaz de se adaptar através de módulos. Os módulos consistem em ferramentas básicas que se colocam no robô, consoante uma determinada aplicação, ambiente e solo como se pode observar na Figura 3. Todos os acessórios foram desenhados e planeados de maneira que a sua troca seja rápida. Ele é totalmente autónomo graças aos vários sensores que tem incorporado consegue então executar tarefas como colher, transportar, pulverizar e elabora previsões sobre a plantação (Grimstad & From, 2017). A estrutura deste robô pode ser variável consoante as necessidades do solo e ambiente em que se encontra inserido, isto é, ele consegue ter alturas, comprimentos, rigidez e largura variáveis, consoante a necessidade. Isto é conseguido porque a estrutura do robô é fabricada a partir de

tubos de alumínio que estão fixos por braçadeiras, fazendo com que a troca destes tubos seja muito simples e rápida. Na Figura 3 pode-se observar os diversos modelos do Thorbald II.



Figura 3. The Thorbald II ( Grimstad & From, 2017).

O Thorbald II possui vários compartimentos com diversas funcionalidades, desde o módulo de transmissão, módulo de direção, módulo de suspensão, módulo dos sensores e módulo de controlo.

O módulo de controlo é composto pela bateria e todo o sistema eletrónico necessário. A bateria pode ser de 70 Ah, ou então 2 baterias de 35 Ah de 48 V, no mesmo módulo está incorporado o computador e todos os componentes eletrónicos. O módulo de transmissão consiste num motor sem escovas de 500 W ligado a uma roda através de uma correia e um *encoder* de 1024 pulsos. O robô pode possuir 4 módulos de transmissão, caso necessite de ter tração às 4 rodas (4WD), mas caso não seja necessário o módulo de transmissão pode somente possuir uma roda que servirá de apoio do robô e não efetuar qualquer força de tração. Dependendo do fim a que se destina o uso do robô assim existem vários tipos de sensores que podem ser adicionados ao módulo. Por exemplo, uma tarefa aplicada no Thorbald II foi aplicar luz UV numa plantação de morangos, e para isso ele possui um sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*) que consiste numa tecnologia que utiliza pulsos de laser para medir a distância entre o sensor e a superfície de forma a fazer um mapeamento 3D do solo onde a plantação está inserida (Weiss & Biber, 2011). Outro sensor utilizado é do tipo IMU (*Inertial Measurement Unit*) que consiste em diversos sensores capazes de medir a aceleração, rotação e orientação do robô em relação a um sistema de coordenadas específico (Kragh *et al.*, 2017). Graças a estes sensores, juntamente com as luzes UV

o robô é capaz de assim passar pela plantação por uma rota previamente projetada e gravada. Estas luzes são colocadas como um módulo extra sobre uns braços como mostra a Figura 4.



Figura 4. The Thorbald II - Luz UV (Grimstad & From, 2017).

### 2.2.2. Naïo Technologies' Oz

A empresa Naïo Technologies', fundada em 2011 por Aymeric Barthes e Gaëtan Séverac dedica-se à criação e desenvolvimento de robôs agrícolas. O seu projeto Naïo Technologies' Oz foi lançado em 2015, e até aos dias de hoje tem sofrido upgrades. Este robô consegue ajudar nos campos agrícolas realizando tarefas como extração de ervas daninhas, espalhar herbicidas de forma homogênea e em quantidades certas. Ele é totalmente autónomo e foi criado com o objetivo de ajudar nas áreas da fruticultura, horticultura e viticultura (Robert *et al.*, 2020). O robô é de pequenas dimensões, 1300 x 470 x 830 [mm], comprimento, largura e altura respetivamente, que consegue deslocar-se por entre as culturas, que consoante a finalidade assim se pode acoplar uma alfaia, tal como um escarificador, pente de arames, reboque por entre outros. O Oz tem dois tipos de câmaras, câmaras RGB e câmaras NIR. As câmaras RGB recolhem imagens de alta qualidade das plantações e do meio em redor de forma a detetar padrões de crescimento e analisar o estado das mesmas, onde são analisados valores de altura, densidade, uniformização das plantações. Graças a estas câmaras é possível ter informação privilegiada da evolução da plantação e assim gerir os tempos de colheita, previsões de quantidades e quando necessárias adaptações por parte dos agricultores de forma exata (Huang *et al.*, 2017). As câmaras NIR (*Near Infrared*), que consistem em câmaras de infravermelhos são utilizadas para verificar o estado de saúde das plantas, onde através dos dados recolhidos é possível conhecer o nível de clorofila. As câmaras NIR são bastante importantes porque através dos dados recolhidos das imagens conseguimos detetar problemas numa plantação, quer seja por falta de nutrientes, por doenças ou por pragas e assim aplicar fertilizantes/herbicidas em doses adequadas e no tempo certo (Ahmadi *et al.*, 2021). Tal como o The Thorbald II retratado anteriormente, o Oz também tem incorporado um sensor LiDAR e um sensor IMU. Um exemplo do Naïo Technologies' Oz é representado na Figura 5.



Figura 5. Naïo Technologies' Oz (Robert *et al.*, 2020).

### 2.2.3. Agrobot

O robô Agrobot foi desenvolvido especialmente para a apanha de morangos de forma automatizada. Para que este robô consiga movimentar-se sobre a plantação é preciso esta já estar projetada e dimensionada devido às suas dimensões. Este ao mover-se ao longo da plantação consegue identificar os morangos mais maduros através da sua cor e do seu tamanho. Isto tudo é possível porque ele possui câmaras de alta-definição que detetam a intensidade da cor do morango e o seu tamanho, sabendo assim o estado de madureza. Quando se efetua a apanha do morango é necessário ter muito cuidado, devido a este tipo de fruta ser muito sensível. Para que o morango não fique danificado quando se está a colher o Agrobot possui um sensor tátil nas extremidades. Este sensor tem como objetivo detetar e medir o contacto físico com o morango, não permitindo que seja aplicada uma força excessiva para que a colheita ocorra na perfeição. O Agrobot possui também sensores de movimento, como acelerómetros e giroscópios (Defterli, 2021). Este tipo de robô tem uma grande envergadura como podemos observar na Figura 6.



Figura 6. Agrobot (Defterli, 2021).

### 2.3. Formas de Locomoção

Para que o robô se consiga movimentar é necessário a escolha da forma de locomoção. Existem diversas formas de locomoção na área da robótica, pelo que é necessário entender quais as necessidades e dificuldades que o robô irá enfrentar para assim escolher a forma de locomoção mais adequada. A escolha da forma de locomoção passa por determinar a capacidade que o robô oferece de se mover no meio em que está inserido. É através de uma boa escolha que se consegue ter uma boa eficiência e adaptabilidade do robô quando este se movimentar pelo solo (Coelho, 2007). Como referido existem diversas formas de locomoção, que irão ser retratadas a seguir.

#### 2.3.1. Rodas

As rodas são o meio de locomoção mais utilizado na área da robótica, devido ao seu custo e às suas características. O uso das rodas garante de forma eficiente a locomoção dos robôs em diferentes tipos de terrenos, suportando alguns obstáculos com facilidade, mas por outro lado, é necessário estudar bem o solo onde está inserido o robô. Caso o solo seja muito escorregadio, o uso das rodas já não é aconselhado, porque a probabilidade de derrapagem é elevada. Mas no geral, as rodas apresentam excelentes caracterizas para serem utilizados neste projeto.

Para a seleção do tipo de roda a selecionar é preciso levar em conta fatores como a aderência, a pressão de ar, o tamanho e o diâmetro da roda. Além de todos estes fatores é de todo crucial considerar também o custo de cada roda.

*Aderência:* A aderência é um fator importante no estudo do pneu, pois este influencia diretamente a capacidade de tração do robô e de se movimentar em diferentes superfícies e inclinações. Neste projeto irão ser utilizados pneus que são usados nos

tratores/alfaias/motocultivadores devido há boa aderência que eles oferecem, graças ao rasto saliente que eles possuem.

*Tamanho e Diâmetro:* O tamanho e diâmetro da roda devem ser selecionados consoante as dimensões e peso total do robô autónomo, assim como o tipo de solo onde irá estar inserido. É necessário comparar as características das rodas de diâmetro grande com as rodas de diâmetro pequeno. As rodas com diâmetro grande oferecem uma maior capacidade de tração e de ultrapassar obstáculos, como têm uma maior área de contacto com o solo. Este tipo de rodas também oferecem uma maior estabilidade ao robô, reduzindo assim possíveis oscilações. Em contrapartida, rodas de diâmetro pequeno são mais ágeis e oferecem uma maior capacidade de manobrar em espaços estreitos (Leal *et al*, 2008). Na Figura 7 está representado um exemplo de rodas pneumáticas (Leal *et al*, 2008).



Figura 7. Rodas Pneumáticas, SAKAWA - 400x8.

### **2.3.2. Lagartas**

O uso de lagartas na robótica também é uma prática comum, porém é um método que requer mais atenção. As lagartas oferecem uma excelente tração em comparação com as rodas e têm uma boa capacidade de locomoção em terrenos bastante irregulares. Em contrapartida, as lagartas são requerem uma estrutura muito mais robusta e pesada, o que traz um aumento de consumo de energia, limitando bastante assim o uso deste tipo de locomoção quando se trata de robôs autónomos. Como as lagartas requerem uma estrutura mais robusta, o seu custo também é mais elevado comparando com as rodas (Matarić, 2014). Um exemplo de locomoção por lagartas é presente na Figura 8, onde se pode observar o robô autónomo de remoção de ervas daninhas.



Figura 8. Robô Phoenix de Lagartas (site LINAK).

## 2.4. Sensores

Os sensores são dispositivos que convertem grandezas físicas como temperatura, pressão, humidade, velocidade entre outros, em sinais digitais. Quando os sensores são implementados num robô é com o intuito de efetuar alguma medição específica. Os robôs são projetados com determinadas missões e dependendo do meio ambiente e das grandezas a medir assim são também projetados e programados os sensores. É através de sensores que toda a informação é obtida, onde posteriormente os valores vão ser processados e convertidos. Existe uma vasta gama de sensores, podendo estes ser classificados consoante a função realizada, o tipo de ativação, a sua localização e de acordo com o seu princípio de funcionamento. Pode-se dividir os tipos de sensores em cinco grandes categorias dependendo das suas funções: Mecânicos, Elétricos, Magnéticos, Térmicos e outros como radioativos, óticos, acelerómetros, entre outros (Alatise & Hancke, 2020).

### 2.4.1. Sensores Mecânicos

Os sensores mecânicos são bastante úteis na área da indústria, estes são capazes de quantificar medidas como pressões, posições, força, formas entre outros. O sensor mais típico nesta gama é o fim de curso, que tem como finalidade abrir ou fechar o contacto quando este chega ao seu ponto máximo, impedindo assim que um motor por exemplo fique a trabalhar em sobrecarga. Na Figura 9 pode-se observar um sensor fim de curso que deteta quando está em contacto com alguma superfície, dando assim sinal que está no máximo do movimento (Thomazini & de Albuquerque, 2020).



Figura 9. Fim de curso, Kap-M3L.

### 2.4.2. Sensores Magnéticos

Os sensores magnéticos comportam-se de maneira parecida aos sensores mecânicos, mas sem existir qualquer tipo de contacto com o objeto, isto é possível porque é criado um fluxo magnético. Um dos principais sensores utilizados nesta categoria são os sensores de proximidade ou distância que têm como objetivo detetar a presença ou a ausência de um objeto e a distância sem existir qualquer tipo de contacto com ele. Isto é possível porque o sensor está constantemente a emitir um sinal ou a criar um campo magnético, onde através das oscilações dos mesmos consegue detetar os objetos e/ou a distância dos mesmos. Este sensor pode ser utilizado como indicador da posição de um determinado componente da estrutura robótica, indicando assim a distância (Thomazini & de Albuquerque, 2020). Um exemplo deste tipo de sensor é apresentado na Figura 10.



Figura 10. Sensor magnético, WEG - Linha SL.

### 2.4.3. Sensores Térmicos

Os sensores térmicos são utilizados em diversas situações, podem ser aplicados com o objetivo de determinar a temperatura ambiente onde o robô está inserido, a temperatura dos componentes eletrônicos, temperatura dos objetos alvos de estudo e a temperatura do próprio robô. É deveras importante conhecer todas as variáveis de temperatura do robô, para evitar sobreaquecimento dos componentes eletrônicos como de qualquer componente mecânico e assim evitar causar

danos. Um exemplo utilizado na robótica de um sensor térmico é representado na Figura 11 (Thomazini & de Albuquerque, 2020).



Figura 11. Sensor térmico. Waveshare, MLX90640-D55.

#### 2.4.4. Sensores de Força/Toque

Os sensores de força são capazes de quantificar a força que está a ser aplicada num objeto. Franklin Eventoff, na década de 1970, constatou que alguns materiais mudavam os valores da sua resistência quando sujeitas a uma força como é apresentado na Figura 12. Então, quando existe uma mudança dos valores da resistência, é possível calcular a força que está a ser aplicada. O principal objetivo deste tipo de sensores na área da robótica é conseguir informação acerca da localização, reconhecimento de objetos e controlar a força que é aplicada. Os sensores de força na agricultura têm usualmente a tarefa de medir a força que está a ser aplicada por um determinado objeto e assim quantificar o peso do mesmo. Isto é possível porque o transdutor converte a força aplicada num sinal elétrico, normalmente de 4 a 20 mA que vai ser processado pelo dispositivo de controlo (Thomazini & de Albuquerque, 2020).

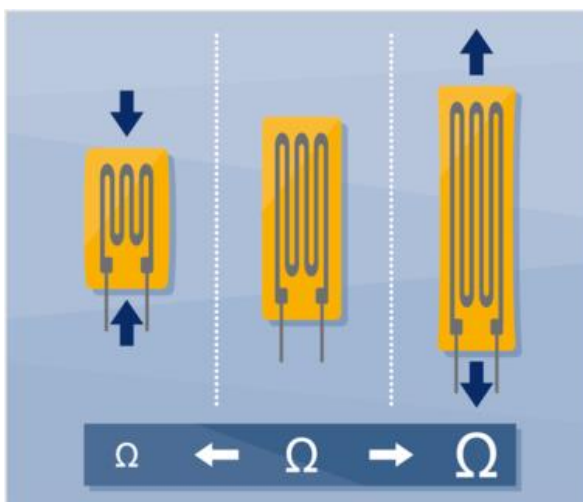


Figura 12. Exemplo resistência de um material.

### 2.4.5. Sensores LiDAR

Os sensores LiDAR têm um papel importantíssimo na robótica, porque é através destes sensores que os robôs autônomos conseguem mapear o meio onde estão inseridos e assim elaborar mapas tridimensionais de bastante precisão. A sigla LiDAR significa *Light Detection and Ranging*, que como o nome indica, utiliza feixes de luz com o objetivo de estes incidirem nos objetos e assim determinar o tempo que demora o retorno do feixe de luz. É através deste tempo de retorno que o robô consegue mapear o trajeto, evitar obstáculos determinando outra rota segura (Debnath & Paul, 2023). Na agricultura os sensores LiDAR são uma mais-valia na vertente de ser possível a criação de mapas tridimensionais com imenso pormenor, conseguindo assim os produtores observar detalhes das plantações, como a densidade das culturas, crescimento, podendo assim analisar se uma determinada zona necessita de intervenção (Giongo *et al.*, 2010). A Figura 13 retrata a visão de um sensor LiDAR com detalhe.

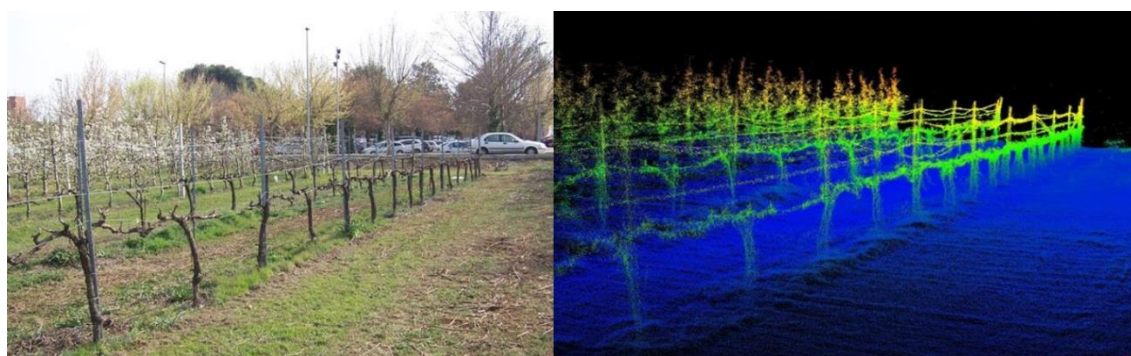


Figura 13. Vista sensor LiDAR.

### 2.4.6. Sensores IMU

A sigla IMU significa *Inertial Measurement Unit*, e consiste num conjunto de sensores que especificamente medem a aceleração, velocidade e orientação de um robô. Eles são constituídos por giroscópios, acelerómetros e magnetómetros, capazes de efetuar medições da posição relativa do robô num determinado eixo, da aceleração e da sua orientação. É graças a estes sensores que os robôs autônomos conseguem controlar de maneira precisa a sua aceleração, podendo diminuir ou aumentar de forma autônoma, sem precisar da supervisão de mão humana. Outra grande vantagem é a capacidade de informar da inclinação a que o robô está sujeito (Ahmad *et al* 2013) Na Figura 14 está representado um sensor IMU.



Figura 14. Sensor IMU. Digilent, Pmod NAV.

#### 2.4.7. Sensor GPS

O sensor GPS foi desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América na década de 1970 com o intuito de conhecer o posicionamento e localização de submarinos e equipamento militar de forma precisa. A sigla GPS significa *Global Positioning System*, e foi na década de 1980 que os Estados Unidos permitiram o uso deste tipo de sensores a nível civil, e desde aí o seu uso foi cada vez mais recorrente. O sistema GPS é constituído por uma rede de satélites distribuídos de forma ordenada no espaço, ao redor da terra, de forma a que estes transmitam sinais de rádio para os dispositivos GPS na crosta terrestre. Os satélites emitem os sinais através de radio frequência e o recetor GPS quando recebe esses sinais usa a diferença de tempo entre a emissão e a receção para assim calcular a sua posição, contudo, um satélite não é suficiente para se conhecer a posição exata do sensor, são necessários no mínimo 4 satélites para se conhecer a posição do recetor. O recetor ao receber o sinal dos 4 satélites consegue triangular e conhecer a sua posição graças à diferença de tempo entre os sinais emitidos e de receção. Na Figura 15 está representado o esquema de satélites presentes no espaço. (Maier & Kleiner, 2010)

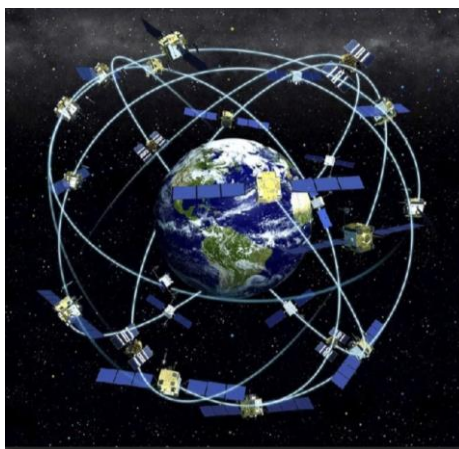


Figura 15. Esquema satélites espaço.

## 2.5. Motores elétricos

Os motores elétricos são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica. Estes têm uma grande importância no nosso dia-a-dia, estão presentes em micro-ondas, frigoríficos, carros, ar condicionados, bombas de água entre outros equipamentos. O princípio de funcionamento dos motores elétricos baseia-se na indução eletromagnética. Ao aplicar uma tensão nos terminais cria-se um campo magnético suficientemente forte para girar o rotor. Este efeito foi descoberto em 1832 por Michel Faraday. Existem vários tipos de motores. É bastante importante estudar todos os tipos existentes para assim se poder escolher qual usar consoante as necessidades. A seguir irão ser retratados alguns dos principais tipos de motores (Chapman, 2013).

### 2.5.1. Motores de Corrente Contínua

Estes motores utilizam como fonte de energia corrente contínua. Estes foram os primeiros motores a serem utilizados, visto que podiam ser ligados a partir da rede de distribuição de energia. Pode-se dividir os motores de corrente contínua em duas categorias, com escovas e sem escovas.

- Sem escovas: O motor sem escovas é um motor síncrono constituído por um rotor constituído por ímanes e um estator constituído por bobinas. O movimento do rotor dá-se graças ao efeito magnético efetuado pelas forças de atração e repulsão magnética (Chapman, 2013).

### 2.5.2. Motores de passo

Os motores de passo são utilizados quando algo tem que ser controlado precisamente. A rotação destes motores é controlada por um campo eletromagnético que é ativado e desativado eletronicamente, sendo assim possível obter um controlo detalhado da velocidade do motor. Este efeito é conseguido porque quando uma bobina é ativada atrai um dos ímanes no veio do motor provocando a sua rotação (Souza, 2014).

