

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

André Filipe Pereira Barbosa, A91989  
Carlos Tiago Castro Soares, A91941  
Fábio Daniel Andrade Oliveira, A91922  
Gonçalo Oliveira Rego, A91938  
Ivan Ribeiro Castro, A87970  
João Pedro Costa Rocha, A91936  
Paulo Nuno Gonçalves de Oliveira, A88550  
Vitor Hugo Machado Ferreira, A91999

## JIGA 8.0: Relatório

Licenciatura em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Projeto Integrador em Engenharia Eletrónica Industrial e  
Computadores 2

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Luís André Magalhães de Barros**

junho de 2022

# Índice

Índice.....	2
Índice de Tabelas .....	5
Índice de Figuras.....	6
Siglas.....	9
1. Introdução.....	10
1.1    Enquadramento .....	10
1.2    Especificações e Testes.....	10
1.2.1    Especificações do Projeto .....	11
1.2.2    Testes das Especificações.....	11
1.3    Objetivos.....	12
1.4    Planeamento do projeto .....	13
1.4.1    Planeamento Inicial Previsto .....	13
1.4.2    Planeamento Realizado.....	16
2. Descrição do Conceito do Produto .....	19
2.1    Constituição do Projeto.....	20
2.1.1    Motor 12V 150 r.p.m.....	20
2.1.2    Seguidor de linha com 5 Sensores Infravermelhos .....	21
2.1.3    Bateria Gel UCG 12 V 7,2AH – <i>Ultracell</i> .....	22
2.1.4    Rodas Motriz (Pneus e jantes).....	23
2.1.5 <i>Hub</i> Metálico .....	23
2.1.6    Rodas Giratórias .....	24
2.1.7    Ponte-H.....	24
2.1.8    Módulo RFID .....	26
2.1.9    HC-SR04 - ULTRASONS.....	27
2.1.10    Módulo <i>Buzzer</i> Ativo .....	27
2.1.11    Módulo <i>Bluetooth</i> HC-05.....	28
2.2    Custos do projeto .....	29
2.3    Desenho Mecânico.....	30

3. Implementação do Código .....	31
3.1 Sensor seguidor de linha .....	31
3.2 Sistema de Controlo dos Sensores: Seguidor de Linha .....	32
3.3 Tecnologia <i>RFID</i> .....	34
3.4 Detetores de obstáculos .....	37
3.4.1 Sensor Ultrassónico <i>HC-SR045</i> .....	37
3.4.2 Módulo <i>Buzzer</i> Ativo .....	41
3.5 Gerador PWM.....	41
3.6 Aplicação para Dispositivos Móveis.....	42
3.7 Máquina de Estados.....	44
3.8 Conclusões do capítulo.....	46
4. Carregamento Sem Fios .....	47
4.1 Descrição Sumária do Produto .....	47
4.2 Constituição do Protótipo.....	48
4.3 Simulações .....	49
4.4 Processo para a Construção do Carregamento .....	52
4.4.1 Suportes para as bobinas .....	52
4.4.2 Fio para as bobinas .....	52
4.4.3 Banco de Condensadores .....	55
4.4.4 Estágio de Retificação.....	56
4.4.5 Conversor CC-CC.....	57
4.4.6 Circuito de Alimentação no Primário .....	57
4.5 Conclusões .....	58
5. Resultados Experimentais .....	59
5.1 Sistema de Controlo Seguidor de Linha .....	59
5.2 Detetor de obstáculos.....	59
5.3 Módulo <i>RFID</i> .....	60
5.4 Carregamento Sem Fios.....	60
5.4.1 Indutância e Resistência das Bobinas.....	60
5.4.2 Teste do Enrolamento Primário Sem o Secundário .....	62
5.4.3 Teste de Todo o Sistema Com Uma Carga .....	63

5.4.4	Teste do Carregamento Sem Fios Com a Bateria.....	63
5.5	Conclusões .....	65
6.	Estudo de Fiabilidade, Segurança e Certificação.....	66
6.1	Certificação.....	66
6.2	Fiabilidade .....	67
6.3	Segurança.....	68
7.	Manual de Utilizador.....	69
7.1	Segurança.....	69
7.2	Sobre o JIGA .....	70
7.3	Especificações .....	71
8.	Conclusões .....	74
8.1	Conclusão.....	74
8.2	Trabalhos futuros .....	76
9.	Referências .....	77
10.	Anexos .....	79
	Anexo I: Email da Empresa PUDU.....	79
	Anexo II: Diagrama de blocos do JIGA 8.0.....	80

# Índice de Tabelas

Tabela 1: Milestones específicos e respetiva descrição. ....	14
Tabela 2: Milestones realizado. ....	17
Tabela 3: Horas despendidas.....	18
Tabela 4: Características técnicas do motor. ....	21
Tabela 5: Características técnicas do sensor de linha. ....	22
Tabela 6: Características técnicas da bateria.....	22
Tabela 7: Características técnicas da roda motriz. ....	23
Tabela 8: Características técnicas da roda giratória. ....	24
Tabela 9: Pinout da ponte H. ....	25
Tabela 10: Pinout do Power Supply Input Pin e Motor Output Pin. ....	25
Tabela 11: Características do módulo BTS7960 da ponte H. ....	26
Tabela 12: Características do módulo RFID.....	26
Tabela 13: Características do Sensor HC-SR04 Ultrassom.....	27
Tabela 14: Características do Buzzer. ....	28
Tabela 15: Características do Módulo Bluetooth HC-05. ....	28
Tabela 16: Custos associados ao projeto. ....	29
Tabela 17: Características técnicas da estrutura. ....	30
Tabela 18: Valores dos ganhos do controlador e da frequência de sampling. ....	34
Tabela 19: Tabela de Estados. ....	45
Tabela 20: Parâmetros dos enrolamentos. ....	51
Tabela 21: Características do Díodo D0865C6.....	56
Tabela 22: Tipos de Perigos.....	69
Tabela 23: Tabela das Especificações do JIGA .....	72

# Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de Gantt face à planificação do Projeto JIGA 4.0. ....	14
Figura 2: Diagrama temporal com as milestones definidas. ....	15
Figura 3: Datas esperadas para alcançar os objetivos traçados.....	15
Figura 4: Diagrama de Gantt do planeamento realizado.....	17
Figura 5: Datas que foram alcançados os objetivos. ....	18
Figura 6: Motor 12 V. ....	20
Figura 7: Seguidor de linha – (a) vista inferior (b) vista superior. ....	21
Figura 8: Bateria de gel 12 V 7,2 AH.....	22
Figura 9: Roda motriz. ....	23
Figura 10: Hubs Metálicos. ....	23
Figura 11: Roda Giratória.....	24
Figura 12: BTS7960 Dupla Ponte H: (a) Dupla Ponte H; (b) lugar dos pinos de entrada para controlo das pontes; (c) pinos de alimentação da ponte, bem como saída para o motor. ....	25
Figura 13: Módulo RFID; (a) Módulo RC522; (b) tags S50. ....	26
Figura 14: Sensor HC-SR04 Ultrassom. ....	27
Figura 15: Buzzer. ....	27
Figura 16: Módulo Bluetooth HC-05.....	28
Figura 17: Desenho mecânico representativo do projeto JIGA desenvolvido em CAD: (a) perspetiva lateral; (b) perspetiva de frente.....	30
Figura 18: Array de sensores com as respetivas ligações aos portos da placa STM32F767ZI. ....	31
Figura 19: Diagrama em malha fechada do robô.....	32
Figura 20: Tradução dos valores lidos pelo sensor seguidor de linha para um valor de posição e implementação do algoritmo PID. ....	33
Figura 21: Princípio de funcionamento da tecnologia RFID. ....	34
Figura 22: Esquemático da ligação da placa STM32F767ZI ao Módulo RC522. ....	35
Figura 23: Implementação da função MFRC522_CheckCard.....	36
Figura 24: Percurso experimental com as tags, bem como os respetivos postos. ....	37
Figura 25: Diagrama de conexão entre o sensor ultrassom e a placa STM32F767ZI. ....	38
Figura 26: Configurações do HCSR04.h. ....	39
Figura 27: Configurações do sensor ultrassom.....	40
Figura 28: Implementação das interrupções para obter o valor da distância. ....	40