## 2.6. Microcontrolador Arduíno

O Arduíno consiste numa placa eletrónica composta por entradas e saídas que permitem a integração de sensores, atuadores ou outro tipo de dispositivos. Este tipo de placas eletrónicas foi projetado principalmente para iniciantes poderem dar os primeiros passos no mundo da robótica e programação, onde a principal vantagem do Arduíno é ser totalmente em código aberto e utilizar programação C++. Foi em 2003, que Massimo Banzi e David Cuartielles, com o intuito de ajudar

os seus alunos a iniciar os primeiros passos na programação e eletrônica criaram a primeira placa designada por Arduino NG (*Next Generation*), desde logo foi um sucesso pela vasta gama de empregabilidade (Banzi *et al.*, 2022). Nos dias de hoje existem diversas placas de Arduino com capacidades diferentes, onde estas podem ser aplicadas na robótica, na automação, em IoT, em aplicações domésticas, na indústria. A interface e a linguagem utilizada pelo Arduino é de fácil aprendizagem, cativando assim imensas pessoas pela diversidade e facilidade de possíveis aplicações em ambientes distintos. Face ao sucesso e aplicações possíveis, as placas eletrônicas tiveram uma rápida expansão. Desde a sua criação foram lançados alguns modelos, com propriedades e características diferentes. Os Arduínos mais conhecidos são o Arduino Uno e o Arduino Mega (Nayyar *et al.*, 2016).

### 2.6.1. Arduino Uno

O Arduino uno tem um processador de 8 bits, contendo 14 pins de ligação para entradas e saídas digitais, podendo assim ligar uma vasta gama de equipamentos em simultâneo. O Arduino Uno possui também 6 entradas analógicas podendo ser incorporados vários tipos de sensores em simultâneo. Um exemplo do Arduino Uno está retratado na Figura 16 (Nayyar *et al.*, 2016).

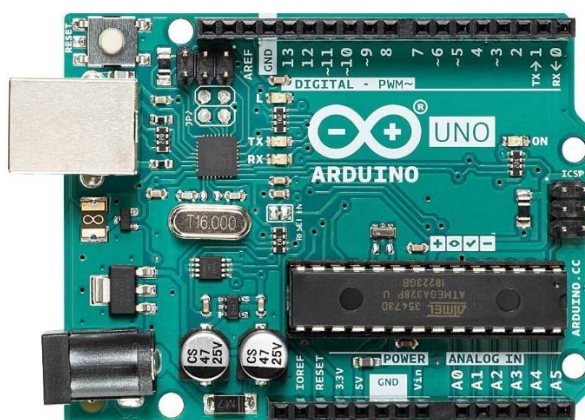


Figura 16. Exemplo Arduino Uno (Nayyar *et al.*, 2016).

### 2.6.2. Arduino Mega

O Arduino Mega é semelhante ao Arduino Uno, efetuando as mesmas tarefas, com a particularidade de possuir mais entradas e saídas. Outra grande vantagem do Arduino mega face ao Arduino uno é o seu processador ATmega2560 de 8 bits. O Arduino Mega representado na Figura 17 possui assim 54 pins de entradas e saídas digitais e 16 pins de entradas analógicas (Nayyar *et al.*, 2016).

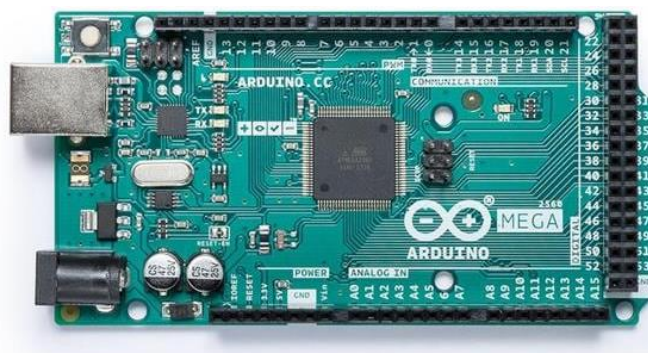


Figura 17. Arduino Mega (Nayyar *et al.*, 2016).

Um exemplo bastante simples da utilização destes sensores e da utilidade dos mesmos foi retratado por Tabassum, onde foram utilizados 3 sensores ultrassônicos para detetar obstáculos em tempo real e ser capaz de refazer a sua trajetória através de uma placa de Arduino como se pode observar na Figura 18 (Tabassum *et al.*, 2017)

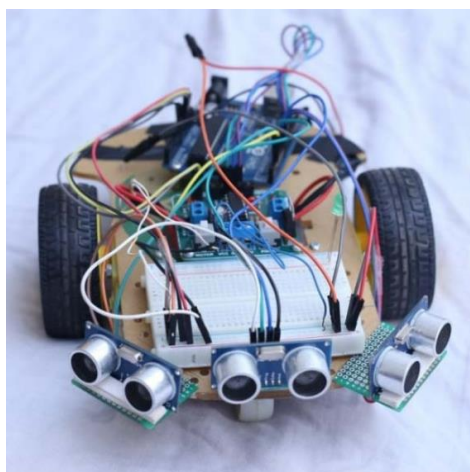


Figura 18. Frente do Robô (Tabassum *et al.*, 2017).

## 2.7. Nota Conclusiva

Ao longo deste capítulo foram retratados assunto como a evolução na agricultura, e a importância do uso da robótica nesta área, assim como o seu aperfeiçoamento. Inicialmente a agricultura era somente realizada por meios humanos, onde com os avanços tecnológicos e a necessidade de um aumento de produção fez com que o uso da robótica fosse imprescindível. O ato de cultivar passa por diversas etapas, etapas essas bastante distintas, sendo necessário o uso de diversos robôs que foram retratados aqui neste capítulo. Existem robôs para as distintas áreas desde o estudo dos solos, passando pela plantação, a remoção de ervas daninhas, a colheita até ao seu transporte. Um aspeto bastante importante quando se projeta um robô é qual irá ser o seu meio de locomoção,

No capítulo a seguir irão ser representados aspetos como a escolha de materiais utilizados na estrutura, os sensores a utilizar, os respetivos esquemas de ligação ao controlador, todos os desenhos e simulações dinâmicas e estáticas através do *software Fusion 360*.



## 3. Materiais e Métodos

### 3.1. Materiais

Para uma boa estrutura tem de se estudar que tipo de materiais podem ser utilizados, que esforços estão sujeitos e qual o clima onde vão estar inseridos. Esta análise é bastante importante para o robô conseguir aguentar as cargas necessárias e se locomover sem se danificar.

É necessário elaborar matrizes decisão de modo a conferir qual o tipo de metal a implementar na parte estrutural, qual o sistema de navegação a implementar, quais os sensores, quais são as melhores formas de locomoção.

#### 3.1.1. Estrutura

A estrutura a implementar deve ser robusta e leve, para poder suportar o palote com cerca de 500 kg. Quanto mais leve for o conjunto, a menos esforços está sujeito, menos potência será exigida nos motores e conseqüentemente menor será o consumo da energia armazenada na bateria. Assim sendo, a matriz decisão exposta na Tabela 1 terá fatores como custo, peso, resistência à tração e dureza e facilidade de montagem.

Tabela 1. Matriz decisão: material.

	<b>Custo [0-5]</b>	<b>Peso [0-5]</b>	<b>Resistência à tração [0-5]</b>	<b>Dureza [0-5]</b>	<b>Facilidade Montagem [0-5]</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Aço comum</b>	4	3	3	3	4	17
<b>Aço Inoxidável</b>	2	3	3	3	3	14
<b>Alumínio</b>	2	4	2	2	2	12
<b>Plástico</b>	1	5	1	1	3	11

O material utilizado para a parte estrutural vai ser o aço de carbono comum, que é fácil de obter no mercado, tem um preço mais baixo comparativamente aos outros materiais e é de todos o mais

fácil de ser montado/soldado. Existem várias gamas de aço comum. Na Tabela 2 pode-se observar as características de cada aço.

Tabela 2. Resistência dos materiais (Shigley, 2011).

UNS nº	Nº SAE e/ou AISI	Processamento	Resistência à tração Mpa	Resistência ao escoamento Mpa	Alongamento em 2 in %	Redução em área	Dureza Brinell
<b>G10500</b>	1050	HR	620	340	15	35	179
<b>G10600</b>	1060	HR	60	30	12	30	201
<b>G10800</b>	1080	HR	770	420	10	25	229

O aço escolhido para a estrutura foi o AISI 1060, que tem uma resistência à tração de 680 MPa.

### 3.1.2. Locomoção

De modo a verificar qual o meio de locomoção a utilizar é ser elaborada uma tabela matriz decisão, tendo em conta fatores como o custo de fabrico, o peso depois de implementado no robô, o consumo de energia associado, o nível de tração e a facilidade de montagem e manutenção associado, exposta na Tabela 3.

Tabela 3. Matriz decisão: meios de locomoção.

	Custo [0-5]	Peso [0-5]	Consumo Energia [0-5]	Derrapagem [0-5]	Facilidade Montagem [0-5]	TOTAL
<b>Rodas</b>	4	4	4	2	5	19
<b>Lagartas</b>	2	2	3	5	3	15

Através da matriz decisão foi possível observar que para este caso, as rodas são o meio de locomoção que mais se adequa.

As rodas para este projeto têm que ser dimensionadas de maneira que se consiga movimentar em todo o lado e com uma boa aderência. Usualmente as rodas usadas por motoenxadas, têm as dimensões 400-8, isto é, têm um diâmetro de 400 [mm], perfil de altura de 85 [mm] e uma carga máxima de 168 [kg]. Devido ao índice de carga ser baixo, a roda proposta para este projeto é da marca Toyama com o modelo 500-12, representada na Figura 19.



Figura 19. Roda de tração, Toyama, 500-12.

A roda tem as seguintes dimensões:

- Diâmetro: 500 [mm]
- Perfil de altura: 120 [mm]
- Índice de carga máxima: 200 [kg]

### 3.1.3. Dimensionamento de motores

Para o dimensionamento dos motores tem que ser analisada a massa que o robô no conjunto total irá possuir ( $m$ ), a inclinação máxima a que o robô esteja sujeito ( $\alpha$ ), a aceleração desejada ( $a$ ), a velocidade estipulada ( $v$ ) o atrito de contacto entre as rodas e o solo ( $Fa$ ) e a aceleração da gravidade ( $g$ ). A Figure 20 apresenta um esquema das forças a que está sujeito o veículo.

Dados:

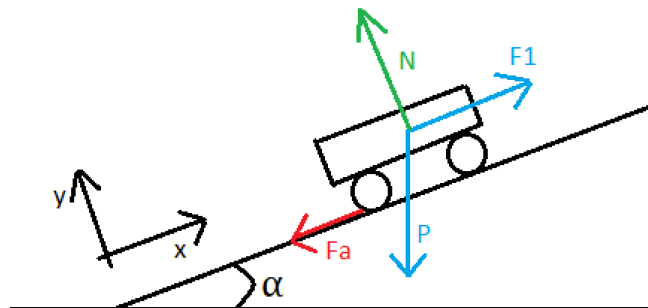


Figura 20. Esquema de Forças.

- Massa = Peso\_Robô + (Peso\_Palote x Coeficiente Segurança)

$$m = 100 + (500 * 1.2)$$

$$m = 700 \text{ [kg]}$$

Irá ser considerada a velocidade de 1 m/s como a velocidade máxima que o robô poderá atingir.

- Velocidade,  $v = 1 \text{ m/s}$

Devido aos terrenos agrícolas possuírem inclinações elevadas, estipulou-se uma inclinação máxima de  $20^\circ$ .

- Inclinação máxima,  $\alpha = 20^\circ$
- Aceleração Gravitacional,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

A força de atrito entre as rodas e o solo considerada foi de 0,5, como se pode observar na Tabela 4.

- Coeficiente de atrito, 0,5

Tabela 4. Coeficiente de atrito (Koshkin & Shirkévich, 1975).

<b>Superfícies em contacto</b>	<b>mk</b>
<b>Aço sobre aço</b>	0,18
Borracha (pneu) sobre terreno firme	0,4-0,6
<b>Bronze sobre bronze</b>	0,2

Inicialmente é calculado o peso do conjunto através da Equação (1):

$$P = m * g \tag{1}$$

$$P = 700 * 9,81$$

$$P = 6867 \text{ N}$$

Posteriormente calcula-se a força necessária para estas condições através do sistema de Equações (2)

$$\begin{cases} x : F1 - Fa - Px = 0 \\ y : N - Py = 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} x : F1 - (\mu * N) - (N * \sin(\alpha)) = 0 \\ y : N = Py \end{cases}$$

$$\begin{cases} x : F1 - (0,5 * 6867) - (6867 * \sin(20)) = 0 \\ y : N = Py \end{cases}$$

$$\begin{cases} x : F1 = 5782,15 [N] \\ y : N = Py \end{cases}$$

$$F1 = 5782,15 [N]$$

Para calcular a potência necessária dos motores, recorre-se primeiramente ao cálculo do binário, Equação (3), onde o diâmetro estimado da roda foi de 0,50 m:

$$T = F1 * r \quad (3)$$

$$T = 5782,15 * 0,25$$

$$T = 1445,54 [Nm]$$

Para determinar a velocidade angular do equipamento usa-se a Equação (4)

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

$$\omega = \frac{1}{0,25}$$

$$\omega = 4 [\text{rad/s}]$$

Por fim para calcular a potência necessária para mover o conjunto usa-se a Equação (5).

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

$$P = 1445,54 * 4$$

$$P = 5782,15 [W]$$

A potência necessária para mover o conjunto nas condições iniciais é de 5782,15 [W]. Como existirão 4 motores independentes, divide-se a potência por 4, para assim determinar a potência necessária de cada um.

$$Pm = \frac{5782,15}{4}$$

$$Pm = 1445,54 [W]$$

A potência de cada motor terá que ser no mínimo de 1445,54 W de forma a superar os esforços solicitados. Irão ser definidos no capítulo seguinte os motores a usar, de aproximadamente 1500 W.

Através do dimensionamento determinou-se que serão necessários 4 motores com uma potência de 1500 W. Ao existirem 4 motores independentes, é possível controlar a velocidade de cada roda de forma individual e assim obter controlo da direção. Graças ao comando de controlo da velocidade das rodas é possível que o robô se movimente para a frente e para trás se todas as rodas girarem com a mesma velocidade. É ainda possível girar em torno do seu próprio eixo se as rodas de um dos lados girarem para uma direção e as rodas do outro lado girarem na direção oposta. Foram selecionados 4 motores da marca ATO, com caixa redutora integrada, de forma a garantir a velocidade projetada sem ser necessário recorrer a engrenagens ou correias. O motor escolhido está representado na Figura 21, e tem as seguintes características:

- Modelo: ATOD-110BLD1500-48A
- Potência Nominal: 1500W
- Tensão elétrica Nominal: 48V DC
- Corrente elétrica Nominal: 39.06 A
- Binário Nominal: 4.78 Nm
- Binário de pico: 14.34 Nm
- Velocidade Nominal: 2000 RPM
- Peso: 16 kg



Figura 21. Motor ATO, modelo ATOD-110BLD1500-48A

Para esta gama de caixa redutora existem vários tipos de rácio, pelo que a sua escolha é importante para se garantir a velocidade final desejada. A velocidade angular ( $\omega$ ) é a mesma no eixo, variando apenas velocidade linear ( $v$ ) consoante o diâmetro da roda. Escolhendo a caixa redutora com um rácio de 10, a velocidade de rotação ( $N$ ) é de 200 RPM. Através do sistema de equações (6) calcula-se a velocidade e verifica-se que corresponde com o anteriormente definido.

$$\begin{cases} v = \omega * r \\ \omega = \frac{2\pi * r * N}{60} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v = \omega * 0,25 \\ \omega = \frac{2\pi * 0,25 * 200}{60} \end{cases}$$

$$\begin{cases} v = \omega * 0,25 \\ \omega = 5,23 \text{ rad/s} \end{cases}$$

$$v = 1,30 \text{ m/s}$$

O estipulado anteriormente foi de 1 m/s, pelo que uma caixa redutora com rácio de 10 garante a velocidade pretendida. Ficando assim com as seguintes características:

- Velocidade angular nominal: 200 RPM
- Binário nominal: 57,3 Nm

Devido à elevada tensão (48 VDC) e elevada corrente (39,06 A) é impossível acionar os motores de forma direta através do Arduíno, pelo que irá ser utilizado um controlador recomendado pelo fabricante da marca ATO com o modelo BLD-50A representado na Figura 22.



Figura 22. Controlador ATO BLD-50A.

Este controlador tem várias funções, como travão, alarme, inversão do sentido de rotação do motor e controlo de velocidade através de 3 opções:

1. A velocidade pode ser controlada através de um potenciômetro de forma manual.
2. A velocidade pode ser controlada de forma automática através de uma tensão regulável de 0-5V.
3. A velocidade pode ser controlada através de frequência PWM.

Como o controlo será efetuada através de um shield da DFRobot para Arduino, irá ser utilizada a opção 3, controlo através de PWM. Na Figura 23 está representado o esquema de ligação do controlador onde são apresentados os pins de ligação.

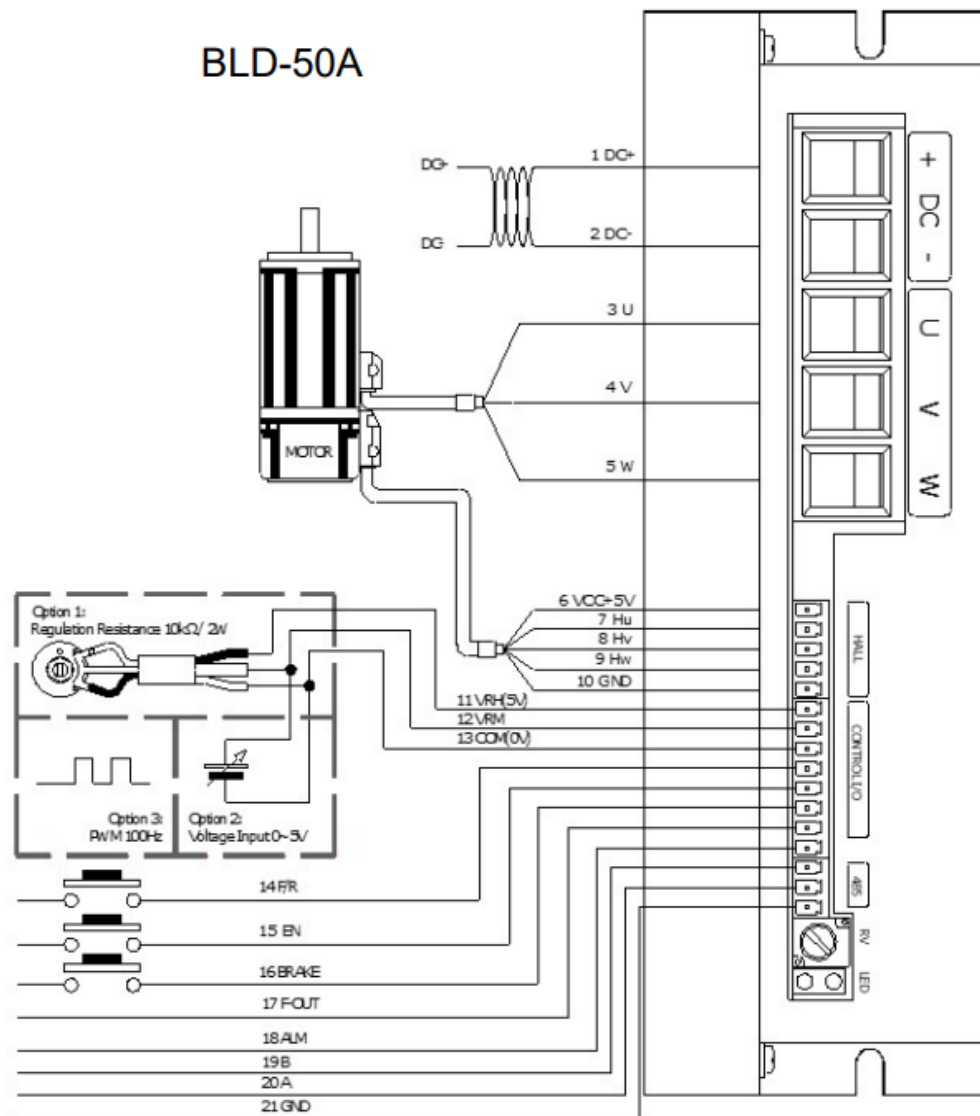


Figura 23. Esquema ligação ATO BLD-50A.

Existirão 4 controladores, um para cada motor de forma independente. Estes vão ligar-se a um controlador da marca DFRobot. Este tem o papel de controlar a velocidade dos motores e efetuar a ligação entre o Arduino e os controladores. Este controlador tem a opção de controlar os motores através de PWM de forma independente. Na Figura 24 está representado o controlador.