Figura 29: Função SysTick_CallBack chamada dentro da SysTick_Handler. ....	41
Figura 30: Periféricos do timer4 para gerar PWM para o Buzzer. ....	41
Figura 31: Código utilizado para a implementação do Buzzer. ....	41
Figura 32: Configurações do timer1 de modo a funcionar como gerador de PWM. ....	42
Figura 33- Menu principal da aplicação para dispositivos móveis. ....	43
Figura 34: Programação em blocos. ....	43
Figura 35: Diagrama de conexão do módulo Bluetooth HC-05 com a STM32F767ZI. ....	44
Figura 36: Diagrama de interligação entre todos os estados existentes para o correto funcionamento do JIGA 8.0. ....	45
Figura 37: Protótipo do sistema de indução implementado. ....	49
Figura 38: Gráfico da indutância mútua em função do raio. ....	49
Figura 39: Número de voltas do lado primário, para os valores de potência. ....	50
Figura 40: Número de voltas de fio para obter potência máxima no secundário, tendo uma tensão de excitação de 70 V. ....	50
Figura 41: Valores simulados. ....	51
Figura 42: Distância de segurança dos enrolamentos enquanto estão em funcionamento. ....	51
Figura 43: Placa madeira; (a): Desenho do diâmetro das espiras; (b): Peça 3D em forma de pente....	52
Figura 44: Comportamento do fio perante o efeito pelicular [6]. ....	53
Figura 45: Relação do diâmetro do fio com a frequência máxima [7]. ....	53
Figura 46: Processo de esticar e enrolar os fios. ....	55
Figura 47: Colocação do fio para formar a bobina; (a): Colocar o fio nas peças 3D e segurar com fita cola; (b): fio seguro por fita cola, já colocado sobre a peça 3D inferior; (c): Resultado final da colocação do fio nas peças 3D. ....	55
Figura 48: Condições de operação [9]. ....	56
Figura 49: Conversor CC-CC. ....	57
Figura 50: Circuito de alimentação no primário; (a): Circuito de alimentação; (b): Circuito de alimentação ligado ao primário. ....	58
Figura 51: Valores de tensão lidos consoante a cor da linha; (a): Valor refletido na linha de cor branca; (b): Valor de tensão refletido na linha de cor preta. ....	59
Figura 52: Resultado experimental do detetor de obstáculos; (a): Medição com a régua; (b): Distância obtida no terminal. ....	60
Figura 53: Módulo RFID: (a) Módulo; (b) emissor infravermelho; (c) Duas tags desconhecidas, isto é, não programadas, a tentarem se ligarem ao módulo, sendo que o acesso é negado e, por último a tag conhecida a permitir acesso. ....	60

Figura 54: Medições da indutância da bobina primária para diferentes frequências; (a): Resultados para extremos de frequências, bem como o respetivo gráfico; (b): Resultados para frequências no intervalo da frequência de ressonância e respetivo gráfico. ....	61
Figura 55: Medições da indutância da bobina secundária para diferentes frequências; (a): Resultados para extremas de frequências e gráfico respetivo; (b): Resultados para frequências no intervalo da frequência de ressonância e respetivo gráfico. ....	62
Figura 56: Resultado experimental obtido no osciloscópio. ....	63
Figura 57: Imagem do osciloscópio tensão, corrente na bobina primária e secundária e frequência. ...	63
Figura 58: Imagem do Osciloscópio, CH1- tensão da bobina primária, CH2-corrente na bobina primária, CH3-tensão na bobina secundária e CH4- corrente na carga. ....	64
Figura 59: Imagens térmicas dos vários componentes; (a) Enrolamento primário; (b) Ponte retificadora; (c) Inversor; (d) Fonte de alimentação .....	64
Figura 58: Símbolo da marcação CE.....	66
Figura 61: Símbolo da marcação Qi.....	67
Figura 60: Diagrama de Funcionamento do Robô.....	71
Figura 63: Visão frontal do robô.....	72
Figura 64: Visão superior do JIGA 8.0, bem como a disposição da bateria, da placa STM32F767ZI e das ponte-H- .....	73
Figura 65: Visão inferior da vista inferior do robô, tal como a disposição dos componentes e da bobina do secundário.....	73
Figura 66: Diagrama de blocos do JIGA 8.0. ....	80



# Siglas

AMPOP	Amplificadores operacionais
BMS	<i>Battery Managememnet System</i> Sistema de gerenciamento de bateria
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuitos Integrados
LEEIC	Licenciatura em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores
PIEEIC2	Projeto Integrador em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores 2
r.p.m	Rotações por minuto
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> Modulação por largura de pulso
UC	Unidade Curricular
M	Modelo de Indutância Mútua
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> Identificação por Radiofrequência
UID	<i>Unified Information Devices</i> Dispositivos de Informação Unificada
TTL	<i>Transistor–Transistor Logic</i> Lógica Transístor-Transístor

# 1.Introdução

Com o constante avanço tecnológico e industrial, torna-se imprescindível que as organizações acompanhem a evolução dos tempos, melhorando os processos existentes de forma a aproveitarem ao máximo os seus recursos, para que com isto sejam mais competitivas no mercado. Desta forma, a engenharia aliada à tecnologia utiliza vários métodos de modo a automatizar os processos das empresas. Existem diversas operações nas empresas que não acrescentam valor para o cliente. Assim, dois dos desperdícios mais comuns nas organizações são as movimentações das pessoas e o transporte desnecessário do material [1].

## 1.1 Enquadramento

No âmbito da Unidade Curricular (UC) de Projeto Integrador em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores 2 (PIEEIC1) do curso de Licenciatura em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores (LEEIC) da Universidade do Minho, foi proposto o desenvolvimento de um projeto integrador onde seria possível integrar eletrónica digital e analógica.

O presente projeto integrador tem como objetivo desenvolver um protótipo de um robô de carga, designado JIGA 8.0, para unidades fabris. O robô tem como objetivo auxiliar e facilitar todo o tipo de transportes dentro de uma fábrica, de forma a tornar o processo de fabrico mais autónomo e eficiente. Assim, é possível colocar em prática os conhecimentos adquiridos nas diversas UC com a execução deste projeto. O nome adotado de JIGA 8.0 tem como origem as iniciais de cada pessoa que constitui o grupo de desenvolvimento do projeto no primeiro semestre, bem como uma referência aos oito elementos que constituem o grupo.

Analisando o estado da arte, foi possível identificar diversas soluções industriais deste tipo de equipamentos, sendo que a maior parte delas recorre a tecnologia robotizada bastante complexa, tornando estes equipamentos bastante dispendiosos. Exemplo disso é apresentado no Anexo I, um orçamento de 7499 € para um robô deste tipo.

## 1.2 Especificações e Testes

Neste capítulo abordam-se as especificações do robô, e para tal foram necessários cumprir alguns requisitos, nomeadamente o processo de certificação do produto, a fiabilidade e segurança do sistema.

### 1.2.1 Especificações do Projeto

O JIGA 8.0 é um projeto de caráter defensivo. Pretende-se desenvolver uma maquete de baixo custo que possibilite a operacionalidade do JIGA 8.0.

Em relação às funcionalidades práticas previstas do JIGA 8.0 este encontra-se apto de seguir um trajeto definido e, conseqüentemente, efetuar uma paragem previamente controlada, de modo a efetuar a carga e descarga do material. Sendo assim, é possível constatar que é necessário um sistema de controlo para o trajeto e um sistema de controlo do género de uma máquina de estados digital, que permita controlar o funcionamento dos motores. Para além disto, o robô possui um sistema de carregamento sem fios de forma a manter o estado da carga da bateria elevado, proporcionando uma operação contínua do sistema de 24 horas.

De modo a controlar o trajeto do robô, implementou-se um algoritmo de controlo que, com base na leitura oriunda do sensor de linha, consiga determinar uma correção à orientação do robô ao longo do seu trajeto. A função provocará um erro entre o valor lido e o de referência imposto pela cor da linha. Ao ser imposta uma tensão de referência correspondente à cor da linha desenhada no chão, será possível fazer com que o robô se desloque ao longo da linha.

O local de carga e descarga tem um funcionamento automático, que é detetado através do de um sensor *RFID*. Este mesmo, após detetar uma etiqueta efetua a paragem até nova indicação em contrária, isto é, até ser premido o botão na aplicação para andar. Paralelamente, o robô, possui dois detetores de obstáculos, sendo eles um *Buzzer* e um sensor ultrassom, de modo a evitar colisões.

No ANEXO II-Figura 66 encontra-se o diagrama de blocos representativo do que foi implementado no robô. Nele evidenciam-se as várias tecnologias (como o *RFID*, ou o carregamento wireless) e o modo como interagem como um todo.

### 1.2.2 Testes das Especificações

Com o decorrer do desenvolvimento de projetos é essencial a realização de ensaios experimentais para a validação do correto funcionamento. Assim, é necessário calibrar e testar o seguidor de linha, com a finalidade de mostrar o funcionamento correto. Para isto, faz-se um ensaio com várias cores de diferentes tonalidades, sendo possível retirar a tensão dos sinais elétricos correspondentes a cada cor. Assim sendo, e dependendo da iluminação do local, determina-se a melhor localização para o sensor de linha no robô bem como as condições de iluminação. Evidentemente já foram realizados testes no decorrer do projeto, no semestre transato, no entanto, dado que o foco agora é a eletrónica programável, foram feitos mais

alguns ensaios no sentido de aproveitar aquilo que este sensor é capaz de fornecer a um dispositivo programável.

Relativamente ao sistema de carregamento sem fios, este foi também alvo de um estudo intenso, no que toca a métodos de implementação, bem como de testes, pois trata-se de uma tecnologia que nunca antes fora abordada pela maioria do grupo. Não obstante, a componente prática deste tema apresentou-se como um desafio acrescido uma vez que seria um campo de investigação totalmente novo para o grupo, não existindo qualquer contacto semelhante nas restantes unidades curriculares que constituem o curso de LEEIC. Assim, foi necessário implementar uma metodologia de trabalho de forma alcançar não só os objetivos finais do sistema de carregamento sem fios, como também analisar a área de segurança de forma a ser possível analisar o sistema de carregamento sem fios. Foram ainda feitos ensaios no que toca aos sensores RFID, dado que é um tipo de tecnologia com a qual o grupo nunca teve contacto. O estudo e compreensão deste sensor foi essencial ao sucesso no projeto.

Após estarem concluídos os ensaios individuais anteriores, o trabalho seguiu para a fase seguinte, que consiste na avaliação do funcionamento das várias partes testadas anteriormente, num sistema aglomerado.

Para verificar a polivalência e a simplicidade do sistema, procura-se avaliar se uma pessoa que não conhece o projeto, consegue manejar o robô. Por conseguinte, verifica-se se podem existir melhorias no produto e, consequentemente, melhorar.

### **1.3 Objetivos**

Este trabalho tem como finalidade desenvolver um sistema autónomo com desempenho equivalente, porém com custos mais reduzidos de modo a poder ser utilizado em diferentes fábricas. Com a validação do conceito num protótipo experimental de pequena escala, seria possível futuramente migrar estes conceitos e funcionalidades para um sistema mecânico mais robusto e dimensionado para a necessidade final do cliente.

Relativamente ao protótipo desenvolvido, este apresenta melhorias ao nível das funcionalidades comparativamente com o sistema totalmente analógico desenvolvido no 1º semestre. A principal diferença encontra-se a inclusão de um microcontrolador, que possibilita o desenvolvimento de um sistema de controlo com uma maior modularidade, permitindo a interface com diferentes dispositivos eletrónicos, adicionando novas funcionalidades ao JIGA 8.0.

O grupo foi dividido em dois e atuou sobre duas frentes de trabalho. O principal foco de uma das equipas foi a constituição mecânica do robô, e implementação do código, enquanto a outra equipa focou-se no desenvolvimento do carregamento sem fios.

O robô tem como funcionamento seguir uma linha de forma a se deslocar no seu trajeto previamente definido, de forma transportar uma carga de um ponto ao outro. Para tal, é necessária inteligência, para o JIGA 8.0 poder tomar decisões e direções, para isso foram utilizados sensores e um módulo RFID dispersos no chão.

Em caso da bateria se encontrar descarregada, este deverá se dirigir para o percurso que o direciona para o posto de carregamento.

Para o desenvolvimento do protótipo, identificam-se os seguintes componentes que constituem o JIGA: uma estrutura mecânica; seis rodas (duas motrizes e quatro giratórias); dois motores; uma bateria; um seguidor de linha; um recetor RFID; circuitos indutivos e capacitivos; conversores CA-CC, CC-CC e CC-CA; um microcontrolador baseado na plataforma STM32 nucleo-f767ZI; um módulo *Bluetooth* HC-05; detetores de obstáculos.

Analisando o objetivo final de trabalho, foram definidos os seguintes objetivos preliminares de forma a serem validados pequenos modos de funcionamento bem como de pequenos submódulos que em conjunto originam o JIGA 8.0:

- Comunicação com uma etiqueta de RFID;
- Implementação de um seguidor de linha com auxílio de módulos de IF;
- Implementação dos detetores de obstáculos;
- Implementação de um sistema de carregamento indutivo.

## 1.4 Planeamento do projeto

### 1.4.1 Planeamento Inicial Previsto

O presente projeto encontra-se dividido em 3 fases, como mostra a Figura 1, que contempla o planeamento de todas as atividades que seriam executadas no projeto ao longo do semestre, de forma a obter uma validação do conceito de produto proposto.

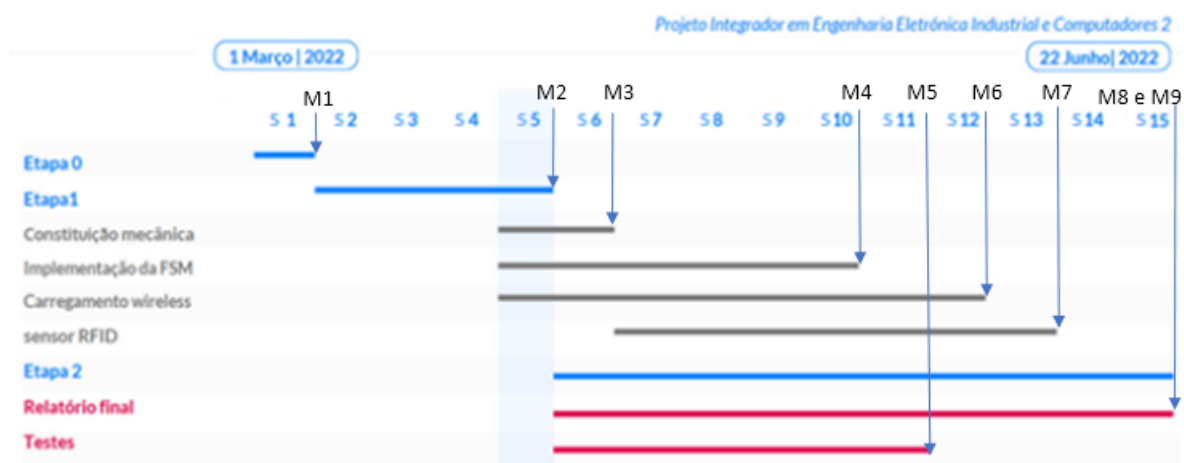


Figura 1: Diagrama de *Gantt* face à planificação do Projeto JIGA 4.0.

Este diagrama de *Gantt* encontra-se associado às *milestones* definidas pelo grupo, apresentadas na Figura 2, Figura 3 e pela Tabela 1, de forma a se organizar melhor a planificação, bem como os objetivos a cumprir até à data limite de entrega.

Tabela 1: *Milestones* específicos e respetiva descrição.