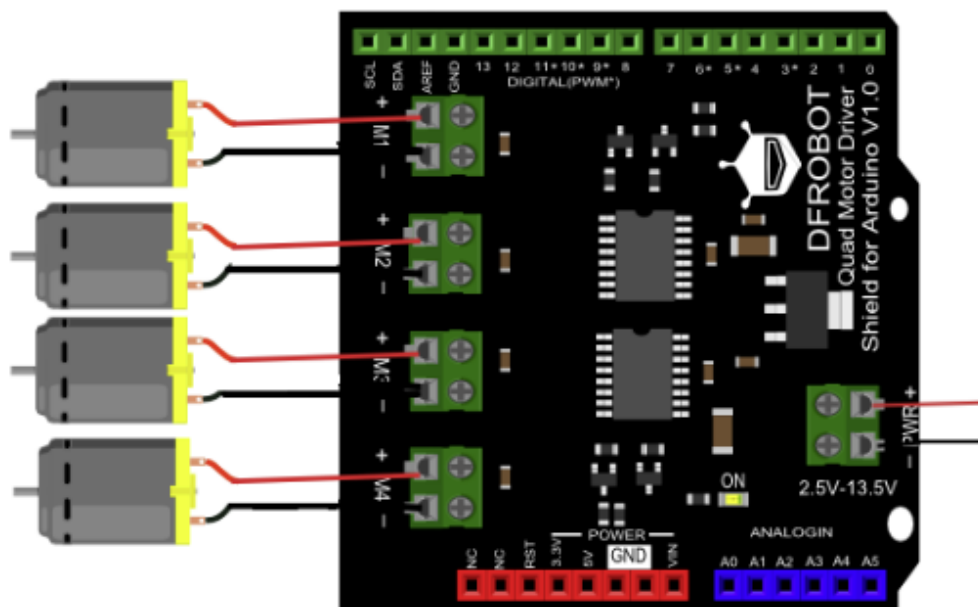


Figura 24. controlador da DFRobot com o modelo Quad Motor Drive.

Para levantar o palote é necessária a utilização de um sistema de 4 atuadores que efetuarão o movimento desce para descarregar a caixa e executarão o movimento ascendente quando for para subir o palote. O atuador escolhido foi da marca KALATEC com o modelo KTC-LA-J-B, com um índice de máxima carga de 1600 N. O peso máximo da caixa de fruta é 500 kg, pelo que a dividir o peso pelos 4 atuadores, estes necessitarão de levantar 1226,25 N. O atuador encontra-se representado na Figura 25.



Figura 25. Atuador da marca KALATEC com o modelo KTC-LA-J-B.

As características técnicas do atuador encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5. Tabela consumo de corrente.

Co de	Rating Load (N)	Speed (mm/s)		Current A							
				12 V		24 V		36 V		48 V	
		No Load	Full Load	No Load	Full Load	No Load	Full Load	No Load	Full Load	No Load	Full Load
<b>A</b>	2000	5	4	1,2	3,5	0,6	2,0	0,4	1,5	0,3	1,0
<b>B</b>	1600	7	5,5	1,2	3,5	0,6	2,0	0,4	1,5	0,3	1,0
<b>C</b>	1200	10	8	1,2	3,5	0,6	2,0	0,4	1,5	0,3	1,0

Estes atuadores, tal como os motores, têm uma potência superior à fornecida pelo Arduino, pelo que é necessária a utilização de equipamento adicional. Para isso vão ser utilizados 2 controladores, TB6600, de forma a garantir o movimento de descida e de subida. Na Figura 26 estão representados os controladores e as respetivas ligações.

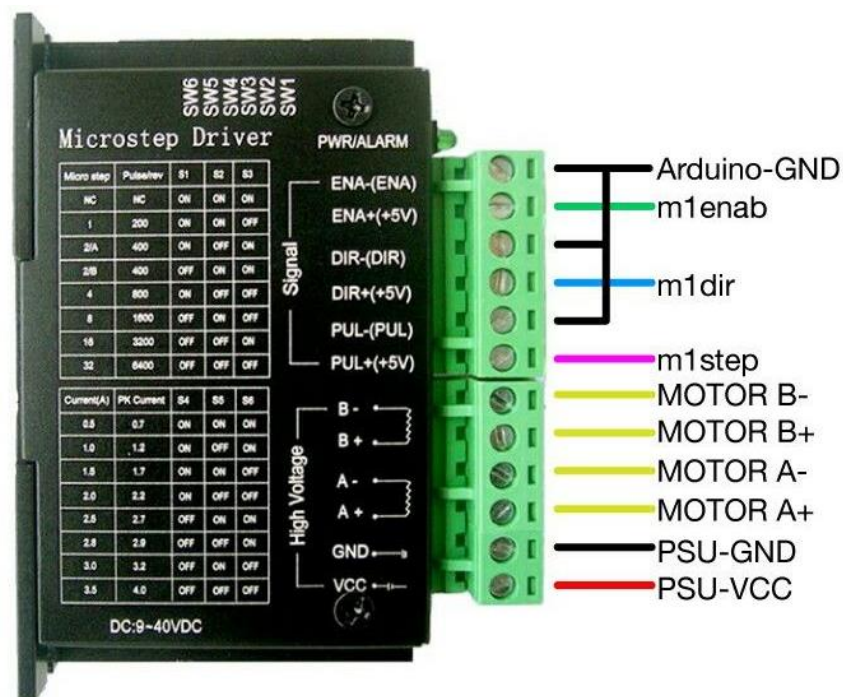


Figura 26. Esquema de ligações para motor com MicroStep TB6600 e Arduino.

### 3.1.4. Eletrónica

Para que seja possível a leitura dos dados obtidos pelos sensores irá ser utilizada uma placa Arduino Mega explicada no capítulo anterior. Esta placa irá ser responsável pelo controlo de todo o robô, atuando sempre de forma autónoma. É através dela que com os dados obtidos o robô consegue tomar decisões como descarregar/carregar o palote, movimentar-se e ir para o local específico de descarga. Na Figura 27 podemos observar uma placa Arduino com as respetivas entradas e saídas analógicas e digitais.

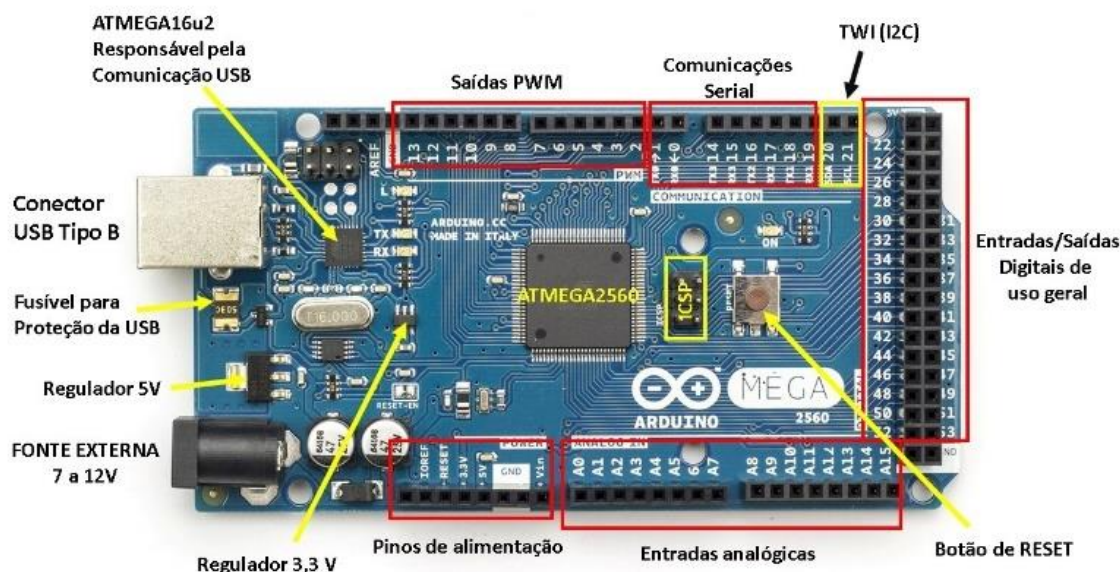


Figura 27. Esquema Arduino Mega.

### 3.1.5. Sensores

No capítulo anterior foram retratados alguns sensores, que são utilizados na montagem do robô. Para o robô ser autónomo, é necessário integrar-lhe alguns sensores, como o sensor GPS, sensor IMU e sensor LiDAR. Estes sensores vão ser responsáveis pela orientação e localização do robô de forma totalmente autónoma.

O módulo GPS escolhido foi o Módulo para Arduino Ublox VK2828U7G5LF com o datasheet em anexo. A Figura 28 mostra o sensor em detalhe.



Figura 28. Sensor GPS, Ublox - VK2828U7G5LF.

Irá ser utilizado o modelo *Triple Axis Accelerometer & Gyro - MPU-6050* como sensor IMU. Este sensor terá várias tarefas importantes, tais como determinar a aceleração e a inclinação do robô. O sensor IMU tem nele incorporado acelerômetros e giroscópios capazes de recolher informação da aceleração num determinado eixo e qual a orientação do robô relativamente ao eixo de referência. O sensor que irá ser utilizado está representado na Figura 29.

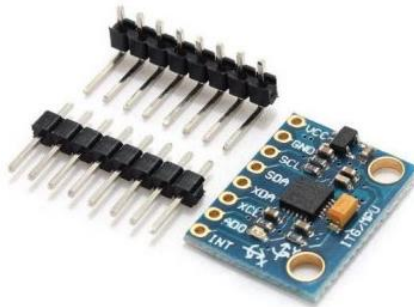


Figura 29. Sensor IMU, MPU-6050.

Irão ser utilizados dois sensores ultrassónicos, HC-SR04, de forma a obter a distância exata ao robô de apanha. Através destes sensores é possível obter a distância e assim orientar o robô de transporte do palote de forma a conseguir curvar para perseguir com exatidão o robô de apanha. O sensor está representado na Figura 30.



Figura 30. Sensor HC-SR04.

De forma a conhecer o peso da fruta que a caixa tem, serão utilizadas 4 células de carga ligados ao Arduino. As células de carga vão ser colocadas nos garfos que levantam o palote, onde a principal atenção na escolha destes sensores foi a gama máxima que suportam. O palote, no máximo, terá 500 [kg] de fruta, logo cada célula de carga terá que no mínimo suportar 125 [kg]. Para uma maior segurança foi selecionada uma célula de carga com capacidade máxima de 150 [kg]. A célula escolhida é da marca ZEMIC, e corresponde ao modelo de 150 kG representada na Figura 31.



Figura 31. Célula de carga ZEMIC 150 kg.

Como serão utilizados 4 sensores é necessária a utilização de duas placas adicionais. A primeira placa a ser utilizada tem como objetivo juntar os sinais obtidos das células de carga num único sinal, para posteriormente ir para a segunda placa que terá como função amplificar o sinal e enviar os dados recolhidos para o Arduino. A primeira placa está representada na Figura 32.

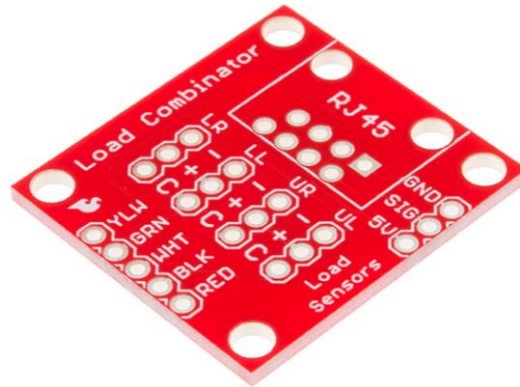


Figura 32. Load combinator.

Posteriormente é necessário utilizar um amplificador de sinal. Neste caso será utilizado o HX711, representado na Figura 33.

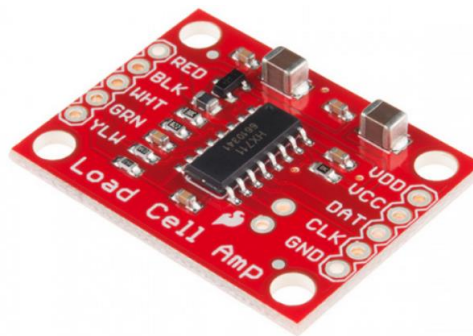


Figura 33. Amplificador sinal.

Na Figura 34 está representado um esquema onde mostra as ligações das células de carga com as respectivas placas, onde posteriormente irá ser ligado no Arduino.

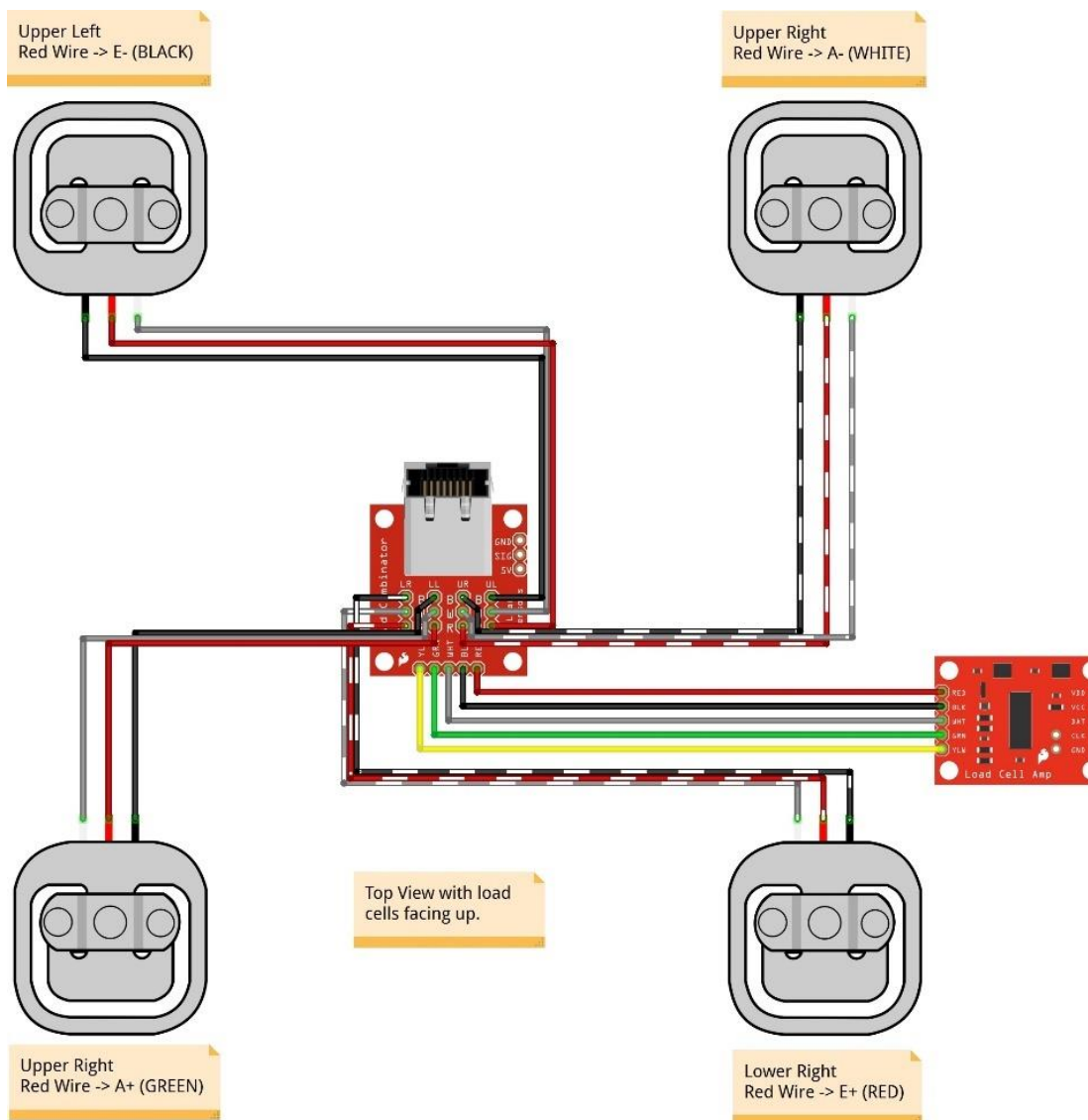


Figura 34. Esquema de ligações entra as células de carga e o Arduino.

### 3.1.6. Sistema de energia

É necessário o uso de baterias para que exista armazenamento de energia elétrica, estas desempenham um papel importantíssimo, fornecendo energia aos motores e a todos os componentes eletrônicos. As baterias fornecem energia ao robô, podendo este operar de forma autónoma por períodos longos, dependendo do tamanho e do consumo. O dimensionamento da bateria é um aspeto muito importante para o desempenho eficiente do robô, onde o tamanho e a capacidade devem ser cuidadosamente considerados para que esta conseguir cumprir com o exigido pelos componentes elétricos. Um mau dimensionamento da bateria pode causar problemas como a

curta duração da carga, fazendo com que esta falhe durante as tarefas e fazendo com que exista uma necessidade de recarga frequente. Por outro lado, um sobredimensionamento resulta em excesso de peso adicional e custos acrescidos, que são desnecessários. As baterias mais utilizadas são as baterias de *Lítio (Li-ion)*, que possuem uma alta densidade de energia, isto é, são capazes de armazenar uma grande quantidade de energia face ao seu tamanho e peso. As baterias de lítio têm também uma vida útil mais longa em comparação com outras tecnologias, podendo efetuar assim mais ciclos de recarga (Yoshino, 2012). As baterias de chumbo-ácido também são bastante utilizadas, devido principalmente ao seu custo relativamente mais baixo comparando com as baterias de lítio. Este tipo de baterias são consideradas mais seguras porque suportam ambientes mais severos em comparação às baterias de lítio, em contrapartida, estas possuem um tempo de vida mais curto. As baterias níquel-cadmio (Ni-Cd), apesar de possuírem uma alta taxa de descarga e terem uma boa capacidade de suportar temperaturas mais servas, elas são menos utilizadas porque possuem o “efeito-memória”, isto é, existe uma redução da capacidade total da bateria. Este fato deve-se ao recarregamento repetitivo sem que exista uma descarga total (Sasaki, *et al*, 2013). A matriz decisão 2, exposta na Tabela 6, compara as características das tecnologias.

Tabela 6. Matriz decisão tipo de bateria.

	<b>Custo [0-5]</b>	<b>Peso/ Tamanho [0-5]</b>	<b>Densidade de Energia [0-5]</b>	<b>Resistência à temperatura [0-5]</b>	<b>Ciclos [0-5]</b>	<b>Tot</b>
<b>Lítio</b>	2	4	5	3	5	19
<b>Chumbo- ácido</b>	4	3	3	4	3	17
<b>Níquel- cadmio</b>	3	4	4	4	2	17

### 3.1.7. Dimensionamento da energia da bateria

Para o cálculo da energia da bateria é necessário conhecer a potência consumida dos motores, dos componentes eletrônicos e da autonomia do robô. Para as condições de peso, velocidade e inclinação anteriormente definidas, calcula-se que é necessária uma potência de 5782,15 [W].

Para o cálculo da autonomia necessária da bateria, foram usados valores referência dos componentes a utilizar. O cálculo da potência é dado pela equação (6).

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

Onde,

- P – Potencia [W]

- V – Tensão de alimentação [V]
- I – Corrente [A]

$$P = P_{motores} + P_{Parduino} + P_{sensorGPS} + P_{sensorLiDAR} + P_{sensorIMU} + P_{célulaCarga}$$

$$P = 5782,15 + (12 * 1) + (3.7 * 0.037) + (5 * 0.062) + (3.3 * 0.015) + (3.3 * 0.01)$$

$$P = 5794,68 \text{ [W]}$$

Irá ser aplicado um coeficiente de segurança de 1,2.

$$P = 5794,68 * 1.2$$

$$P = 6953.62 \text{ [W]}$$

Após determinar a potência total estimada do sistema, define-se a autonomia que o robô vai ter para calcular a energia necessária da bateria. Irá ser estipulada 1h de autonomia nas máximas condições de trabalho. A energia necessária é calculada através da equação 7.

$$E = P * \Delta t \quad (7)$$

$$E = 6953,62 * 1$$

$$E = 6953,62 \text{ [Wh]}$$

Através do dimensionamento chegou-se há conclusão que é necessária uma bateria com 6953,62 [Wh]. Os motores têm uma tensão de 48 [V], pelo que será utilizada uma bateria de lítio da marca SLBATT, com o modelo LiFePO4, representada na Figura 35.



Figura 35. Bateria SLBATT, LiFePO<sub>4</sub>.

A bateria tem as seguintes características:

- Tensão nominal: 48 [V]
- Capacidade elétrica: 160 [Ah]
- Energia: 7680 [Wh]
- Dimensões 600\*403,5\*225 [mm]
- Peso: 75 kg

Como a bateria é de 48 V e o Arduino trabalha a 12 V, é necessário utilizar um transformador de 48 V para 12 V. O transformador utilizado é da marca Victron Energy com o modelo Orion-Tr48/12-20 e encontra-se representado na Figura 36.

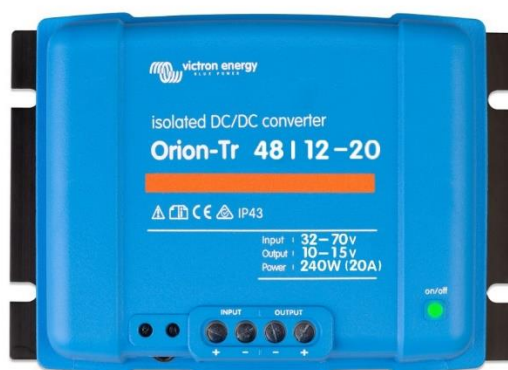


Figura 36. Transformador Orion-Tr | 12-20.