Milestones	Descrição
M1	Início previsto a 01/03/2022, término previsto a 11/03/2022
M2	Início previsto a 11/03/2022, término previsto a 10/04/2022
M3	Início previsto a 01/04/2022, término previsto a 17/04/2022
M4	Início previsto a 01/04/2022, término previsto a 15/05/2022
M5	Início previsto a 01/04/2022, término previsto a 29/05/2022
M6	Início previsto a 17/04/2022, término previsto a 05/06/2022
M7	Início previsto a 15/05/2022, término previsto a 10/06/2022
M8	Início previsto a 17/04/2022, término previsto a 23/06/2022
M9	Início previsto a 17/04/2022, término previsto a 23/06/2022

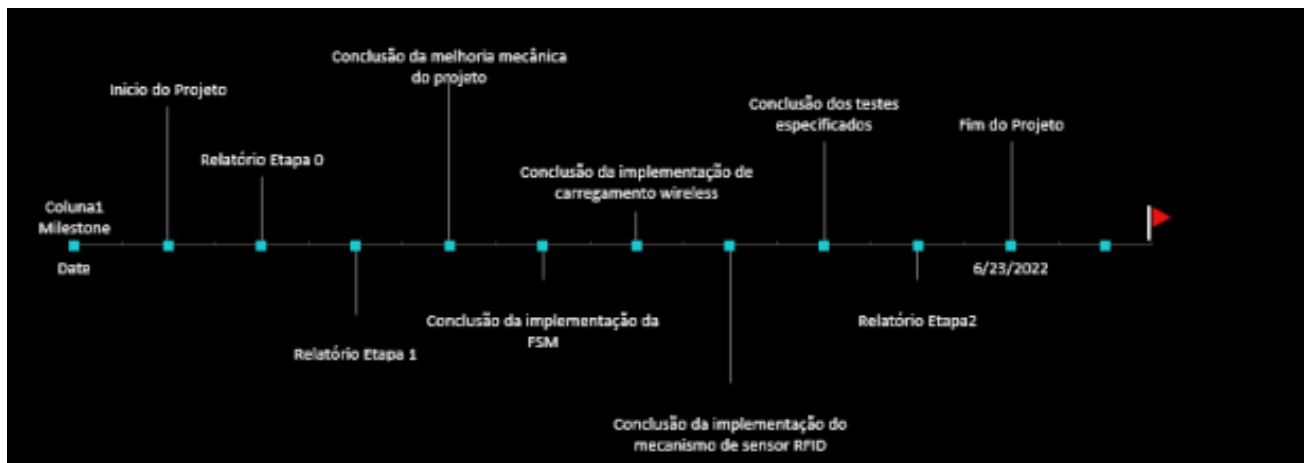


Figura 2: Diagrama temporal com as *milestones* definidas.

Project Milestones	
Date	Milestone
3/1/2022	Início do Projeto
3/11/2022	Relatório Etapa 0
4/10/2022	Relatório Etapa 1
4/17/2022	Conclusão da melhoria mecânica do projeto
5/15/2022	Conclusão da implementação da FSM
5/29/2022	Conclusão da implementação de carregamento wireless
6/5/2022	Conclusão da implementação do mecanismo de sensor RFID
6/5/2022	Conclusão dos testes especificados
6/22/2022	Relatório Etapa 2
6/23/2022	Fim do Projeto

Figura 3: Datas esperadas para alcançar os objetivos traçados.

A primeira fase do projeto, denominada Etapa 0, abrange uma pesquisa do projeto, nomeadamente a decisão do tema do projeto. Nesse sentido, trata-se de uma investigação com o propósito de desenvolver uma solução para um problema real das empresas, através de uma abordagem participativa e colaborativa dos elementos do grupo. Foram identificadas as atividades do projeto, elaborando um planeamento e avaliando as ações a desenvolver. Não obstante, o planeamento poderia sofrer alterações, uma vez que ao longo da investigação poderia ser necessário reajustar os objetivos do projeto.

Numa segunda fase, Etapa 1, após validado o tema e o cronograma do projeto em estudo, foi concluída a análise de conceito do produto, foi efetuada uma pesquisa que permitiu adquirir conhecimentos sobre o material a usar e, do produto que se pretende implementar. Nesse sentido, foram definidas algumas

especificações, assim como os ensaios experimentais a realizar, bem como a conclusão da maqueta para o robô.

Face à Etapa 2, seguiu-se a finalização do desenvolvimento do protótipo, das montagens mecânicas e a implementação dos circuitos eletrónicos, nomeadamente ao nível da sensorização e do controlo. Terminadas estas atividades seguiu-se a validação experimental, de modo a detetar falhas e caso necessário, proceder a melhorias.

No que concerne à documentação de apoio ao projeto, esta atividade foi executada em simultâneo com o desenrolar das atividades do projeto, de modo a expor todos os resultados dos testes do protótipo, assim como as dificuldades e soluções escolhidas.

De mencionar que com o decorrer da implementação o grupo deparou-se com alguns contratempos, significando numa constante adaptação da planificação inicialmente idealizada. Entre esses contratempos, mencionar as dificuldades em adquirir componentes pela falta de *stock*, bem como ao nível do desenvolvimento de código sem erros ou *bugs*. Tais acontecimentos requerem que existisse alguma preparação prévia (no caso dos componentes foi prudente comprar o que fosse necessário de antemão e se necessário, com uma quantidade ligeiramente acima do idealizado) ou, no caso de incorrer em falha, tornava-se necessário corrigir os problemas sem delongas (no caso do código, convém erradicar os erros na sua fonte). Não obstante, de mencionar que o sistema de carregamento indutivo requereu o estudo de uma nova ferramenta de simulação, sendo necessário um maior número de horas dedicadas, apresentando uma curva de aprendizagem maior.

O progresso do projeto foi continuamente avaliado e debatido, quer entre os vários elementos que compõem a equipa, quer entre estes e o docente, realizando reuniões com uma periodicidade de 1 a 2 semanas, em média.

#### **1.4.2 Planeamento Realizado**

Face ao primeiro planeamento, existiram algumas alterações consoante as necessidades do projeto. Apesar de se ter adotado igualmente uma abordagem semanal, a maior diferença encontra-se nos ensaios do carregamento sem fios e da programação do microcontrolador, sendo que foi o que ocupou a maior parte do tempo, a sua realização teve uma duração de cerca de dez semanas desde a Etapa 1. Assim, estão presentes todas as atividades realizadas na Figura 4 e Tabela 2.



Figura 4: Diagrama de *Gantt* do planeamento realizado.Tabela 2: *Milestones* realizado.

Milestones	Descrição
M1	Início real a 01/03/2022, término real a 11/03/2022
M2	Início real a 11/03/2022, término real a 10/04/2022
M3	Início real a 10/04/2022, término real a 17/04/2022
M4	Início real a 10/04/2022, término real a 25/05/2022
M5	Início real a 10/04/2022, término real a 01/06/2022
M6	Início real a 24/04/2022, término real a 18/06/2022
M7	Início real a 10/04/2022, término real a 21/06/2022
M8	Início real a 10/04/2022, término real a 22/06/2022
M9	Início real visto a 10/04/2022, término real a 23/06/2022

As datas em que as etapas foram alcançadas, encontram-se na Figura 5.

Date	Milestone
01/03/2022	Início do Projeto
11/03/2022	Relatório Etapa 0
10/04/2022	Relatório Etapa 1
17/04/2022	Melhoria Mecânica do Projeto
25/05/2022	Conclusão da Implementação do sensor RFID
01/06/2022	Conclusão da Implementação da FSM
18/06/2022	Conclusão dos testes
21/06/2022	Conclusão da implementação do carregamento wireless
22/06/2022	Relatório Etapa 2
23/06/2022	Fim projeto

Figura 5: Datas que foram alcançados os objetivos.

Para tal, cada elemento investiu várias horas na realização do JIGA 8.0, como está indicado na Tabela 3: Horas despendidas.

Tabela 3: Horas despendidas.

Elemento	Horas despendidas
André Filipe Pereira Barbosa	~ 168 h
Carlo Tiago Castro Soares	~ 168 h
Fábio Daniel Andrade Oliveira	~ 198 h
Gonçalo Oliveira Rego	~ 168 h
Ivan Ribeiro Castro	~ 168 h
João Pedro Costa Rocha	~ 168 h
Paulo Nuno Gonçalves de Oliveira	~ 168 h
Vítor Hugo Machado Ferreira	~ 218 h

## 2.Descrição do Conceito do Produto

O projeto integrador JIGA 8.0 consiste num robô que tem como objetivo principal facilitar o transporte de ferramentas, mercadorias de baixo porte, entre outros, no interior de uma zona industrial, onde terá pontos de paragem previamente controlados. O protótipo foi ajustado para o transporte de cargas reduzidas, devido à força mais diminuta dos motores que fazem girar as rodas motrizes. Não obstante, os custos de aquisição e *stock* foram fatores tidos em conta. Considerou-se que estes fatores não sejam menos positivos, dado que o intuito do projeto é validar o conceito. Caso fosse necessário um transporte de cargas de maior porte e peso, seria preciso o dimensionamento de um sistema com maior potência, autonomia e binário. O processo de engenharia de dimensionamento e implementação pode ser replicado com base no estudo desenvolvido com a versão *beta* do JIGA.

Os potenciais clientes para este produto poderão ser organizações que pretendam o transporte de cargas fabris, possuindo uma cadeia de montagem para um produto final, como é o caso das empresas do ramo automóvel, onde necessitam de um fornecimento constante de matéria-prima ao longo de conta a cadeia de montagem [2]. Outro exemplo de aplicação são as empresas de logística e distribuição de encomendas, onde, já há empresas que utilizam robôs semelhantes para efetuar o transporte de ferramentas e mercadorias, como é o caso da multinacional Amazon [3].

Relativamente ao protótipo, este é considerado de médio porte, sendo que numa primeira fase foi utilizado um conjunto de sensores de linha, bem como um conjunto de etiquetas RFID. O seguidor de linha é utilizado para controlar a rota e os sensores de RFID utilizados para determinar, não só as zonas de paragem, mas também o sentido de rotação do robô em entroncamentos e cruzamentos, praticando assim uma abordagem defensiva. Sendo que a maior parte dos robôs existentes utilizam também uma abordagem defensiva, a inovação do JIGA 8.0 encontra-se na forma como muda de direção, isto é, este em vez de fazer curvas ligeiras, como a maioria existente, tem uma rotação para entroncamentos e cruzamentos, permitindo girar sobre o seu eixo.

Quando o robô se encontra com bateria reduzida o robô deve-se deslocar para posto de carregamentos sem fios que foi projetado, no qual se pretende que o JIGA 8.0 fique enquanto não está a ser utilizado. Tem como objetivo estar em serviço durante o dia, e durante a noite ou quando estiver a ficar a bateria descarregada se deslocar para o posto. Para isso, existe um percurso pré-definido que é percorrido através da tecnologia referida anteriormente.

## 2.1 Constituição do Projeto

O JIGA 8.0 é composto por 9 componentes principais, incluindo o carregamento sem fios, que noutro capítulo será abordado de forma mais aprofundada, sendo enumerados de seguida:

1. Motor;
2. Seguidor de linha;
3. Bateria;
4. Rodas;
5. RFID;
6. Módulo *Bluetooth* HC-05;
7. HC-SR04 – Ultrassom;
8. Módulo *Buzzer* Ativo;
9. Carregamento sem fios.

### 2.1.1 Motor 12V 150 r.p.m

O JIGA 8.0 é composto por 2 motores 12 V e com 150 rotações por minuto (r.p.m), semelhantes ao representado na Figura 6 sendo acoplado em cada motor a uma roda motriz.



Figura 6: Motor 12 V.

A Tabela 4 expõe as características técnicas do motor utilizado.

Tabela 4: Características técnicas do motor.

Característica	Valor
Tensão nominal de funcionamento	12 V dc
Corrente nominal	0,4 A
Binário	2,5 Kg.cm
Velocidade a 12 V DC à saída da redutora	150 r.p.m
Velocidade a 12 V DC no eixo do motor	5000 r.p.m
Relação de transmissão	1:31
Dimensões	37mm x 58mm
Veio (diâmetro)	6mm
Peso	22 g

### 2.1.2 Seguidor de linha com 5 Sensores Infravermelhos

O seguidor de linha permite ao robô percorrer um caminho pré-definido, através de uma linha preta colocada no chão. Uma vez que a placa de circuito impresso (PCB) possui diferentes sensores infravermelhos, foi alocada uma funcionalidade com base no estado de cada sensor, sendo que *IR1*, *IR2*, *IR3*, *IR4* e *IR5* controlam todos a direção. Na Figura 7 visualizam-se a vista inferior (Figura 7– (a)) e a vista superior (Figura 7–(b)) do sensor.

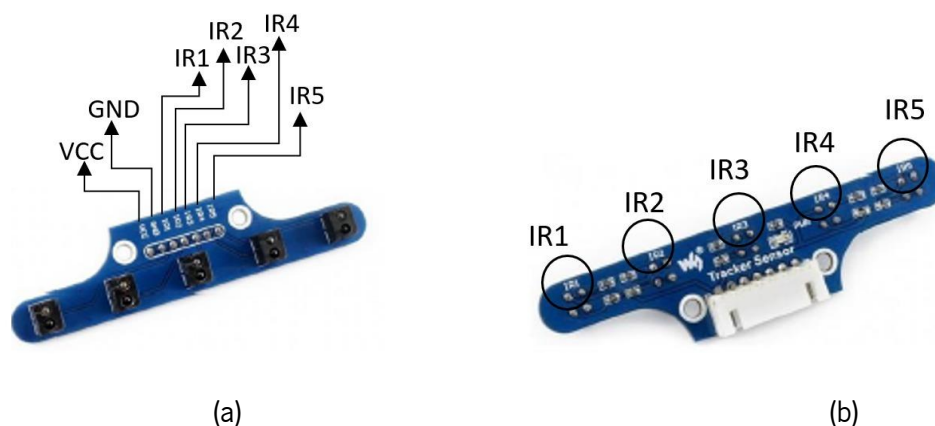


Figura 7: Seguidor de linha – (a) vista inferior (b) vista superior.

Na Tabela 5 é possível observar as características técnicas do seguidor de linha utilizado.

Tabela 5: Características técnicas do sensor de linha.

Característica	Valor
Tensão nominal de funcionamento	3,3 V a 5 V
Alcance de detecção	1 a 5 cm
Dimensões (comprimento x largura)	78 mm x 18 mm
Espaçamento dos sensores	16 mm
Tamanho dos orifícios de montagem	3 mm

### 2.1.3 Bateria Gel UCG 12 V 7,2AH – Ultracell

A Figura 8 trata-se de uma bateria reutilizável que utilizada para alimentar os circuitos eletrônicos que integram o robô, bem como os dois motores.



Figura 8: Bateria de gel 12 V 7,2 AH.

A bateria acima ilustrada apresenta as características apresentadas pela Tabela 6.

Tabela 6: Características técnicas da bateria.

Característica	Valor
Tensão nominal de funcionamento	12 V
Capacidade	7,2 AH
Peso	2,5 Kg
Dimensões	150 mm x 63 mm x 95 mm
Autonomia esperada	7 horas

### 2.1.4 Rodas Motriz (Pneus e jantes)

A Figura 9 ilustra as rodas utilizadas, sendo que estas rodas encontram-se acopladas aos motores.



Figura 9: Roda motriz.

A roda motriz apresenta as características exibidas pela Tabela 7.

Tabela 7: Características técnicas da roda motriz.

Característica	Valor
Material do Pneu	Borracha
Material da Jante	Plástico
Dimensões	125 mm x 60 mm

### 2.1.5 Hub Metálico

Os *Hubs* Metálicos, ilustrados na Figura 10, foram utilizados de forma a ajudar a acoplar a roda aos motores. Estes, possuem uma dimensão de 4mm.



Figura 10: Hubs Metálicos.

### 2.1.6 Rodas Giratórias

As rodas giratórias encontram-se ilustradas na Figura 11, sendo usadas de forma a garantir o suporte do robô, bem como auxiliar a mudança de direção do mesmo, não sendo necessário o uso do travão que constitui a roda na figura mencionada.



Figura 11: Roda Giratória.

A Tabela 8 menciona as características técnicas da roda giratória.

Tabela 8: Características técnicas da roda giratória.