### 3.1.8. Sistemas de proteção

Devido à elevada intensidade de corrente no circuito de potência, é importante utilizar fusíveis de proteção para garantir a segurança total do robô. O fusível garante que em casos de sobrecarga ou curto-circuito, o robô seja protegido contra possíveis danos. Qualquer sobreaquecimento do sistema de potência poderá provocar danos irreversíveis e causar acidentes. O circuito de locomoção é o mais propício a sobreaquecimentos devido à elevada intensidade de corrente necessária para os motores (39 A). De forma a proteger cada circuito, serão utilizados 4 fusíveis da marca LITTELFUSE com o modelo 0581050.X, representado na Figura 37, com uma tensão nominal de 48 V e corrente de corte de 50 A.



Figura 37. Fusível da marca LITTELFUSE.

As características do fusível com o modelo 157.5701.5501 estão representadas na Tabela 7.

Tabela 7. Características técnicas fusível.

<b>Atributo de produto</b>	<b>Valor do atributo</b>
Fabricante	Littelfuse
Categoria de produto	Fusíveis especializados
RoHS	Detalhes
Série	157.5701
Produto	Bolt Down Fuses
Potência nominal	50 A
Regime de tensão DC	48 VDC
Estilo de montagem	Stud
Estilo de acabamento	Bolt Down
Tipo de fusível	Fast Blow
Tamanho / Grupo do fusível	FUSE STRIP
Estilo do indicador	Element Window
Embalagem	Bulk
Marca	Littelfuse

Os controladores são vulneráveis a danos elétricos, podendo danificar as suas entradas e saídas quando são sujeitos a correntes e tensões mais elevadas. De forma a proteger o controlador, serão utilizados separadores galvânicos, que têm a função de isolar o circuito, prevenindo a passagem direta da corrente elétrica ou interferência. A principal característica do separador galvânico é proteger os controladores, como o Arduino, de danos causador por picos de tensão e correntes de fuga que podem interferir com a precisão de leitura dos sensores. É bastante importante salvaguardar a leitura correta de dados, pois os sensores mais utilizados são de 4-20 mA, onde a corrente utilizada é mínima e qualquer corrente de fuga provocará erros na leitura. Serão utilizados separadores galvânicos da marca Aplisens, modelo SP-11, conforme representados na Figura 38.



Figura 38. Separador galvanico da marca Aplisens com o modelo SP-11.

As configurações consoante o tipo de sensor utilizado estão representadas na Tabela 8.

Tabela 8. Configurações de entrada.

Input	Switches			
	1	2	3	4
<b>4...20 mA</b>	+	-	+	+
<b>0...20 mA</b>	+	+	-	+
<b>0...5 mA</b>	+	+	-	-
<b>1...5 mA</b>	+	-	+	-
<b>0...10 V</b>	-	+	-	+
<b>2...10 V</b>	-	-	+	+

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Desenhos

Os desenhos/esboços do robô foram efetuados no programa *Fusion 360*. O programa foi desenvolvido pela *Autodesk* e combina recursos de CAD, CAM e CAE tornando-se assim um ótimo programa de modelação 3D e simulação. A sigla CAD significa (*Computer-Aided Design*), e consiste num *software* onde é possível criar desenhos em 2D e 3D com precisão. É através destes recursos que é possível visualizar o projeto há escala real e projetar todos os componentes consoante as dimensões. A sigla CAM significa (*Computer-Aided Manufacturing*) consiste num programa que utiliza os projetos CAD para automatizar a fabricação dos produtos, isto é, transforma os modelos 3D em linhas de código para posteriormente máquinas como CNC, fresas, impressoras 3D fabricarem os projetos. A sigla CAE significa (*Computer-Aided Engineering*) e consiste num conjunto de ferramentas utilizado para realizar análises e simulações. Estas ferramentas são muito importantes no dimensionamento do projeto, porque é através destas simulações que verificamos a zona que irá estar mais sujeita a esforços, quantificar a força que irá ser exercida. O programa *Fusion 360* recolhe estas 3 vertentes tornando-se assim um *software* completo. Na Figura 39 está representada a diferença entre as 3 ferramentas (Verma, 2018).

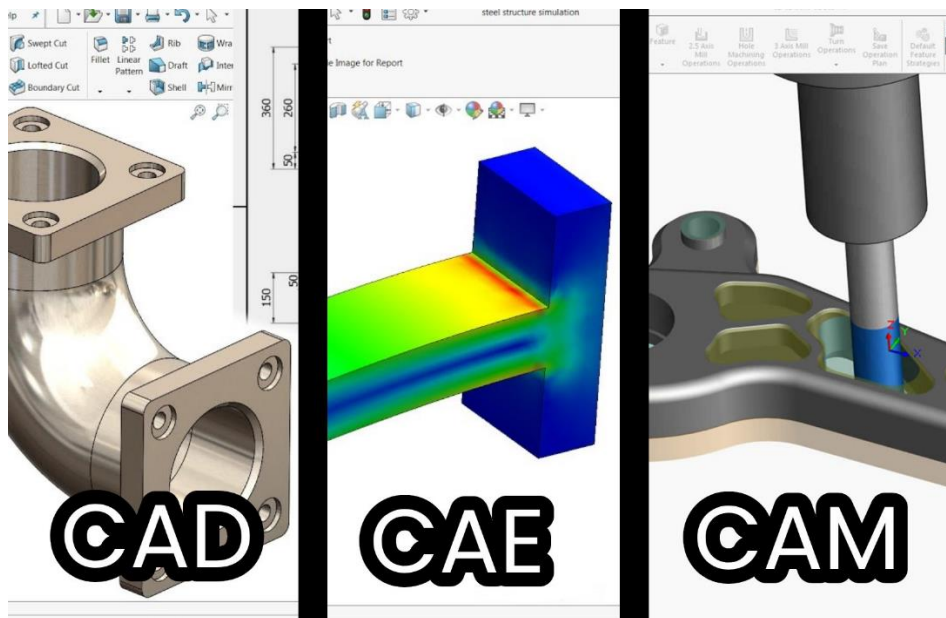


Figura 39. Software Fusion 360: CAD, CAE e CAM.

### 3.2.2. Esboço estrutural

As dimensões do robô tiveram como consideração principal as dimensões padrões de uma caixa/palote de apanha de fruta, que são 1000x1200x700 [mm]. Um esboço de uma caixa padrão está representado na Figura 40.

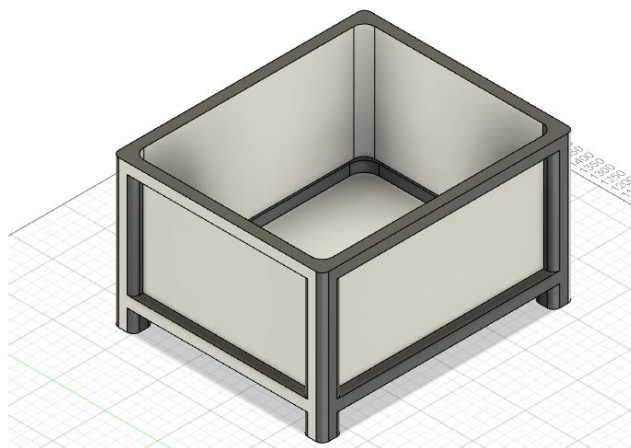


Figura 40. Palote.

A partir desta medida foi desenvolvido o primeiro esboço da estrutura de suporte para o robô com as dimensões de 1800x1500x100 [mm], com 4 rodas de 500 [mm] de diâmetro.

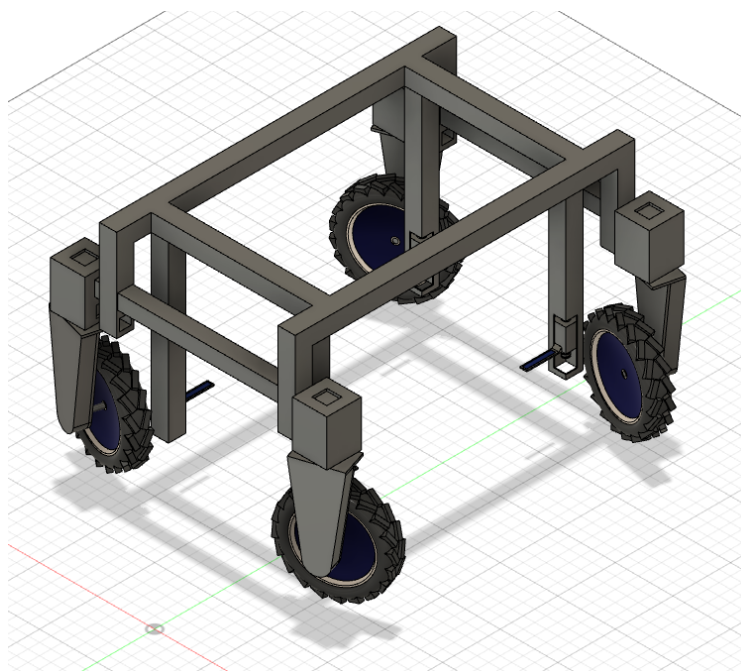


Figura 41. Primeiro esboço estrutural.

Com os motores independentes, pode-se abdicar do uso dos motores de direção, poupando assim energia e retirando peso. A estrutura foi redesenhada e está representada na Figura 42 para um segundo esboço, contemplando já os apoios para os motores e caixas redutoras. Outra alteração efetuada foi o sistema de levantamento de palote, que terá que recolher os garfos e as células de carga quando irá posicionar-se para que não embata nos apoios do palote e está representada com detalhe na Figura 43.

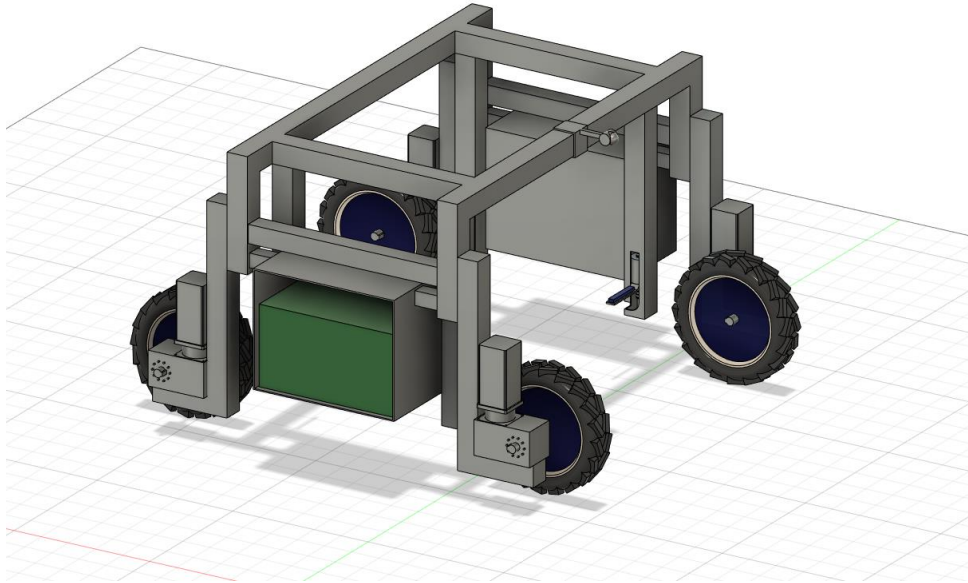


Figura 42. Segundo esboço estrutural.

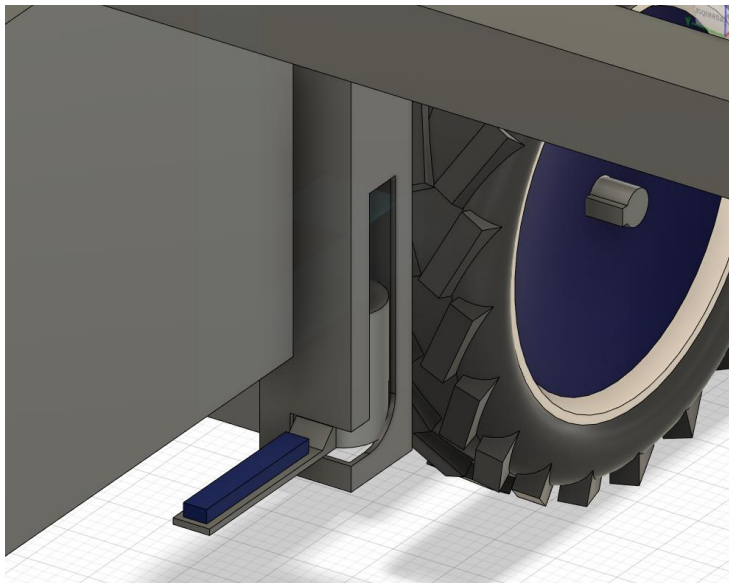


Figura 43. Célula de carga rebatida.

Com esta versão é possível rebater a célula de carga quando o robô estiver a movimentar-se para carregar um palote vazio. O atuador inverte o sentido, baixando assim a célula. Como a estrutura tem um raio de curvatura, obrigará a mesma a recolher. Quando o palote estiver na posição certa, o atuador efetua o movimento ascendente o que obrigará a retornar à posição correta e por consequente irá levantar o palote.

Nas Figuras 44 e 45 pode-se observar em pormenor os compartimentos com os controladores ATO, transformador e a respetiva bateria.

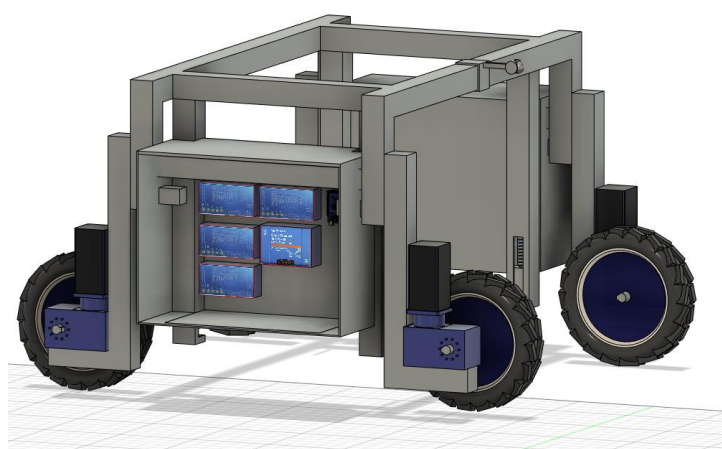


Figura 44. Esboço da localização da eletrónica.

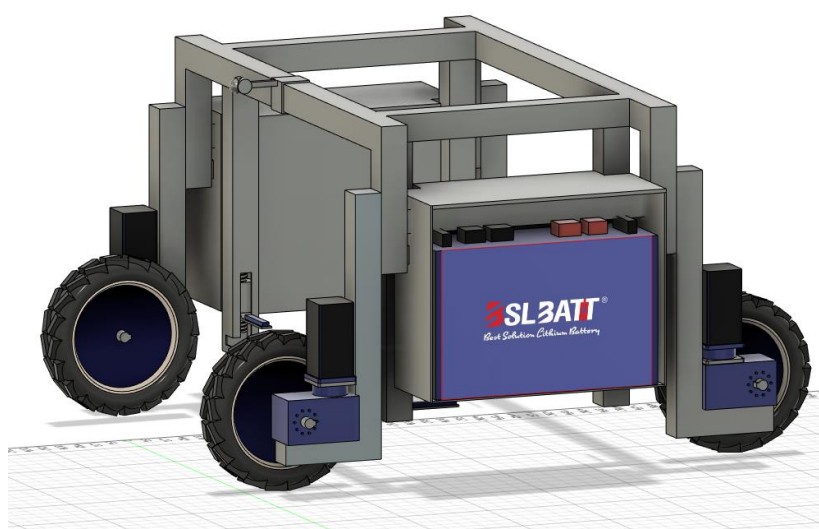


Figura 45. Esboço da localização da bateria.

De forma a manter uma temperatura uniforme e prevenir qualquer sobreaquecimento nos componentes foram colocadas ventoinhas nas caixas laterais. Na Figura 46 está representado um esboço das ventoinhas nas caixas.

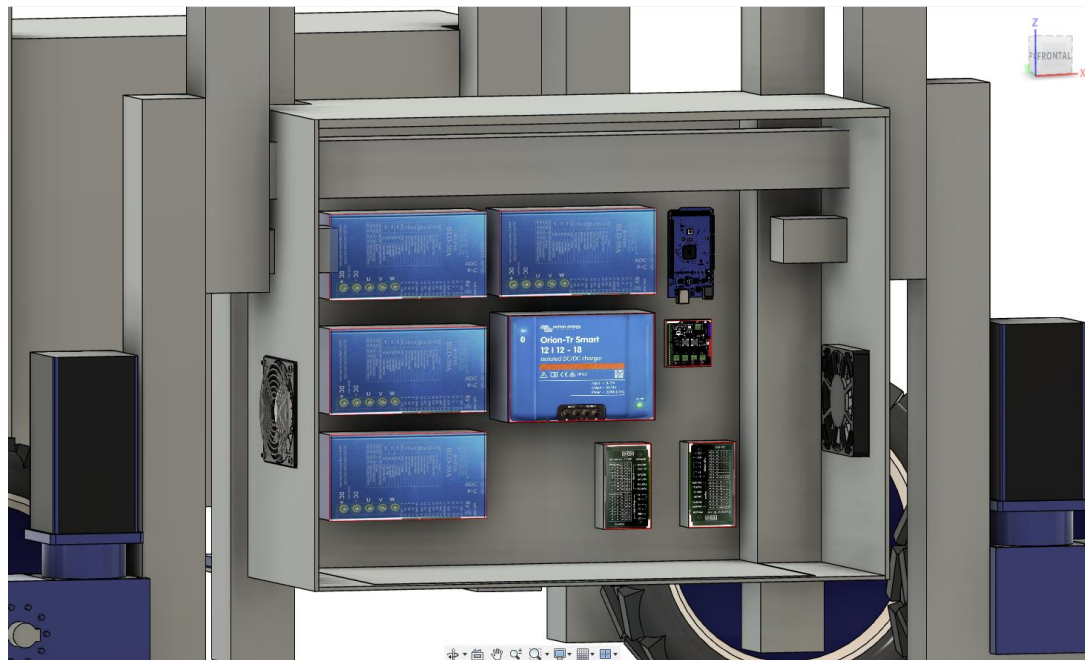


Figura 46. Destaque ventoinhas.

### 3.2.3. Análise estrutural

De forma a analisar a estrutura, foi utilizado o programa *Fusion 360*. Através desta é analisada a fadiga dos materiais, a deformação e o deslocamento máximo que os materiais terão com a carga. Para efeitos de simulação foi utilizado o peso anteriormente calculado na Equação (1) de 6867 N.

Na Figura 47 pode-se observar a análise do deslocamento, onde se verifica que irá ter um máximo de 0,07783 mm para uma carga de 700 kg, o equivalente a 6867 N. Como o deslocamento é baixo, significa que o material escolhido garante o esforço solicitado.

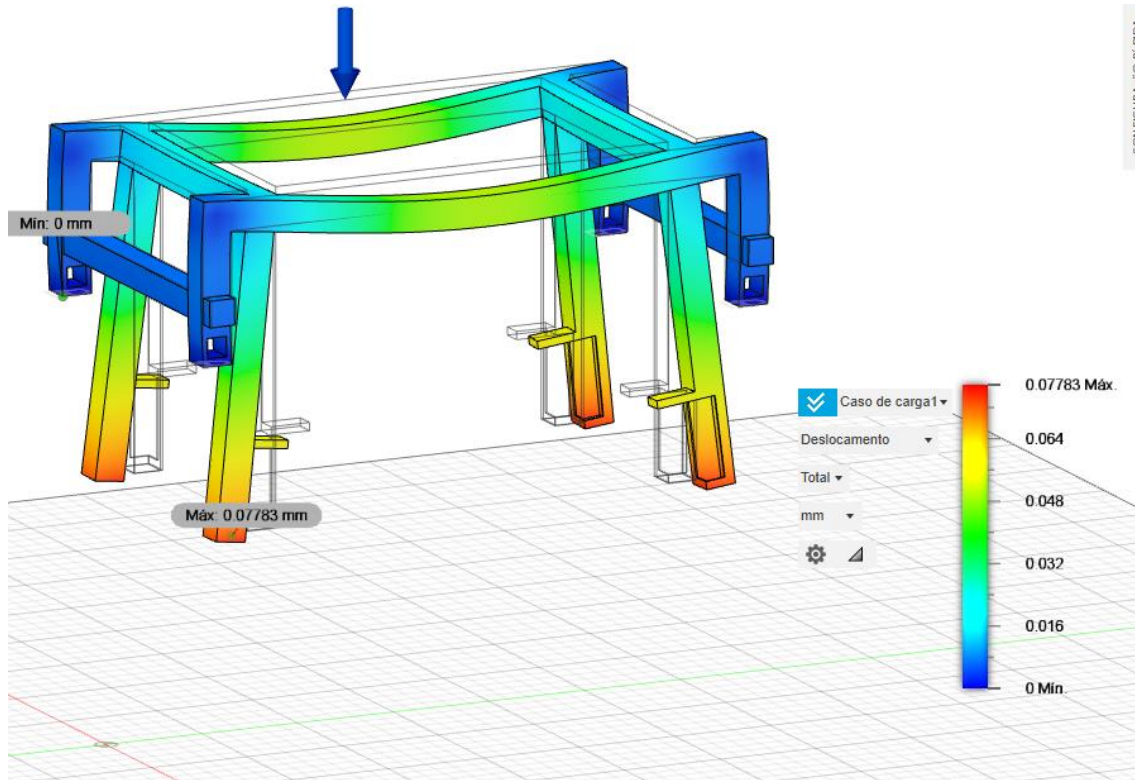


Figura 47. Previsão do deslocamento através do *Fusion 360*.