Característica	Valor
Material do Pneu	Polipropileno
Material da armação da roda	Aço embutido
Peso	0,04 kg
Carga máxima suportada	19 Kg
Dimensões (comprimento x largura x diâmetro da roda)	40 mm x 14 mm x 40 mm

### 2.1.7 Ponte-H

Para controlar os motores, foram utilizadas duas Ponte H, como estão apresentadas na Figura 12.

Como anteriormente mencionado, o sinal de PWM gerado irá ajustar o valor médio da tensão de alimentação aplicada aos motores, variando assim a velocidade de rotação. De forma a realizar esta atuação, foram utilizados dois conversores de eletrônica de potência em ponte-H. A PCB BTS7960 possui já duas pontes-H incorporadas, permitindo assim o controlo de um motor CC cada.



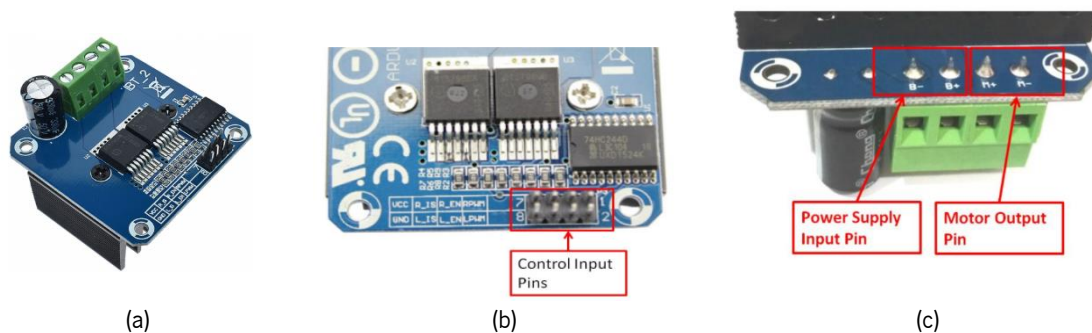


Figura 12: *BTS7960* Dupla Ponte H: (a) Dupla Ponte H; (b) lugar dos pinos de entrada para controlo das pontes; (c) pinos de alimentação da ponte, bem como saída para o motor.

Nas Tabela 9 e Tabela 10, estão presentes o *pinout* da ponte H.

Tabela 9: *Pinout* da ponte H.

BST 7960 PIN	PIN
1 (RPWM)	PWM
2 (LPWM)	PWM
3 (R_EN)	5 V
4 (L_EN)	5 V
5 (R_IS)	<i>Un_connected</i>
6 (L_IS)	<i>Un_connected</i>
7 (VCC)	5 V
8 (GND)	<i>GND</i>

Tabela 10: *Pinout* do *Power Supply Input Pin* e *Motor Output Pin*.

Número do <i>PIN</i>	Função	Descrição
1	B+	Alimentação do motor positiva: 6 – 27 V dc
2	B-	Alimentação do motor negativa: <i>GND</i>
3	M+	Saída do motor +
4	M-	Saída do motor -

Cada motor tem uma ponte H a alimentá-lo. Esta ponte destaca-se pelos valores nominais máximos relativos à tensão de alimentação e à corrente que a percorre, tornando este dispositivo uma solução otimizada no que toca a proteção para o acionamento de motores PWM de correntes elevadas, sub e sobretensões e curto-circuitos.

As mesmas possuem as seguintes características, da Tabela 11.

Tabela 11: Características do módulo *BTS7960* da ponte H.

Característica	Valor
Tensão de alimentação	9 – 27 V DC
Corrente	43 A
Nível de controlo da entrada	3,3 V – 5 V
Modo de controlo	PWM

### 2.1.8 Módulo RFID

Na Figura 13 estão ilustrados o módulo RFID e as *tags*, respetivamente, sendo usado para ler as etiquetas, isto é, as *tags* e, saber o trajeto a seguir.

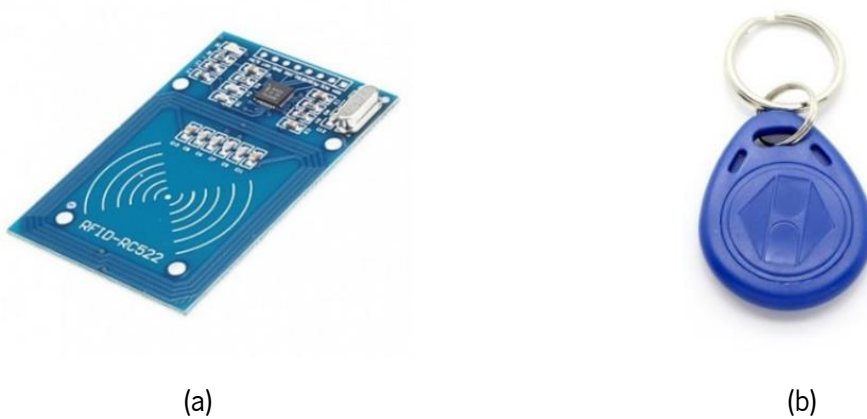


Figura 13: Módulo RFID; (a) Módulo RC522; (b) tags S50.

Estes possuem as características apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Características do módulo RFID.

Característica	Valor
Consumo	13-26 mA / DC 3,3 V
Consumo em <i>Stand-By</i>	10-13 mA / 3,3 V
Consumo em <i>Sleep</i>	< 30 mA
Frequência de operação	13,56 MHz
Espectro	Infravermelho
Dimensões	8,5 cm x 5,5 cm x 1 cm
Peso	21 g

### 2.1.9 HC-SR04 - ULTRASSONS

Na Figura 14, encontra-se o sensor que foi utilizado para detetar obstáculos, de forma a aumentar a segurança na utilização do JIGA.



Figura 14: Sensor HC-SR04 Ultrassom.

Este possui as características apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13: Características do Sensor HC-SR04 Ultrassom.

Característica	Valor
Tensão	5 V dc
Consumo em <i>Stand-By</i>	< 2 mA
Distância	2 cm – 420 cm
Resolução	0,3 cm

### 2.1.10 Módulo *Buzzer* Ativo

Na Figura 15, está representado o *Buzzer* utilizado, com a finalidade de sinalizar ruidosamente a presença do robô perante um obstáculo.



Figura 15: *Buzzer*.

As suas características estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14: Características do *Buzzer*.

Característica	Valor
Tipo de som reproduzido	Alarme piezoelétrico
Frequência de ressonância	3 kHz
Corrente de operação	8 mA
Tensão de operação	3 V – 20 V dc
Distância que o som atinge	30 cm
Nível de som	80 dB

### 2.1.11 Módulo *Bluetooth* HC-05

Na Figura 16, está apresentado o módulo *Bluetooth*, que integra o módulo HC-05, criando a possibilidade de comunicação *wireless Bluetooth*. O módulo *Bluetooth* apresentado também possibilita a comunicação através da porta série através de outros pinos.



Figura 16: Módulo *Bluetooth* HC-05.

Partindo deste módulo é possível comunicar entre um dispositivo móvel e a placa STM32F7.

As características deste módulo, estão presentes na Tabela 15.

Tabela 15: Características do Módulo *Bluetooth* HC-05.

Característica	Valor
Frequência de Banda	2,4 GHz
Comunicação	<i>UART</i>
Tensão de Alimentação	5 V
Distância de comunicação	40 m

## 2.2 Custos do projeto

No que se refere ao projeto, existem alguns custos diretos que devem ser considerados, nomeadamente o custo de materiais e de mão de obra. Assim, a Tabela 16 expõe os custos associados ao projeto.

Tabela 16: Custos associados ao projeto.