Outra análise importante quando se dimensiona estruturas é a análise da tensão, onde se irá verificar o ponto máximo que a estrutura irá sofrer, e qual o seu valor. Através da Figura 48 verifica-se que o valor máximo observado para as mesmas condições definidas anteriormente é de 4,3 MPa. Pode-se concluir que para esta análise, o aço escolhido cumpre também com os esforços solicitados.

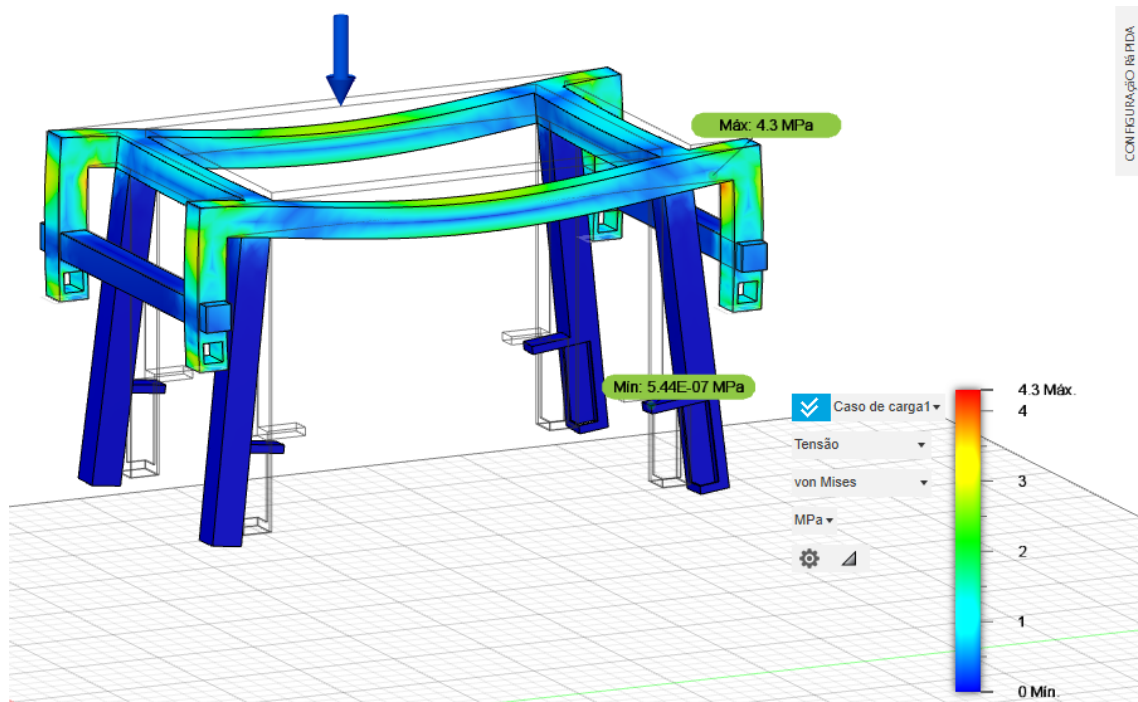


Figura 48. Previsão da tensão suportada através do *Fusion 360*.

A análise de deformações mostrada na Figura 49 demonstra que para a carga solicitada o aço 1060 escolhido anteriormente irá suportar sem se danificar, ou deformar.

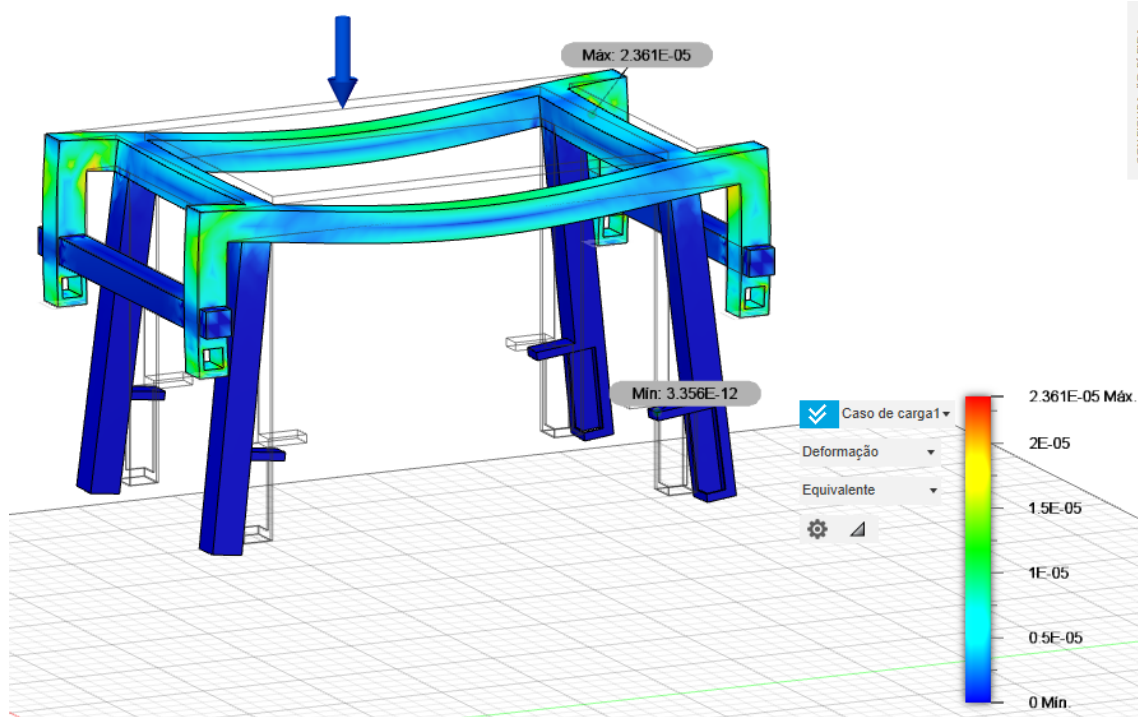


Figura 49. Previsão da deformações através do *Fusion 360*.

### 3.2.4. Esquema de ligação

Os esquemas de ligação desempenham um papel importante na conceção de circuitos elétricos e eletrónicos. Através de representações gráficas detalhadas pode-se garantir a funcionalidade, segurança e eficiência elétrica. Quando se criam esquemas de ligação, é possível observar de forma clara os componentes elétricos que estão no circuito, permitindo assim uma montagem mais facilitada. Na Figura 50 está representado o esquema de ligação entre a bateria, os conversores e o Arduino.

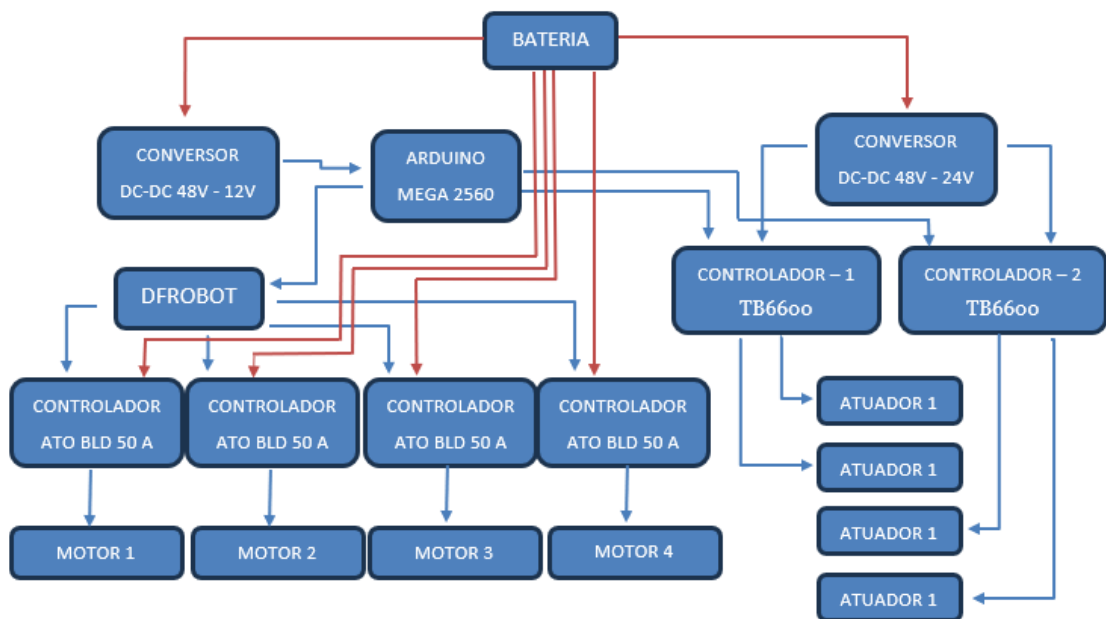


Figura 50. Esquema de ligação.

O circuito de ligação entre o controlador DFROBOT e os controladores ATO BLD 50A está representado no esquema da Figura 51.

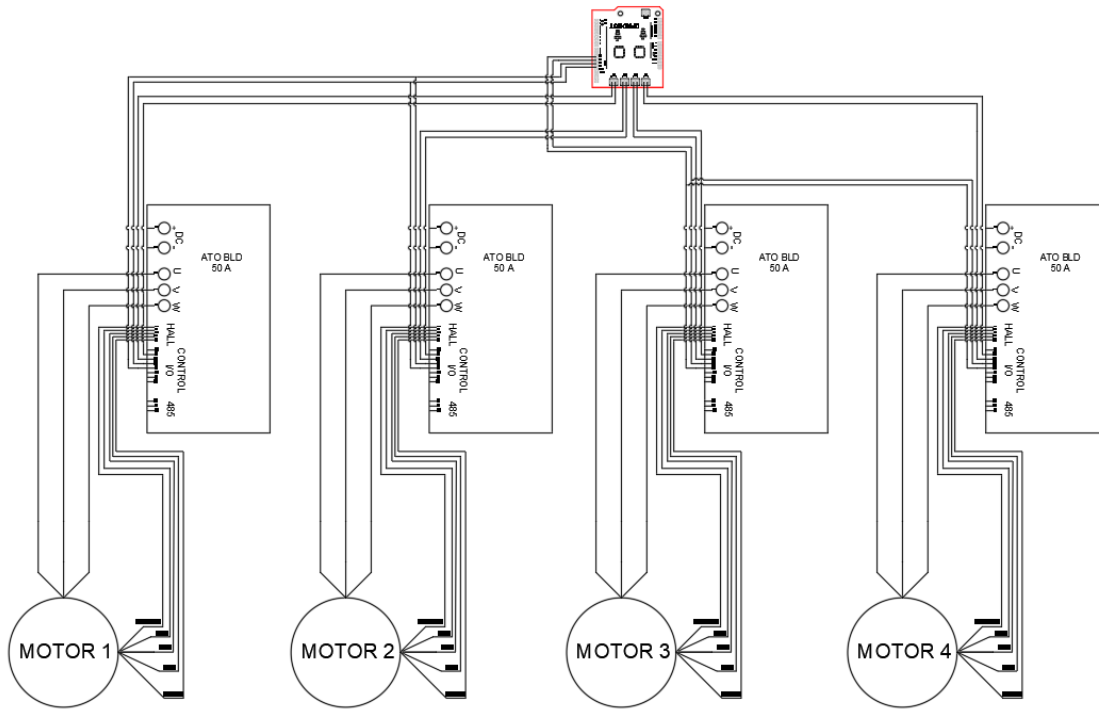


Figura 51. Esquema ligação Arduino-ATO BLD50A-motor.

O circuito de ligação entre o Arduino e os controladores TB6600 está representado na Figura 52.

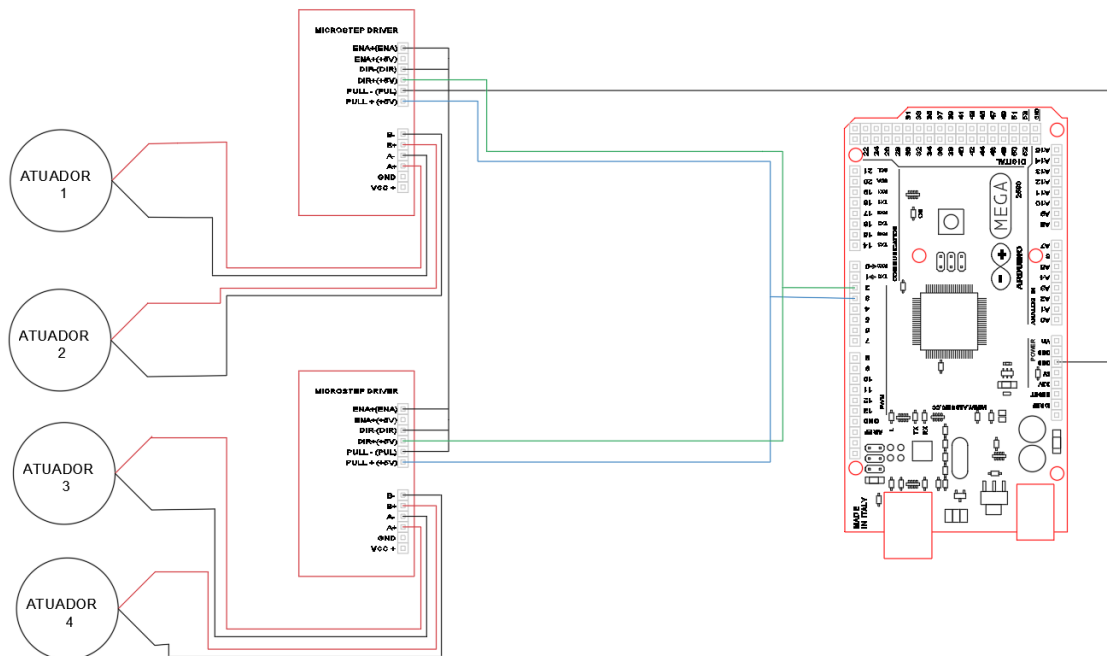


Figura 52. Esquema ligação Arduino-TB6600-atuador.

O sistema de potência principal parte da bateria de 48V para os conversores DC-DC e para os controladores como representado na Figura 53.

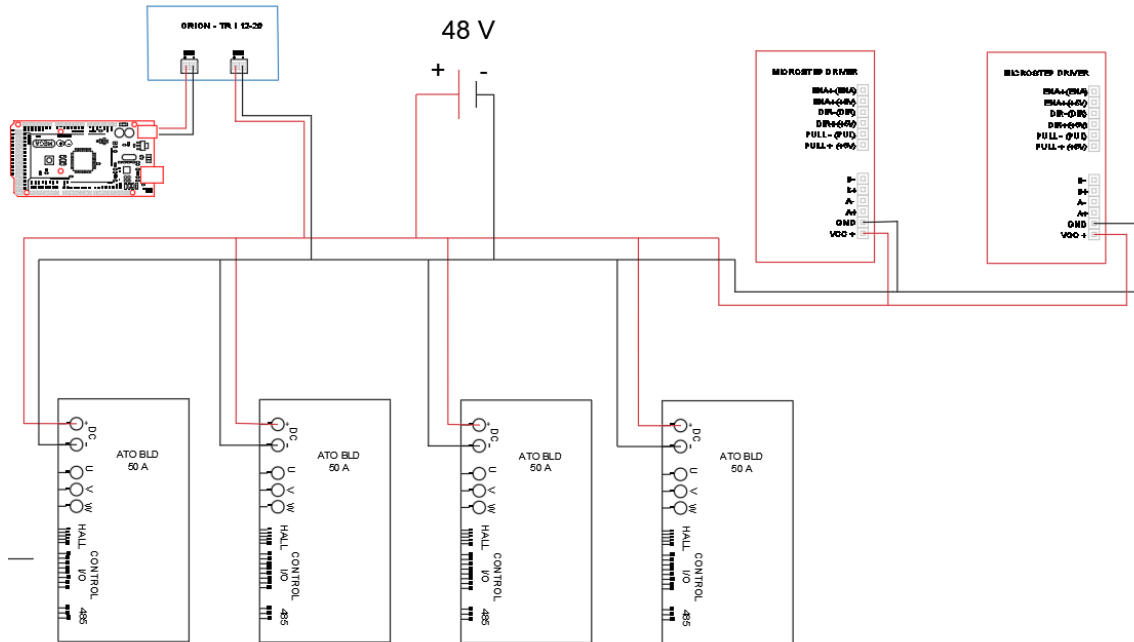


Figura 53. Esquema do sistema de potência principal.

Na Figura 54. está representado o esquema de ligação dos sensores e do LCD com o Arduino de forma a visualizar todas as variáveis.

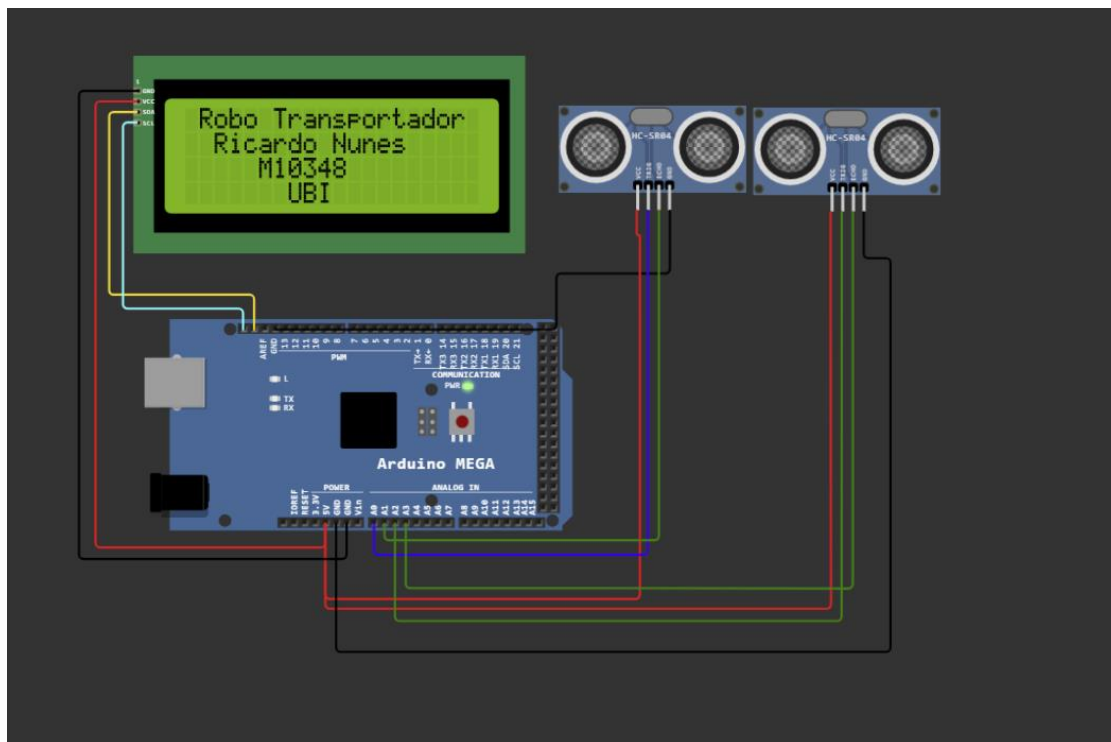


Figura 54. Esquema ligação sensores – Arduino

### 3.2.5. Dimensionamento da cablagem

O processo de dimensionamento da cablagem refere-se ao processo de calcular o diâmetro e a capacidade dos cabos elétricos num sistema. Esta etapa é bastante importante, pois é através desta que é possível prevenir sobrecargas, determinando a capacidade máxima dos cabos e assim evitar sobreaquecimento. O dimensionamento da cablagem é crucial para todos os projetos, evitando o uso excessivo de cabos reduzindo assim custos associados.

O dimensionamento é dividido em diversos circuitos:

O circuito entre a bateria e os conversores ATO BLD-50 para os motores de locomoção são os que necessitarão de uma maior secção, devido à elevada potência utilizada por cada um. Cada motor terá uma intensidade de corrente de pico de 39 A, e uma tensão de 48 V, com uma distância máxima entre bateria e inversor de 2 m. Para calcular a secção mínima do circuito recorre-se há fórmula (8).

$$S = \frac{2 * I * \rho * L}{\Delta V * V} * 100$$

Onde,

- S – Secção transversal do condutor em [mm<sup>2</sup>]

- $L$  – Distância total em [m]
- $I$  – Corrente [A]
- $\Delta V$  – Queda de tensão máxima do sistema em percentagem [%]
- $V$  – Tensão em [V]
- $\rho$  – Resistividade do cobre em [ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ]

Assumindo uma queda de tensão máxima de 1%, a resistividade do cobre vem conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9. Resistividade do cobre.

<b>Material</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega \text{ mm}^2/\text{m}</math>)</b>
<b>Alumínio</b>	0,02857
<b>Cobre</b>	0,0172
<b>Estanho</b>	0,11 - 0,14
<b>Ferro</b>	0,10 - 0,15
<b>Mercúrio</b>	0,95
<b>Níquel</b>	0,1
<b>Prata</b>	0,016

$$S = \frac{2 * 50 * 0,0172 * 2}{1\% * 48} * 100$$

$$S = 7,166 \text{ mm}^2$$

Este resultado significa que é necessário utilizar um cabo com uma secção mínima de 7,166 mm<sup>2</sup>, para um circuito de 48 V, com uma corrente máxima de 50A e uma distância máxima de 2m. No mercado não existe cabos com a secção calculada, pelo que a secção acima é de 10 mm<sup>2</sup>. Assim, será utilizado o cabo PV-ZZ-F, com um condutor flexível de cobre estanhado, possuindo um isolamento em borracha E16 e uma bainha em borracha EM8. Este tipo de cabo está preparado para serviços móveis e para instalações fixas, tendo uma temperatura de serviço de -40°C a +120°C. Na Figura 55 está representado o esquema do cabo.

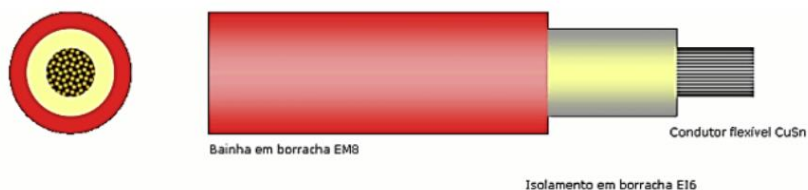


Figura 55. Cabo PV-ZZ-F 10mm<sup>2</sup>.

O circuito entre as baterias e os conversores TB6600 para os atuadores terá uma tensão de 24 V e uma corrente de pico de 2A, pelo que aplicando novamente a fórmula:

$$S = \frac{2 * 2 * 0,0172 * 2}{1\% * 24} * 100$$

$$S = 0,57 \text{ mm}^2$$

De forma a garantir a máxima segurança do circuito, o cabo a utilizar é de 1,5mm<sup>2</sup> do mesmo modelo que utilizado anteriormente.

### 3.2.6. Sistema perseguidor

O principal objetivo do robô é perseguir o robô que apanha a fruta e coloca-la dentro do palote de forma totalmente autónoma. Para que isso seja possível, o robô perseguidor tem que seguir de forma eficaz, mantendo sempre a distância estipulada, como representado na Figura 56.

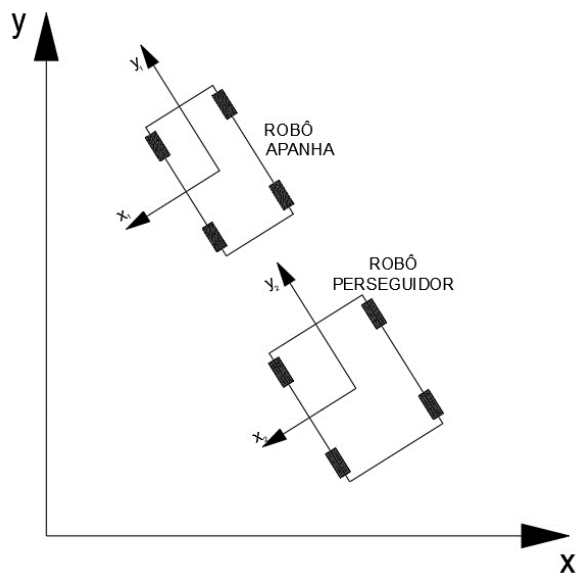


Figura 56. Representação esquemática.

Será necessário a utilização de sensores IR com a finalidade de o robô perseguidor detectar a distância exata a que está do robô de apanha. Para garantir de forma eficaz a distância, serão utilizados 2 sensores de infravermelhos, um na extremidade esquerda e outro na extremidade direita do robô perseguidor. É possível acontecer 4 cenários diferentes:

1. Quando o robô de apanha se locomover para a direita, o sensor da extremidade esquerda irá detectar um aumento de distância. Para compensar esse aumento o robô perseguidor irá aumentar a velocidade das rodas esquerdas de forma a igualar a distância dos dois sensores como representado na Figura 57.

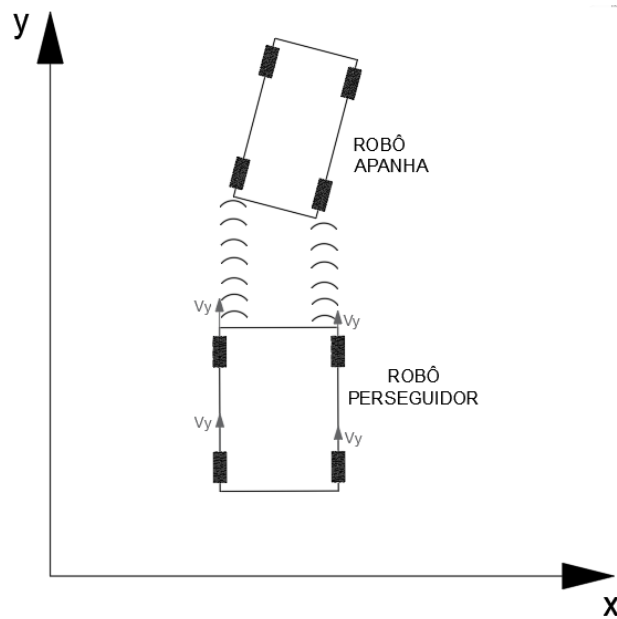


Figura 57. Representação esquemática.

2. Quando o robô de apanha se locomover para a esquerda, o sensor da extremidade direita irá detectar um aumento de distância. Para compensar esse aumento o robô perseguidor irá aumentar a velocidade das rodas direitas de forma a igualar a distância dos dois sensores.
3. Quando o robô de apanha aumentar a velocidade, o robô perseguidor irá detectar um aumento linear da distância em ambas as extremidades. Para compensar irá aumentar a velocidade nas 4 rodas até estabelecer a distância estipulada inicialmente.
4. Quando o robô de apanha diminuir a velocidade, o robô perseguidor irá detectar uma diminuição linear da distância em ambas as extremidades. Para compensar irá diminuir a velocidade nas 4 rodas até estabelecer a distância estipulada inicialmente.

### **3.2.7. Código**

Para que seja possível a perseguição ao robô de apanha de fruta, é imprescindível a utilização de programar o microcontrolador com um código, de modo a que o Arduino processe a informação dos sensores e a transforme em comandos para os motores. Abaixo segue a base para o algoritmo do código.

irão ser utilizados 2 sensores IR nas extremidades do robô. Estes irão medir a distância e orientação a que o robô de transporte de palotes se encontra do robô de apanha. Esta distância terá de ser de 50 cm. Para que seja possível uma perseguição eficaz, sempre que o sensor da esquerda detetar uma distância acima de 50 cm irá aumentar a velocidade das duas rodas da direita até o sensor detetar novamente uma distância de 50 cm. Quando o sensor da direita detetar um aumento da distância irá acontecer o mesmo procedimento, mas nas rodas da esquerda.

Abaixo apresenta-se o algoritmo de controlo da locomoção do robô perseguidor. Todo o código se encontra comentado explicando o seu funcionamento. Apesar disso, abaixo é apresentado um fluxograma que indica o funcionamento do código.

Inicialmente, o robô irá ligar os motores para uma velocidade predefinida de 0,4 m/s, o que equivale a 127,5 PWM. Imediatamente a seguir irá medir a distância dos dois sensores colocados nas extremidades, onde se esta distância estiver entre os 45 e 55 cm o controlador irá manter essa velocidade, mantendo assim a direção. Caso contrário, se a distância for superior a 55 cm, significa que o robô de apanha está a aumentar a velocidade. Para o robô de transporte o alcançar até o intervalo de distância predefinido ( $45 < x < 55$  cm), terá de aumentar a velocidade. Caso a distância for inferior a 45 cm, significa que o robô de apanha está a abrandar, ou seja, é necessário diminuir a velocidade dos 4 motores. Caso nenhuma destas condições se verificar, significa que o robô de apanha está a curvar, e para que o robô de transporte consiga virar necessita de aumentar a velocidade das rodas laterais de forma independente. Caso o sensor da esquerda efetue medição de entre 45 a 55 cm e o sensor da direita efetue uma medição superior a 55 cm, significa que o robô está a virar para a esquerda, e assim sendo será aumentada a velocidade das rodas da direita e mantendo a velocidade das rodas da esquerda. Em caso contrário, se o sensor da direita medir valores entre 45 e 55 cm e o da esquerda superior a 55 cm, significa que está a virar à direita, logo irá ser aumentada a velocidade das rodas laterais da esquerda. Na Figura 58 está representado o fluxograma.

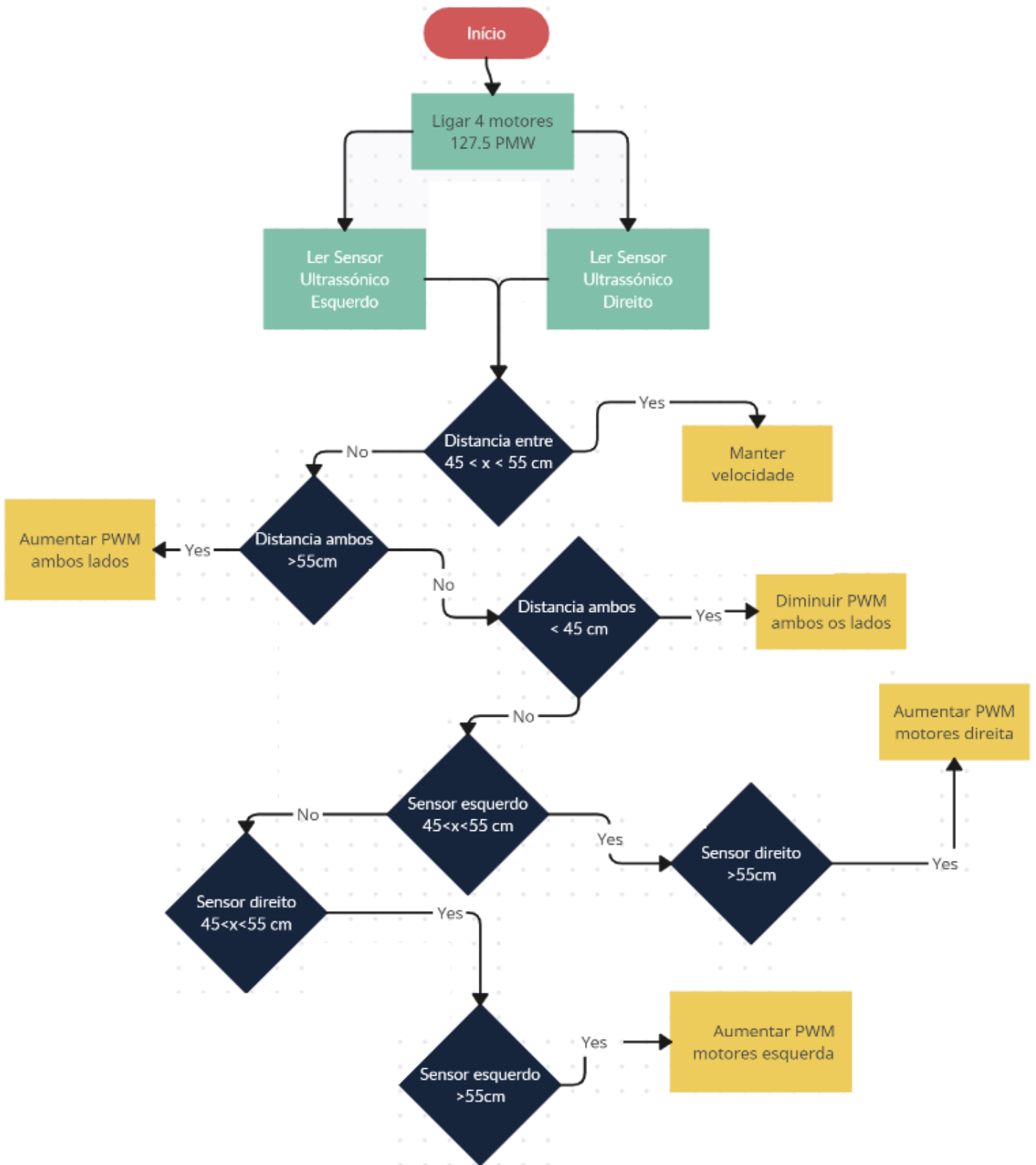


Figura 58. Fluxograma do controlo.

## Código

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Biblioteca do LCD

#define I2C_ADDR    0x27
#define LCD_COLUMNS 20
#define LCD_LINES   4

LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, LCD_COLUMNS, LCD_LINES);

#define ECHO_PIN_esq A1
#define TRIG_PIN_esq A0
#define ECHO_PIN_dto A3
#define TRIG_PIN_dto A2
#define MOTOR_1 13 // PINO PWM para MOTOR 1
#define MOTOR_2 12 // PINO PWM para MOTOR 2
#define MOTOR_3 11 // PINO PWM para MOTOR 3
#define MOTOR_4 10 // PINO PWM para MOTOR 4

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  pinMode(MOTOR_1, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR_2, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR_3, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR_4, OUTPUT);
  pinMode(TRIG_PIN_esq, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN_esq, INPUT);
  pinMode(TRIG_PIN_dto, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN_dto, INPUT);

  // Iniciar LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  // Texto Inicial do LCD
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("Robo Transportador");
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("Ricardo Nunes");
  lcd.setCursor(5, 2);
  lcd.print("M10348");
  lcd.setCursor(7, 3);
  lcd.print("UBI");
}
```

```
// Efetuar leitura distancia extremidade esquerda
float readDistanceCM_esq() {
    digitalWrite(TRIG_PIN_esq, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(TRIG_PIN_esq, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN_esq, LOW);
    int duration = pulseIn(ECHO_PIN_esq, HIGH);
    return duration * 0.034 / 2; // Velocidade do som 0.034 cm/ms
}

// Efetuar leitura distancia extremidade direita
float readDistanceCM_dto() {
    digitalWrite(TRIG_PIN_dto, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(TRIG_PIN_dto, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN_dto, LOW);
    int duration = pulseIn(ECHO_PIN_dto, HIGH);
    return duration * 0.034 / 2; // Velocidade do som 0.034 cm/ms
}

void loop() {
    //definir PWM inicial
    int velocidade_esq = 127.5; // Valor inicial PWM ( 0 A 255) -
    // V=0,45 m/s
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq );
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq );

    int velocidade_dto = 127.5; // // Valor inicial PWM ( 0 A 255) -
    // V=0,45 m/s
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto );
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto );

    // Definir a distancia que aparece no LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Dist Esq: ");
    lcd.print(readDistanceCM_esq());
    lcd.print(" CM");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Dist Dto: ");
    lcd.print(readDistanceCM_dto());
    lcd.print(" CM");

    // Condição para velocidade constante a direito.
```

```
    if(readDistanceCM_esq() <= 55 and readDistanceCM_esq() >=45 and
readDistanceCM_dto() <= 55 and readDistanceCM_dto() >=45 ) {
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq);
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq);
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto);
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto);

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("PWM Esq: ");
    lcd.print(velocidade_esq);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("PWM Dto: ");
    lcd.print(velocidade_dto);
    }

    // Condição para aumentar velocidade quando distancia estiver
// entre 55<X<75 a direito. *AUMENTO DE 63,75 - PWM*
    if(readDistanceCM_esq() >= 55 and readDistanceCM_dto() >=55 and
readDistanceCM_esq() <= 75 and readDistanceCM_dto() <=75 ) {
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq + 63.75);
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq + 63.75);
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto + 63.75);
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto + 63.75);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("PWM Esq: ");
    lcd.print(velocidade_esq + 63.75);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("PWM Dto: ");
    lcd.print(velocidade_dto + 63.75);
    }

    // Condição para aumentar velocidade quando distancia estiver
// superior a 75 a direito. *AUMENTO DE 127.5 - PWM*
    if(readDistanceCM_esq() >= 75 and readDistanceCM_dto() >= 75) {
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq + 127.5);
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq + 127.5);
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto + 127.5);
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto + 127.5);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("PWM Esq: ");
    lcd.print(velocidade_esq + 127.5);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("PWM Dto: ");
    lcd.print(velocidade_dto + 127.5);
    }

    // Condição para diminuir velocidade quando distancia estiver
```

```
// entre 25 < X < 45 a direita. *DIMINUIÇÃO DE 63,75 - PWM*
  if(readDistanceCM_esq() >= 25 and readDistanceCM_dto() <= 45) {
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq - 63.75);
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq - 63.75);
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto - 63.75);
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto - 63.75);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("PWM Esq: ");
    lcd.print(velocidade_esq - 63.75);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("PWM Dto: ");
    lcd.print(velocidade_dto - 63.75);
  }

// Condição para diminuir a velocidade quando distancia estiver
// inferior a 25 a direita. *DIMINUIÇÃO DE 127.5 - PWM*
  if(readDistanceCM_esq() <= 25 and readDistanceCM_dto() <= 25) {
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq - 127.5);
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq - 127.5);
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto - 127.5);
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto - 127.5);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("PWM Esq: ");
    lcd.print(velocidade_esq - 127.5);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("PWM Dto: ");
    lcd.print(velocidade_dto - 127.5);
  }

// Condição para virar 10° para a direita
  if(readDistanceCM_esq() >= 75 and readDistanceCM_esq() <=134 and
readDistanceCM_dto() >=45 and readDistanceCM_dto() <=55 ) {
    analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq + 42.5);
    analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq + 42.5);
    analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto);
    analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("PWM Esq: ");
    lcd.print(velocidade_esq + 42.5);
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("PWM Dto: ");
    lcd.print(velocidade_dto);
  }

// Condição para virar 30° para a direita
  if(readDistanceCM_esq() >= 135 and readDistanceCM_esq() <=196
and readDistanceCM_dto() >=45 and readDistanceCM_dto() <=55 ) {
```

```
analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq + 42.5+42.5);
analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq + 42.5+42.5);
analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto);
analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("PWM Esq: ");
lcd.print(velocidade_esq + 42.5+42.5);
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("PWM Dto: ");
lcd.print(velocidade_dto);
}

// Condição para virar 50° para a direita
if(readDistanceCM_esq() >= 197 and readDistanceCM_dto() >=45 and
readDistanceCM_dto() <=55 ) {
  analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq + 42.5+42.5+42.5);
  analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq + 42.5+42.5+42.5);
  analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto);
  analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("PWM Esq: ");
  lcd.print(velocidade_esq + 42.5+42.5+42.5);
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("PWM Dto: ");
  lcd.print(velocidade_dto);
}

// Condição para virar 10° para a esquerda
if(readDistanceCM_dto() >= 75 and readDistanceCM_dto() <=134 and
readDistanceCM_esq() >=45 and readDistanceCM_esq() <=55 ) {
  analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq );
  analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq );
  analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto + 42.5);
  analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto + 42.5);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("PWM Esq: ");
  lcd.print(velocidade_esq);
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("PWM Dto: ");
  lcd.print(velocidade_dto + 42.5);
}

// Condição para virar 30° para a esquerda
if(readDistanceCM_dto() >= 135 and readDistanceCM_dto() <=196
and readDistanceCM_esq() >=45 and readDistanceCM_esq() <=55 ) {
  analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq);
  analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq);
```

```

analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto + 42.5+42.5);
analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto + 42.5+42.5);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("PWM Esq: ");
lcd.print(velocidade_esq);
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("PWM Dto: ");
lcd.print(velocidade_dto + 42.5+42.5);
}