Componente	Quantidade (Unidades)	Preço/ unidade	Preço Total
Motor 12 V 150 r.p.m	2	18,70 €	37,40 €
Seguidor de linha	1	6,50 €	6,50 €
Bateria 12 V 7,2 AH	1	19,90 €	19,90 €
Par de Rodas Motrizes	1	12,90 €	12,90 €
Rodas Giratórias	4	3,50 €	14 €
HUB Metálico 4 mm	1	3,50 €	3,50 €
Anilhas	30	0,05 €	1,50 €
Porcas	30	0,10 €	2,25 €
Placa STM32	1	32 €	32 €
Módulo RFID	1	4,90 €	4,90 €
Fonte de Alimentação	1	36,99 €	36,99 €
Placa de Indução	1	45,99 €	45,99 €
Conversor Secundário	1	6,85 €	6,85 €
Fio para as Bobinas	1	7,50 €	7,50 €
Peças 3D	32	0,32 €	10,24 €
<i>Protoboard</i>	2	2,50 €	5,0 €
<i>HC-SR04 - ULTRASONS</i>	1	3,60 €	3,60 €
<i>Buzzer</i>	1	3,0 €	3,0 €
Maqueta	1	320 €	320 €
Mão de Obra	178,25 h	10 €	1 782,5 €
Total			2 356,52 €

Relativamente à mão de obra, foi considerado um salário bruto de engenheiro em início de carreira de 1600 €, o que, após contribuição fiscal, se traduz num salário líquido de 1323,94 €. Considerando

quatro semanas de trabalho e 40 horas semanais, o engenheiro receberia um valor líquido de 8,27 €/hora (considerando valor bruto, de 10 €/hora). Considerou-se este valor como aceitável, estimando assim o custo total da mão de obra tendo em consideração o número de horas totais despendidas por todos os elementos do grupo para o desenvolvimento deste projeto. Concluindo-se assim um custo total de mão de obra de 1782,5 €. Somando esta parcela aos valores dos componentes utilizados, foi possível estimar um custo total do projeto de 2356,52 €.

## 2.3 Desenho Mecânico

Na Figura 17 está representado o desenho mecânico do protótipo desenvolvido. Este modelo computacional em 3D foi desenvolvido no *software* CAD, de modo a obter uma representação gráfica das peças a utilizar, assim como o desenho projetivo do robô.

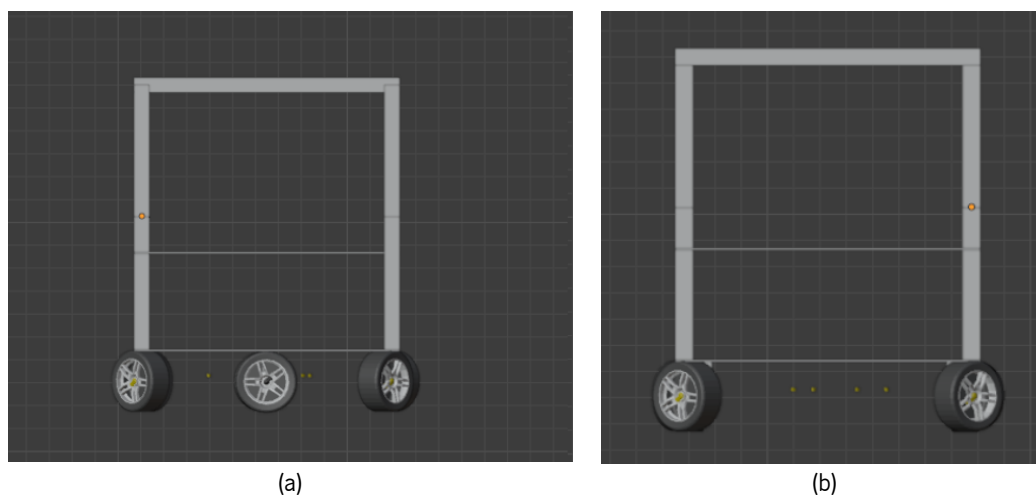


Figura 17: Desenho mecânico representativo do projeto JIGA desenvolvido em CAD: (a) perspectiva lateral; (b) perspectiva de frente.

A estrutura acima mencionada, de modo a ser resistente, é composta por chapas de alumínio, de liga 1050, de espessura 2,5mm. Os tubos são também de alumínio, de liga 6063 e tempera T5, tendo de comprimento 30mm, 15 mm de largura e 1,2mm de espessura (Tabela 17 encontra-se representado um resumo destas especificações).

Tabela 17: Características técnicas da estrutura.

Chapa		Tubo	
Característica	Valor	Característica	Valor
Material	Alumínio	Material	Alumínio
Liga	1050	Liga	6063
Espessura	2,5 mm	Dimensões	30mm x 15 mm x 1,2mm

### 3. Implementação do Código

Para o desenvolvimento do JIGA 8.0 são necessários vários circuitos que se encontram representados no diagrama de blocos, do Anexo II-Figura 66, já apresentada no primeiro capítulo.

Referente à parte do código existe um sistema de condicionamento do sinal dos sensores de linha e um sistema de controlo PID. Para além disso está também implementada uma máquina de estados, a qual tem auxílio do módulo RFID, para saber a direção ou se está em repouso/ andamento. Posto isto, utilizam-se quatro geradores de PWM, que estão ligados como conversor de eletrónica de potência de topologia ponte H, dois a cada, de forma a controlar a velocidade dos motores.

#### 3.1 Sensor seguidor de linha

O seguidor de linha, é usado para a orientação do robô. Primeiramente, para realização do ensaio experimental deste circuito, é necessário verificar a tensão fornecida por cada sensor de modo a determinar a cor da linha que terá de ser usada. Para isso, recorrendo a linhas de cores diferentes, registam-se as leituras dos sinais elétricos em função da cor refletida.

Desta forma, sendo que quando está a refletir a cor preta, a tensão é aproximadamente 0 V, no entanto quando está a refletir o branco é aproximadamente 3,3 V. No diagrama apresentado na Figura 18 é possível verificar as respetivas ligações do sensor aos portos da placa STM32F767ZI, tendo estas sido ligadas diretamente aos portos de *GPIO\_Input* cuja tensão máxima reconhecida como nível lógico 0 é 1 V e a tensão mínima reconhecida como nível lógico 1 é 2,3 V.

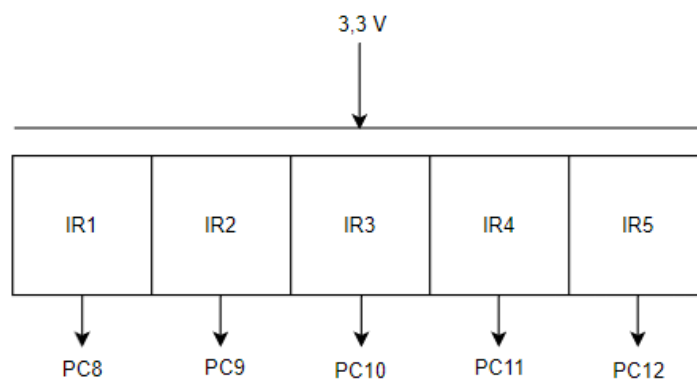


Figura 18: Array de sensores com as respetivas ligações aos portos da placa STM32F767ZI.

## 3.2 Sistema de Controlo dos Sensores: Seguidor de Linha

Para controlar o sistema foi utilizado um controlador PID por ser o mais utilizado de todos os controladores e ser o controlador mais utilizado neste tipo de casos e por também conduzir a um melhor comportamento do sistema devido às suas três componentes: a ação proporcional define a velocidade de aproximação do sistema ao seu valor em regime permanente; a ação integral reduz o erro em regime permanente integrando o erro; a ação derivativa antecipa a resposta, derivando o erro, permitindo reduzir o comportamento oscilatório da resposta do sistema e a sua integração no controlador deve ser sempre analisada, principalmente em sistemas com muito ruído, para evitar instabilidade no sistema.

O controlador PID pode ser implementado de forma analógica ou digital, porém, a implementação geralmente é digital utilizando um sistema com um microprocessador associado. Este método também pode melhorar o desempenho ao permitir o controlo da saturação do atuador (*wind-up*), mesmo em sistemas com muito ruído nas variáveis medidas. Assim, o sistema de controlo digital realiza a amostragem das entradas de interesse, calcula o valor da variável de controlo e então, se necessário, converte para um valor analógico. A amostragem introduz um atraso no sistema e mantém o valor de entrada entre amostras consecutivas, levando ao conceito de retentor. Normalmente, o *Zero Order Holder* (ZOH) é seleccionado para modelar este efeito no controlo.

O sistema em malha fechada do JIGA, funciona baseado no diagrama da Figura 19.