// Condição para virar 50° para a esquerda
if(readDistanceCM_dto() >= 197 and readDistanceCM_esq() >=45 and
readDistanceCM_esq() <=55 ) {
  analogWrite(MOTOR_1, velocidade_esq);
  analogWrite(MOTOR_2, velocidade_esq);
  analogWrite(MOTOR_3, velocidade_dto + 42.5+42.5+42.5);
  analogWrite(MOTOR_4, velocidade_dto + 42.5+42.5+42.5);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("PWM Esq: ");
  lcd.print(velocidade_esq);
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("PWM Dto: ");
  lcd.print(velocidade_dto + 42.5+42.5+42.5);
}
delay(1000);
}

```

### 3.3. Nota conclusiva

Neste capítulo foi elaborada uma matriz decisão com os principais aspetos para a escolha de um bom meio de locomoção. Neste capítulo foram dimensionados os motores elétricos consoante as necessidades esperadas nos solos agrícolas. Foram estipulados valores como velocidade, peso e inclinação máxima a que o robô possa estar sujeito nos solos agrícolas. Para que um robô seja totalmente autónomo é imprescindível o uso de sensores, em contrapartida, este será incapaz de receber dados das características do meio ambiente onde está inserido, assim como o estado de tudo o que o rodeia. É através do uso de sensores que o robô consegue conhecer a temperatura ambiente e a temperatura dos seus componentes eletrónicos, conhecer a sua posição relativa, a sua velocidade, por entre outros fenómenos que são imprescindíveis para que ele seja totalmente autónomo. Para que seja possível ao processamento de toda a informação proveniente dos sensores é necessário o uso de um microcontrolador. Existem diversas controladoras no mercado, contudo, neste capítulo foi demonstrado o microcontrolador Arduino, assim como a sua história e as suas principais características. Neste capítulo foi calculada a potência necessária dos motores de locomoção para que consiga transportar o palote com a carga. Através da potência calculada

dimensionou-se a bateria para que o robô consiga ter autonomia durante os trabalhos. Foram definidos quais os motores e controladores a utilizar de forma a garantir o movimento, assim como a marca e modelo da bateria. Foram elaborados esboços do robô através do programa Fusion 360, de forma a compreender a disposição dimensional de toda a estrutura e dos componentes eletrônicos. A análise estrutural foi também realizada no mesmo programa, onde se verificou que a estrutura proposta suporta os esforços impostos pelo palote de fruta. O dimensionamento elétrico realizado neste capítulo tem como objetivo selecionar a melhor secção para a cablagem, de maneira a garantir a segurança de todo o sistema. Foi elaborado o fluxograma e o código de controlo de locomoção do robô. Este fluxograma explica a lógica subjacente ao código, descrevendo de forma detalhada as diferentes funcionalidades e possibilidades de cada fase. O código foi desenvolvido tendo em conta as condições determinadas pelas medições dos sensores e assim assegurar a operação variando a velocidade dos motores sempre que necessário.

## 4. Análise de Discussão de Resultados

### 4.1. Introdução

Este capítulo tem como principal objetivo abordar de forma clara e objetiva o resultado da escolha de todos os componentes selecionados para a construção do robô. Com todos os componentes escolhidos será recalculado o peso, refazendo assim o dimensionamento de motores de forma a verificar se os motores selecionados são os apropriados. Posteriormente à verificação serão apresentados todos os materiais necessários para a construção, assim como as respectivas montagens e ligações. Por fim será demonstrado com todas as correções necessárias o esboço através do *Fusion 360* do resultado final do robô.

#### 4.1.1. Cálculo do peso do robô

De forma a compreender o peso de todo o robô, será elaborada uma tabela com o peso da estrutura, assim como os componentes a utilizar.

A estrutura foi projetada com tubos de aço AISI 1060 com as dimensões de 100x100x2, onde o peso do tubo de 6m está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Peso do tubo 100x100x2, (Aços Continente, 2010)

Peso teórico								
kg/m								
Bitola mm	Espessura							
	mm							
	0,9	1,06	1,2	1,5	1,9	2	2,25	2,65
80 x 80				3,7	4,67	4,91	5,51	6,47
90 x 90				4,17	5,27	5,54	6,22	7,3
100 x 100						6,17	6,92	8,13
110 x 110						6,79	7,63	8,96
120 x 120						7,42	8,33	9,79

Através do esboço final o robô, determina-se um comprimento total de 11 metros de tubo retangular com as dimensões de 100x100x2, o que representa um peso da estrutura total de 67,83 kg.

$$P_{estrutura} = 6,17 * 11 = 67,83 \text{ [kg]}$$

Os pesos dos componentes utilizados encontram-se apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Peso dos componentes.

<b>Designação</b>	<b>Peso [kg]</b>
<b>Estrutura</b>	±67,83
<b>Palote c/fruta</b>	±500,00
<b>Bateria</b>	±75,00
<b>Sensores</b>	±1,00
<b>Arduíno</b>	±0,2
<b>Rodas</b>	±35,00
<b>Motores + Caixas Redutoras</b>	±64,00
<b>Conversor TB6600</b>	±0,5
<b>Controlador ATO</b>	±2,00
<b>Células de Carga</b>	±2,00
<b>Atuadores KALATEC</b>	±10,00
<b>TOTAL</b>	<b>755,23</b>

O robô terá no total um peso de 755,23 kg. Inicialmente foi projetado para 700 kg. Através deste resultado será confirmada a potência necessária de forma a garantir a locomoção do robô.

Voltando a calcular o peso do conjunto através da Equação (9):

$$F = m * g \tag{9}$$

$$P = 755,23 * 9,81$$

$$P = 7408,80 \text{ N}$$

Posteriormente calcula-se a força necessária para estas condições através do sistema de Equações (10)

$$\begin{cases} x : F1 - Fa - Px = 0 \\ y : N - Py = 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} x : F1 - (\mu * N) - (N * \sin(\alpha)) = 0 \\ y : N = Py \end{cases}$$

$$\begin{cases} x : F1 - (0,5 * 7408,80) - (7408,80 * \sin(20)) = 0 \\ y : N = Py \end{cases}$$

$$\begin{cases} x : F1 = 6238,36 [N] \\ y : N = Py \end{cases}$$

$$F1 = 6238,36 [N]$$

Para calcular a potência necessária dos motores, recorre-se primeiramente ao cálculo do binário, Equação (11):

$$T = F1 * r \quad (11)$$

$$T = 6238,36 * 0,25$$

$$T = 1559,60 [Nm]$$

Para determinar a velocidade angular do equipamento usa-se a Equação (12)

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (12)$$

$$\omega = \frac{1}{0,25}$$

$$\omega = 4 [\text{rad/s}]$$

Por fim, para calcular a potência necessária para mover o conjunto usa-se a Equação (13).

$$P = T * \omega \quad (13)$$

$$P = 1559,60 * 4$$

$$P = 6238,40 [W]$$

A potência necessária para mover o conjunto é de 6238,40 [W]. Como existirão 4 motores independentes, divide-se a potência por 4, para assim determinar a potência necessária de cada um.

$$Pm = \frac{6238,40}{4}$$

$$Pm = 1559,60 [W]$$

Inicialmente foram projetados motores de 1500W, pelo que através dos cálculos finais observou-se não serem suficientes para cumprir com os requisitos de velocidade a 1 m/s a uma inclinação de 20°. Analisando estes dados como o pior cenário possível, optou-se por ajustar a velocidade máxima do robô para 0,9 m/s quando este está com uma inclinação de 20°.

Recalculando a potência necessária com a velocidade linear máxima de 0,9 m/s obtemos:

$$\omega = \frac{0,9}{0,25}$$

$$\omega = 3,6 \text{ [rad/s]}$$

$$P = T * \omega$$

$$P = 1559,60 * 3,6$$

$$P = 5614,56 \text{ [W]}$$

A potência total necessária para garantir a locomoção do robô a uma velocidade de 0,9 m/s é de 5614,56 [W]. Ao dividir a potência pelos 4 motores teremos uma potência de:

$$P = \frac{5614,56}{4} = 1403,64 \text{ [W]}$$

Com os novos requisitos o robô consegue locomover-se sem problemas com os motores inicialmente projetados.

#### 4.1.2. Controlo

O sistema de controlo terá várias vertentes, onde é necessário verificar se todas as variáveis estão a ser consideradas. Na Tabela 12. estão definidas as variáveis dos 4 motores, onde está definida a tensão, velocidade máxima e o controlo PWM.

Tabela 12. Características dos motores

LADO	MOTOR	Tensão máxima [V]	PMW máximo	Velocidade Máxima [m/s]
ESQUERDO SUPERIOR	MOTOR 1	48,00	255	0,90
ESQUERDO INFERIOR	MOTOR 2	48,00	255	0,90
DIREITO SUPERIOR	MOTOR 3	48,00	255	0,90
DIREITO INFERIOR	MOTOR 4	48,00	255	0,90

## Função 1: A direito

**Função 1.1:** A direito com distâncias constantes e velocidade constantes.

- Quando a distancia em ambos os sensores estiver entre os 45 e os 55 cm, o robô irá ter uma velocidade constante, como mostra a Tabela 13. Na Figura 59 está representada a simulação através do software wokwi, onde através do LCD se verificam as distâncias dos sensores e o controle PWM no momento.

Tabela 13. Alimentação dos motores para distância dos sensores na gama  $45 < \chi < 55$ .

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00

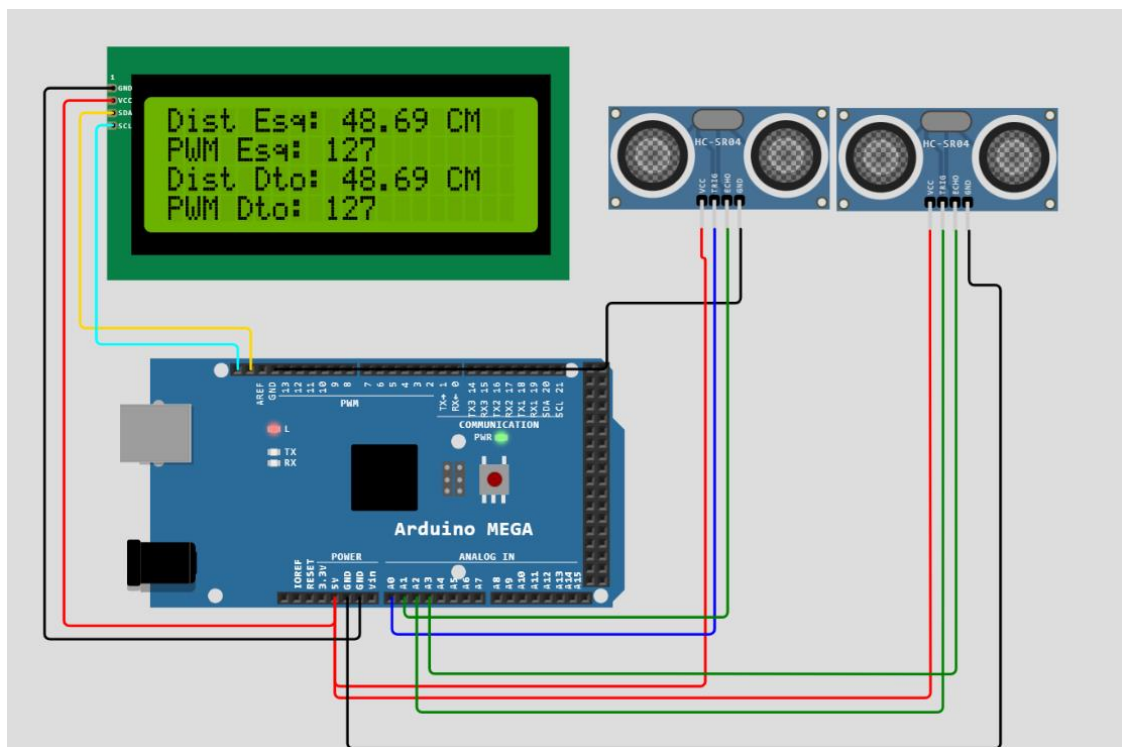


Figura 59. Função 1.1. Velocidade constante.

**Função 1.2:** A direito com aumento de velocidade.

- Quando a distância em ambos os sensores estiver entre os 55 e os 75 cm, o robô irá ter uma velocidade constante, mas com um incremento de 63,75 de PWM, como mostra a Tabela 14. Na Figura 60 está a representação para o aumento de velocidade a direito.

Tabela 14. Alimentação dos motores para distância dos sensores na gama  $55 < \chi < 75$ .

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW +63,75	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$55 < \chi < 75$	191,25	0,68	36,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$55 < \chi < 75$	191,25	0,68	36,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$55 < \chi < 75$	191,25	0,68	36,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$55 < \chi < 75$	191,25	0,68	36,00

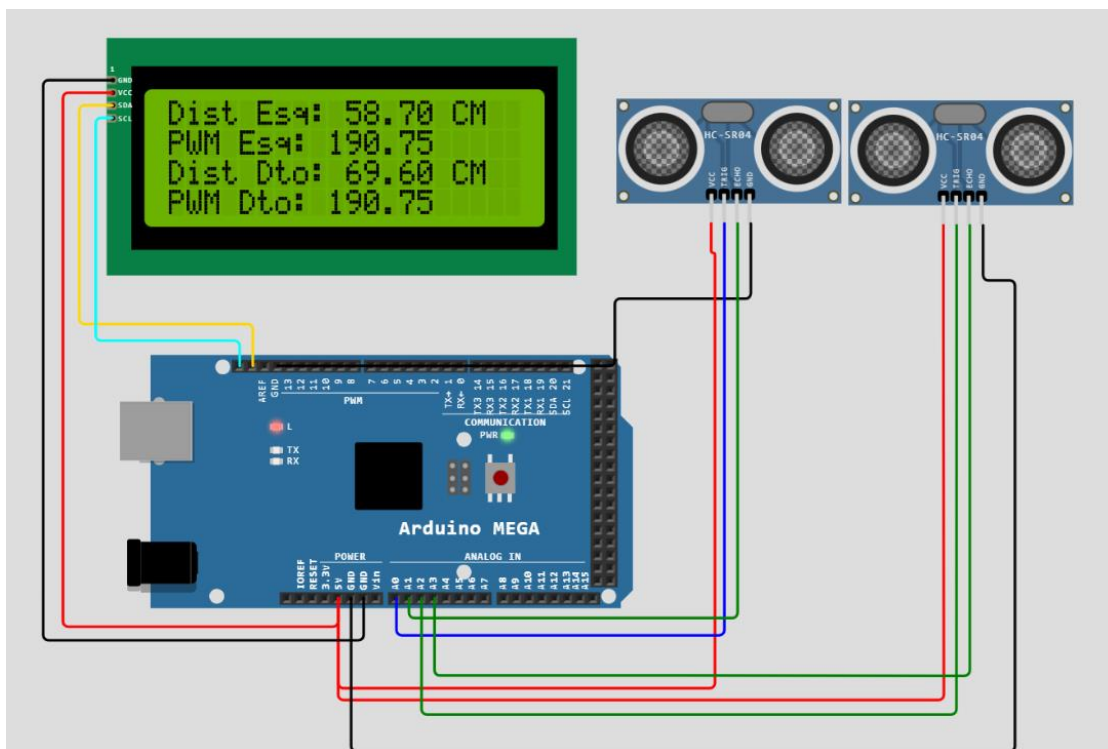


Figura 60. Função 1.2. Aumento velocidade a direito.

**Função 1.3:** A direito com aumento de velocidade.

- Quando a distância em ambos os sensores é superior a 75 cm, o robô irá ter uma velocidade constante, mas com um incremento de 127,5 de PWM, chegando assim ao máximo, como mostra a Tabela 15. Na Figura 61 está representada a simulação para a velocidade máxima a direito.

Tabela 15. Alimentação dos motores para distância dos sensores de  $\chi > 75$ .

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW +127,5	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$\chi > 75$	255	0,90	48,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$\chi > 75$	255	0,90	48,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$\chi > 75$	255	0,90	48,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$\chi > 75$	255	0,90	48,00

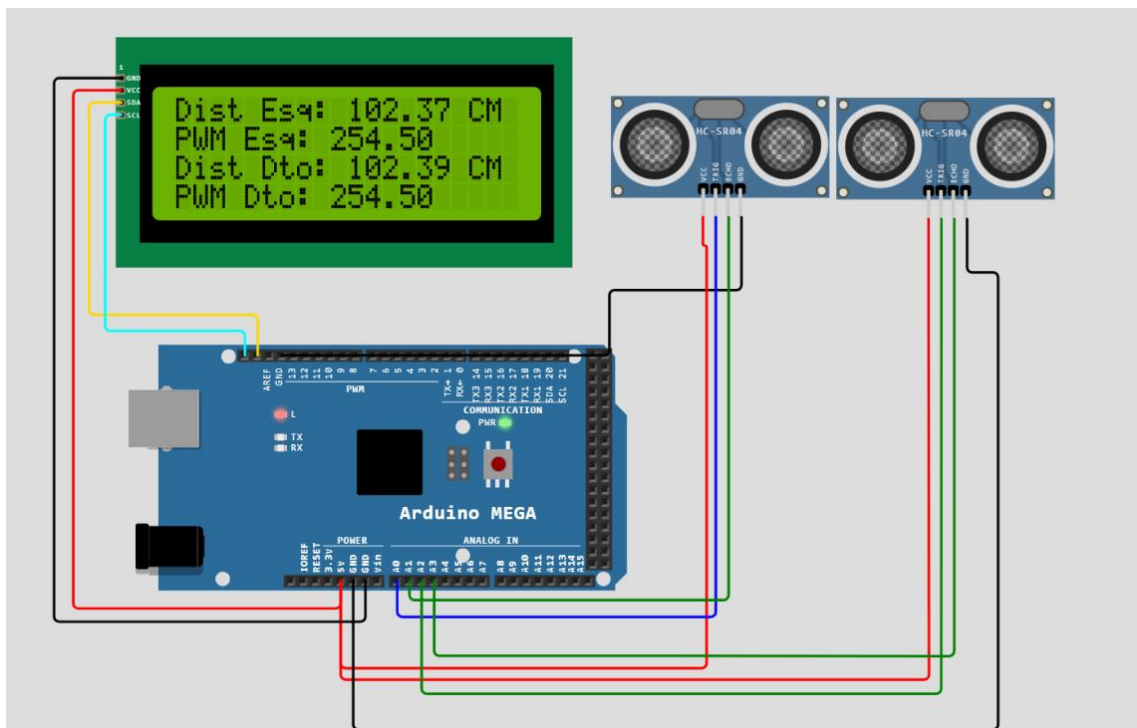


Figura 61. Função 1.3. Velocidade máxima a direito.

**Função 2: Virar para a direita**

- Para o robô conseguir virar à direita é necessário aumentar a velocidade nas rodas esquerdas. Quando o robô transportador virar  $\alpha^\circ$  significa que houve um aumento de distância do sensor esquerdo de  $\chi$  cm e a distância da direita irá permanecer no intervalo predefinido (45 e 55 cm). Para o cálculo do intervalo de distância para que seja necessário aumentar a velocidade, esta irá ser calculada, onde posteriormente será somada ao intervalo predefino.

**Função 2.1: Virar à direita 10°**

- Quando o robô virar 10° significa que houve um aumento de  $\pm 30$  cm face ao robô de apanha como demonstrado na Figura 62. Para tal haverá um aumento de 42,5 no controlo PWM nas rodas esquerdas sempre que existir um aumento de  $\pm 30$  cm face ao intervalo estabelecido, ficando assim com o intervalo desde os  $75 < x < 134$  (distância a que se prepara para virar 30°). Na Tabela 16 estão definidos os parâmetros. Na Figura 63 está a representação dos parâmetros para virar à direita 10°.

Tabela 16. Função 2.1. Alimentação dos motores para virar à direita 10°.

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	ESQUERDO SUPERIOR	MOTOR 1	$75 < \chi < 134$	170	0,60	32,00
	ESQUERDO INFERIOR	MOTOR 2	$75 < \chi < 134$	170	0,60	32,00
Direito	DIREITO SUPERIOR	MOTOR 3	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	DIREITO INFERIOR	MOTOR 4	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00

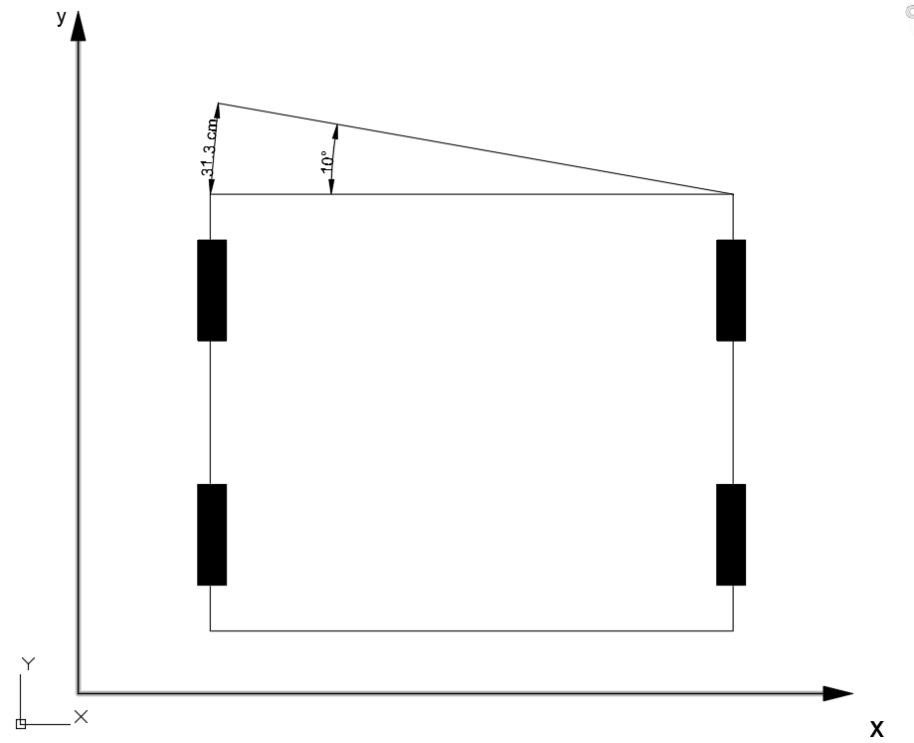


Figura 62. Função 2.1. Distância lado esquerdo 10°.

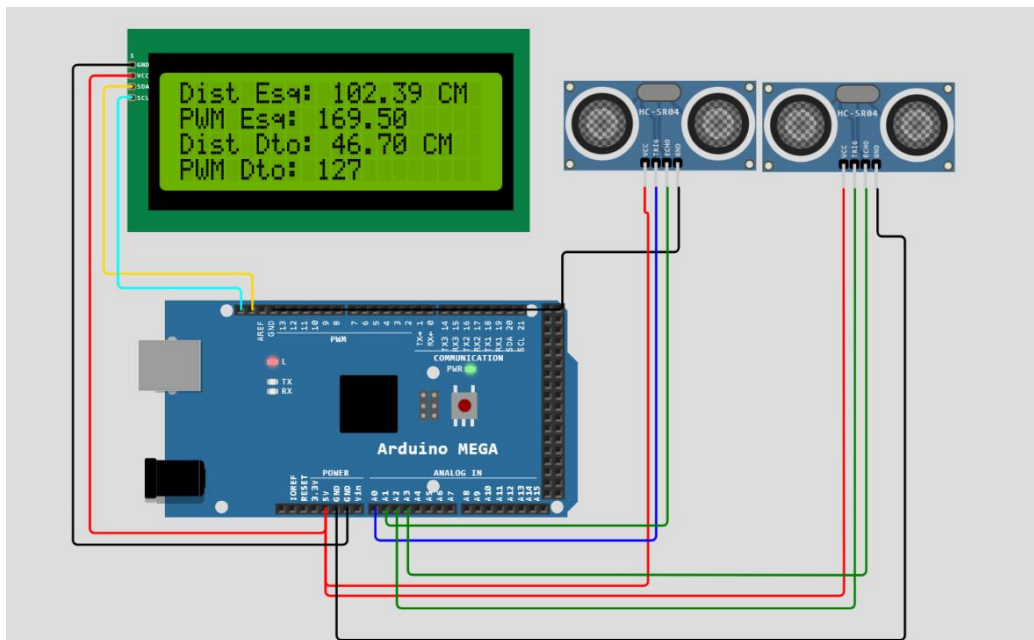


Figura 63. Função 2.1. Simulação virar à direita 10°.

**Função 2.2:** Virar à direita 30°

- Quando o robô virar 30° significa que houve um aumento de ±90 cm face ao robô de apanha como demonstrado na Figura 64. Para isso haverá um aumento de 85 no controlo PWM nas rodas esquerdas sempre que existir um aumento de ±90 cm face ao intervalo estabelecido, ficando assim com o intervalo de  $135 < x < 195$ . Na Tabela 17 estão definidos os parâmetros. Na Figura 65 está a representação dos parâmetros para virar à direita 30°.

Tabela 17. Função 2.2. Alimentação dos motores para virar à direita 30°

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$135 < x < 195$	212,5	0,75	40,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$135 < x < 195$	212,5	0,75	40,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$45 < x < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$45 < x < 575$	127,5	0,45	24,00

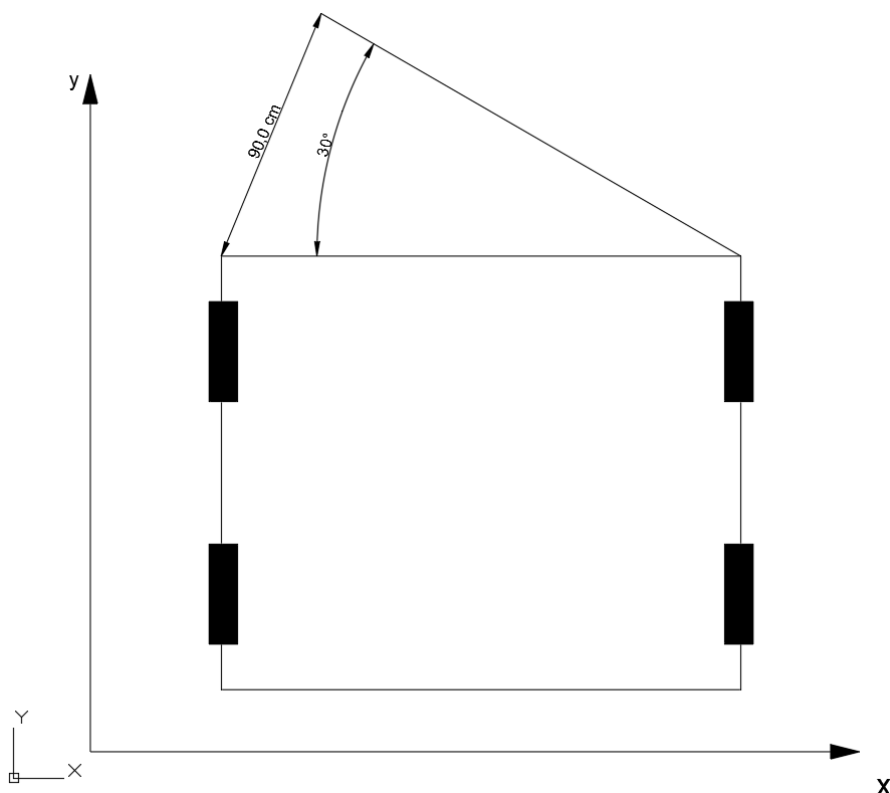


Figura 64. Função 2.2. Distância lado esquerdo 30°.

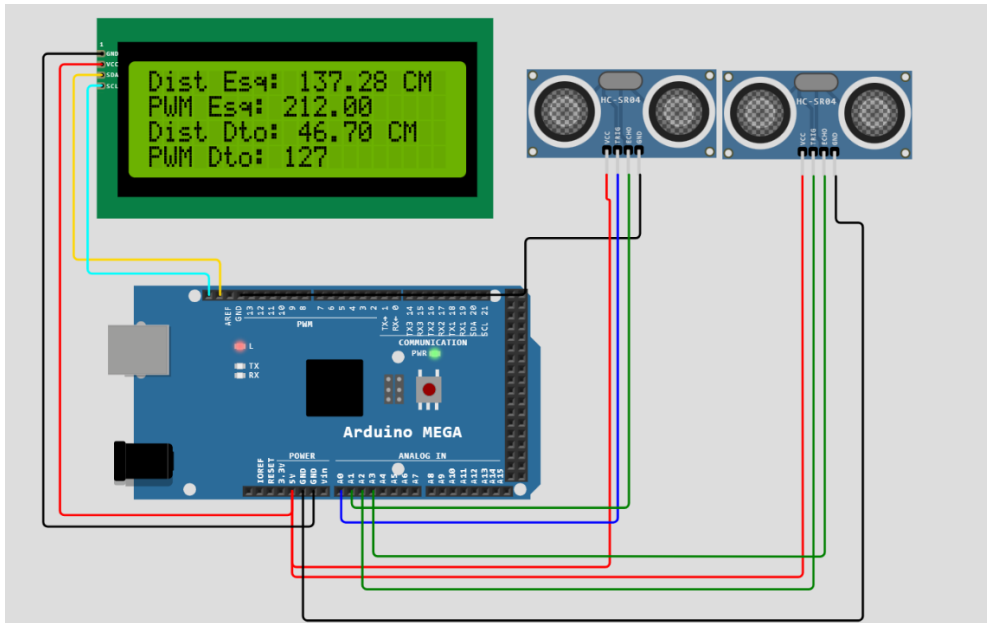


Figura 65. Função 2.2. Simulação virar à direita 30°.

**Função 2.3:** Virar à direita 50°

- Quando o robô virar 50° significa que houve um aumento de ±90 cm face ao robô de apanha como demonstrado na Figura 66. Para isso haverá um aumento de 127,5 no controlo PWM nas rodas esquerdas sempre que existir um aumento de ±90 cm face ao intervalo estabelecido, ficando assim com a condição de  $\chi > 197$ . Na Tabela 18 estão definidos os parâmetros. Na Figura 67 está a representação dos parâmetros para virar à direita 50°.

Tabela 18. Função 2.3. Alimentação dos motores para virar à direita 50°.

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$\chi > 197$	255	0,90	48,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$\chi > 197$	255	0,90	48,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00

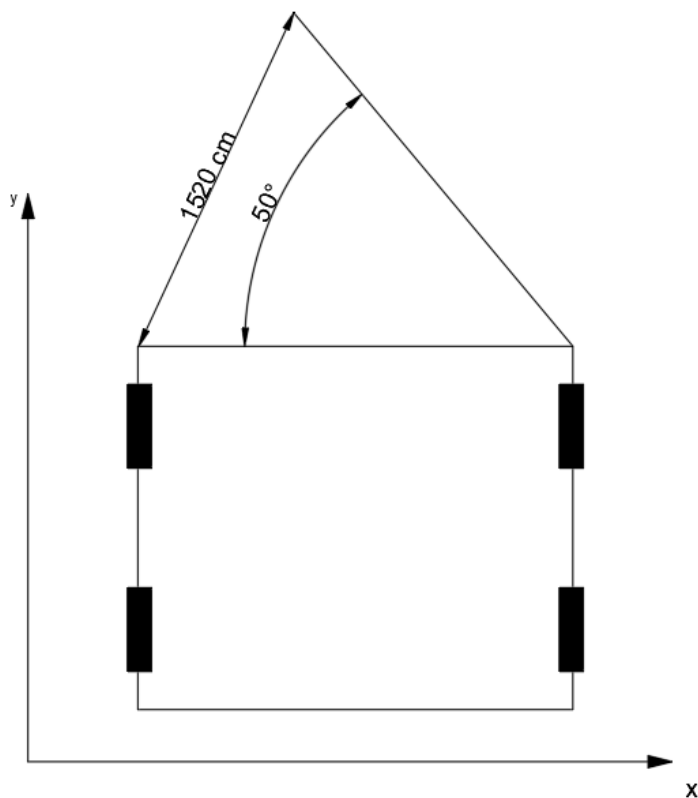


Figura 66. Função 2.3. Distância lado esquerdo 50°.

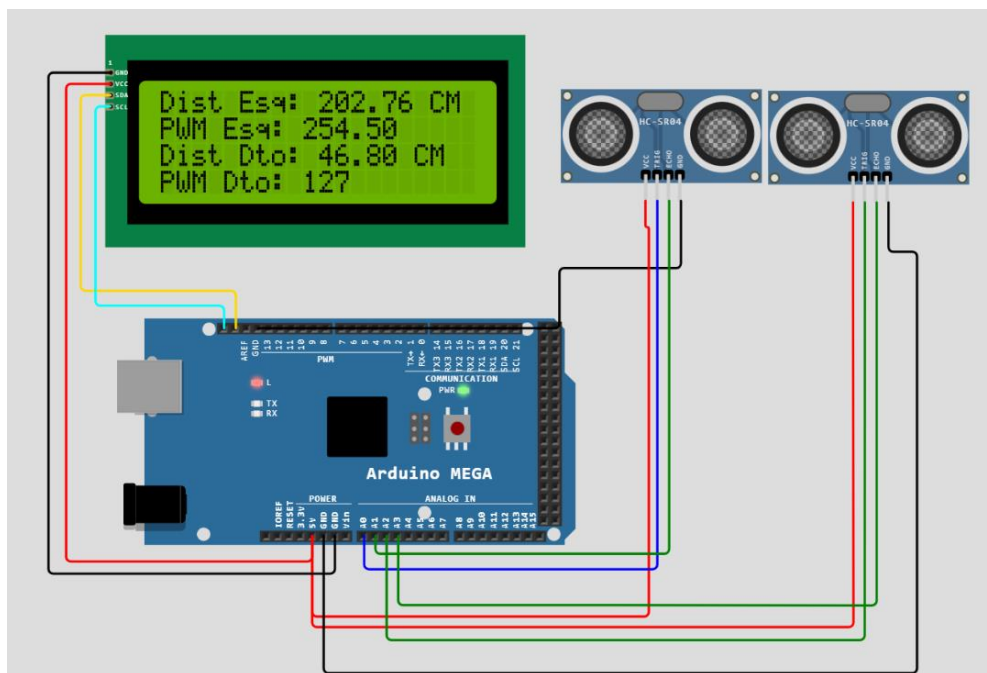


Figura 67. Função 2.3. Simulação virar à direita 50°.

### Função 3: Virar para a esquerda

- Como acontece para virar para a direita, a viragem para a esquerda acontece de forma igual. A diferença é que são os motores do lado direito que aumentam a velocidade e os do lado esquerdo mantêm-se com velocidades constantes. Nas Tabelas seguintes encontram-se os dados relativos à alimentações dos motores para virar à esquerda  $10^\circ$  (Tabela 19), virar à esquerda  $30^\circ$  (Tabela 20), e virar à esquerda  $50^\circ$  (Tabela 21).

#### Função 3.1: Virar à esquerda $10^\circ$

Tabela 19. Função 3.1. Alimentação dos motores para virar à esquerda  $10^\circ$ .

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$75 < \chi < 134$	170	0,60	32,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$75 < \chi < 134$	170	0,60	32,00

#### Função 3.2: Virar à esquerda $30^\circ$

Tabela 20. Função 3.2. Alimentação dos motores para virar à esquerda  $30^\circ$ .

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 3	$135 < \chi < 195$	212,5	0,75	40,00
	INFERIOR	MOTOR 4	$135 < \chi < 195$	212,5	0,75	40,00

**Função 3.3: Virar à esquerda 50°**

Tabela 21. Função 3.3. Alimentação dos motores para virar à esquerda 50°.

LADO	LADO	MOTOR	Distância [cm]	PMW	Velocidade [m/s]	Tensão [V]
Esquerdo	SUPERIOR	MOTOR 1	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$45 < \chi < 55$	127,5	0,45	24,00
Direito	SUPERIOR	MOTOR 1	$197 < \chi$	255	0,90	48,00
	INFERIOR	MOTOR 2	$197 < \chi$	255	0,90	48,00

**4.2. Nota conclusiva**

Neste capítulo foi confirmada a potência necessária para o robô se locomover considerando todos os materiais a utilizar, situação que inicialmente foi estipulada. Chegou-se à conclusão que é necessário ajustar a velocidade de 1 m/s para 0,9 m/s quando este se encontra em terrenos com inclinação de 20°. Para estes cálculos foi elaborada uma tabela com o peso de cada componente. Foram efetuadas diversas simulações através do software wokwi, onde é possível visualizar em contexto real as diversas situações possíveis, para diversos ângulos de viragem. Através desta análise é possível verificar qual a velocidade e tensão de alimentação dos motores, de forma a entender em contexto real o que acontecerá.

## 5. Conclusões

### 5.1. Conclusões gerais

O desenvolvimento do robô de transporte representou um desafio enorme, abrangendo diversas áreas científicas. Um robô autônomo de transporte de 500 kg de fruta é um projeto exigente e complexo, o que resultou numa análise detalhada de toda a tecnologia a aplicar e todos os materiais e métodos de forma a garantir a total segurança da operação.

A escolha do material para a estrutura foi elaborada através de uma matriz de decisão que teve por base qualidade/preço. Esta análise teve por base os esforços solicitados devido ao peso a que a estrutura irá estar sujeita.

A definição dos materiais a utilizar no circuito de potência apresentou dificuldades, devido à elevada potência exigida para os motores de locomoção do robô. Foi bastante importante dimensionar os motores e toda a cablagem de forma a garantir o pleno funcionamento dentro dos parâmetros estabelecidos.

A programação do sistema de controlo também exigiu uma profunda análise, devido ao robô ter de perseguir o robô de apanha a uma distância constante e ter de virar de forma autónoma, seguindo o outro com exatidão. Para alcançar este objetivo foram utilizados dois sensores IR e foi elaborado o código para alterar a velocidade dos motores de maneira eficaz.

Foram elaborados diversos esboços através do programa Fusion 360, de forma a entender qual a aparência e aspeto final, garantindo as dimensões necessárias para o palote de fruta, onde também foram detalhados pormenores como os atuadores de subir e descer a carga, como os compartimentos dos componentes eletrónicos.

No final, este projeto representa um estudo detalhado abrangendo diversas áreas da robótica, de forma a atender uma necessidade crucial na agricultura moderna. A solução desenvolvida demonstra que o uso da tecnologia é uma mais-valia para facilitar certos trabalhos onde é requerida mão-de-obra pesada.

## **5.2. Sugestões de trabalhos futuros**

Devido à abrangente abordagem como a deste projeto, diversas ideias ficaram por aprofundar e aplicar. Numa perspectiva de trabalhos futuros, surge a oportunidade de integrar no robô sensores LiDAR e GPS.

Seria interessante analisar a aplicação de lagartas para a locomoção do robô, proporcionando talvez uma aderência mais eficiente.

Outra possível consideração em trabalhos futuros é a implementação de um sistema de carregamento autônomo para o robô, de forma a que este seja totalmente autônomo.

Poderia ser analisado a implementação de um sistema fotovoltaico para recarregar baterias, contribuindo para uma abordagem mais sustentável.

Para além destas possibilidades, a construção de um sistema de tipo traria com certeza um outro conjunto de desafios não previsto em termos de projeto.

## Referências Bibliográficas

Ajena, F. (2018). Agriculture 3.0 or (Smart) Agroecology. *Green European Journal*, 20.

Araújo, S. O., Peres, R. S., Barata, J., Lidon, F., & Ramalho, J. C. (2021). Characterising the agriculture 4.0 landscape—Emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy*, 11(4), 667.

Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256.

Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2020). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322-4334

De Clercq, M., Vats, A., & Biel, A. (2018). Agriculture 4.0: The future of farming technology. *Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE*, 11-13.

Mazoyer, M., & Roudart, L. (2009). História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea. Ed. Unesp.

de Queiroz, D. M., Valente, D. S. M., de Carvalho Pinto, F. D. A., & Borém, A. (Eds.). (2022). Agricultura digital. Oficina de Textos.

Raj, M., Gupta, S., Chamola, V., Elhence, A., Garg, T., Atiquzzaman, M., & Niyato, D. (2021). A survey on the role of Internet of Things for adopting and promoting Agriculture 4.0. *Journal of Network and Computer Applications*, 187, 103107

Grimstad, L., & From, P. J. (2017). The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*, 6(4), 24.

Shalal, N., Low, T., Mccarthy, C., & Hancock, N. (2013). A review of autonomous navigation systems in agricultural. *In Innovative Agricultural Technologies for a Sustainable Future; Society for Engineering in Agriculture (SEAg)*, pp 1–16.

Tabassum, F., Lopa, S., & Tarek, M. M. (2017). Obstacle avoiding robot. *Global Journals of Research in Engineering*, 17(H1), 19-23.

Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., Campbell, B. M., & Kropff, M. (2019). Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture. *Global Food Security*, 23, 41-48.

Gomes, M. P., Gründling, R. D. P., Contini, E., & Vieira Junior, P. A. (2016). Agricultura mundial: evolução, avanços e novos desafios. Desafios do cerrado: como sustentar a expansão da produção com produtividade e competitividade-Cuiabá: Associação Mato-grossense dos Produtores de Algodão, 11-44.

Weiss, U., & Biber, P. (2011). Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and autonomous systems*, 59(5), 265-273.

Kragh, M. F., Christiansen, P., Laursen, M. S., Larsen, M., Steen, K. A., Green, O., ... & Jørgensen, R. N. (2017). Fieldsafe: dataset for obstacle detection in agriculture. *Sensors*, 17(11), 2579.

Robert, C., Sotiropoulos, T., Waeselynck, H., Guiochet, J., & Vernhes, S. (2020). The virtual lands of Oz: testing an agribot in simulation. *Empirical Software Engineering*, 25, 2025-2054

Huang, A. S., Bachrach, A., Henry, P., Krainin, M., Maturana, D., Fox, D., & Roy, N. (2017). Visual odometry and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera. In *Robotics Research: The 15th International Symposium ISRR* (pp. 235-252). Springer International Publishing.

Ahmadi, A., Emami, M., Daccache, A., & He, L. (2021). Soil properties prediction for precision agriculture using visible and near-infrared spectroscopy: A systematic review and meta-analysis. *Agronomy*, 11(3), 433.

Thomazini, D., & de Albuquerque, P. U. B. (2020). *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. Saraiva Educação SA.

Giongo, M., Koehler, H. S., do Amaral Machado, S., Kirchner, F. F., & Marchetti, M. (2010). LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(63), 231-231.

Debnath, S., Paul, M., & Debnath, T. (2023). Applications of LiDAR in Agriculture and Future Research Directions. *Journal of Imaging*, 9(3), 57.

Chapman, S. (2013). *Fundamentos de Máquinas Eléctricas*, MCGRAW-HILL.

Souza, V. A. (2014). *Controle de Motor de Passo Bipolar*. Clube de Autores.

Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). *Getting started with Arduino*. Maker Media, Inc.

Nayyar, A., & Puri, V. (2016, March). A review of Arduino board's, Lilypad's & Arduino shields. In *2016 3rd international conference on computing for sustainable global development (INDIACom)* (pp. 1485-1492). IEEE.

Defterli, S. G. (2016). Review of robotic technology for strawberry production. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(3), 301-318.

Budynas, G. R. & Nisbett K., J., (2011). *Elementos de Máquinas de Shigley Projeto de Engenharia Mecânica* (8º Edição). McGraw-Hill

Alatise, M. B., & Hancke, G. P. (2020). A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access*, 8, 39830-39846.

Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. (2013). Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), 256-262.

Maier, D., & Kleiner, A. (2010, May). Improved GPS sensor model for mobile robots in urban terrain. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4385-4390). IEEE.

Verma, G. (2018). *Autodesk fusion 360 black book*. BPB Publications.

dos Santos Coelho, L. (2007). *Mobile robots: The evolutionary approach*. N. Nedjah, & L. de Macedo Mourelle (Eds.). Berlin: Springer.

“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: 30-May-2023].

Leal, L. D. C. M., da Rosa, E., & Nicolazzi, L. C. (2008). *Uma Introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Matarić, M. J. (2014). *Introdução à robótica*. Editora Blucher.

Yoshino, A. (2012). The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(24), 5798-5800.

Sasaki, T., Ukyo, Y., & Novák, P. (2013). Memory effect in a lithium-ion battery. *Nature materials*, 12(6), 569-575.