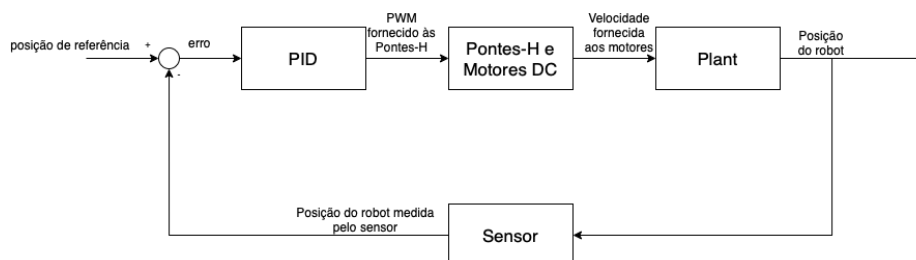


Figura 19: Diagrama em malha fechada do robô.

A implementação do controlador PID foi feita de acordo com o guia CP4, a qual se pode verificar no código seguinte na Figura 20.

Primeiramente são lidos os valores do sensor de linha (0 se a linha for preta e 1 se for branca), como o robô vai seguir uma linha preta os níveis lógicos dos sensores são invertidos de forma a facilitar o tratamento dos mesmos. Seguidamente os valores do sensor de linha são traduzidos sob a forma de posição de acordo com a média ponderada dos cinco sensores, ou seja, se o sensor mais à esquerda for o único a detetar a linha a posição é a mínima e se for o sensor mais à direita a posição é a máxima, 0 e 4000, respetivamente.



Sabendo isto, a posição de referência do sistema vai ser igual ao valor 2000, o que faz com que o valor do erro seja negativo se o robô caso o robô se desvie para a esquerda ou seja positivo caso contrário. Assim, se o erro for negativo é necessário aumentar a velocidade do motor do lado esquerdo e diminuir a velocidade do motor do lado direito, daí a tensão aplicada ao lado esquerdo será dada pela equação (4.2.1):

$$\text{Tensão aplicada} = \text{Tensão Base} - \text{Tensão calculada pelo controlador PID (valor negativo)} \quad (4.2.1)$$

E a tensão aplicada ao lado direito será pela equação (4.2.2):

$$\text{Tensão aplicada} = \text{Tensão Base} + \text{Tensão calculada pelo controlador PID (valor positivo)} \quad (4.2.2)$$

```

1 sensor[0]=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, GPIO_PIN_8);
2 sensor[1]=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, GPIO_PIN_9);
3 sensor[2]=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, GPIO_PIN_10);
4 sensor[3]=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, GPIO_PIN_11);
5 sensor[4]=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, GPIO_PIN_12);
6
7 for(i=0; i<5; i++)
8   sensor[i]^=0x01;
9
10 if((sensor[0]+sensor[1]+sensor[2]+sensor[3]+sensor[4])>0)
11   y = (0 * sensor[0] + 1000 * sensor[1] + 2000 * sensor[2] + 3000 * sensor[3] + 4000 * sensor[4]) /
      (sensor[0] + sensor[1] + sensor[2] + sensor[3] + sensor[4]);
12
13 else
14   y = 2000;
15
16 e = 2000-y;
17
18 if(aut == 1)
19 {
20   sum_e_bkp=sum_e;
21   sum_e=sum_e+e_ant;
22   u_d=Kd_h*(y-y_ant)+ad*u_d_ant;
23   u=Kp_h*e+Ki_h*sum_e-u_d;
24   e_ant=e;
25   y_ant=y;
26   u_d_ant=u_d;
27
28   if (u>U_sat_a)
29   {
30     u=U_sat_a;
31     sum_e=sum_e_bkp;
32   }
33   else if (u<U_sat_b)
34   {
35     u=U_sat_b;
36     sum_e=sum_e_bkp;
37   }
38 }
39 else
40 {
41   e_ant=e;
42   y_ant=y;
43 }

```

Figura 20: Tradução dos valores lidos pelo sensor seguidor de linha para um valor de posição e implementação do algoritmo PID.

Os ganhos do controlador e a frequência de *sampling*, Tabela 18, foram calculados experimentalmente. Os valores de  $U_{sat\_a}$  e  $U_{sat\_b}$  são 4 e -4, respectivamente, tendo sido calculados de forma ao robô não oscilar muito.

Tabela 18: Valores dos ganhos do controlador e da frequência de *sampling*.

Característica	Valor
Kp	0,015
Ki	0,00009
Kd	0,0021
Frequência de <i>sampling</i>	500 Hz

### 3.3 Tecnologia *RFID*

Os sistemas RFID usam ondas rádio com diferentes frequências para transmissão de dados. É essencialmente composto por dois componentes: *tags* e *Readers*.

Relativamente às *tags*, estas utilizam as ondas rádio para informar o *Reader* a sua identidade (UID). Existem dois tipos de *tags*, as passivas (alimentadas pelo *Reader* em vez de utilizar bateria) e as ativas (alimentadas por bateria).

No que diz respeito ao *Reader*, é um dispositivo que possui uma ou várias antenas, emitindo ondas de rádio e recebe sinais vindos da *RFID tag*.

O princípio de funcionamento da tecnologia *RFID* tem por base a Figura 21.

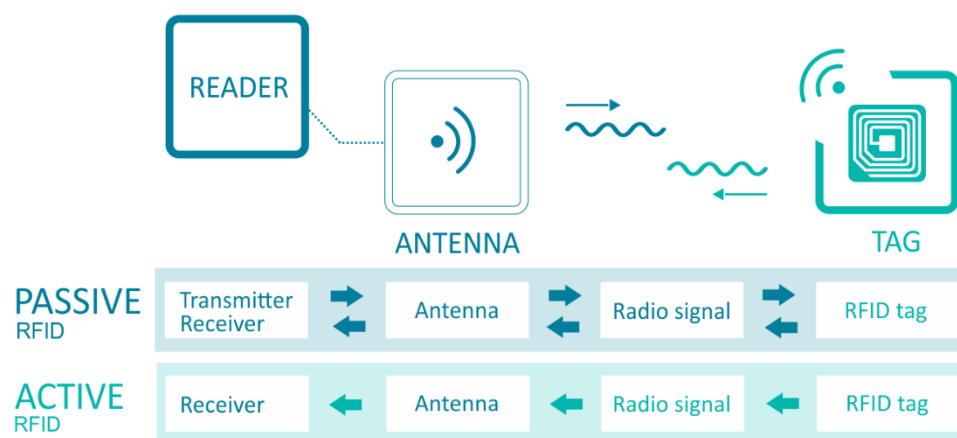


Figura 21: Princípio de funcionamento da tecnologia RFID.

O RFID *Reader* possui um transceptor (transmissor e emissor em simultâneo) que gera um sinal de rádio e transmite-o através de antena. Este sinal em si está na forma de energia que é usada para ativar e alimentar a *tag*.

Quando a RFID *tag* chega ao alcance do sinal transmitido pelo *Reader*, o *transponder* (dispositivo que recebe um sinal e transforma esse sinal noutro sinal) na *tag* é atingido por este sinal. Uma *tag* extrai energia do campo eletromagnético criado pelo *Reader* e, em seguida, o *transponder* converte esse sinal de rádio em energia utilizável. Após receber energia, o *transponder* envia todas as informações armazenadas nele, como ID exclusivo (UID) para o RFID *Reader* na forma de sinal de rádio frequência. Após isso, o RFID *Reader* coloca esses dados de identificação exclusivos na forma de *byte* no pino da porta série *Tx* (transmissão). Esses dados podem ser usados ou acedidos por um microcontrolador utilizando comunicação UART.

Relativamente ao *hardware* utilizado, optou-se pelo módulo *RFID* baseado no chip *MFRC522*, sendo utilizado na comunicação sem fios a uma frequência de 13,56 MHz. Este chip, permite ler e escrever sem contacto em cartões que seguem o padrão *Mifare* (protocolo utilizado). Para a comunicação entre o módulo *RC522* e o microcontrolador foi utilizado o protocolo serial *peripheral interface (SPI)*, sendo que o chip *MFRC522* age como *Slave* e o microcontrolador como *Master*. Os pinos estabelecidos para a conexão, encontram-se representados no esquemático da Figura 22.

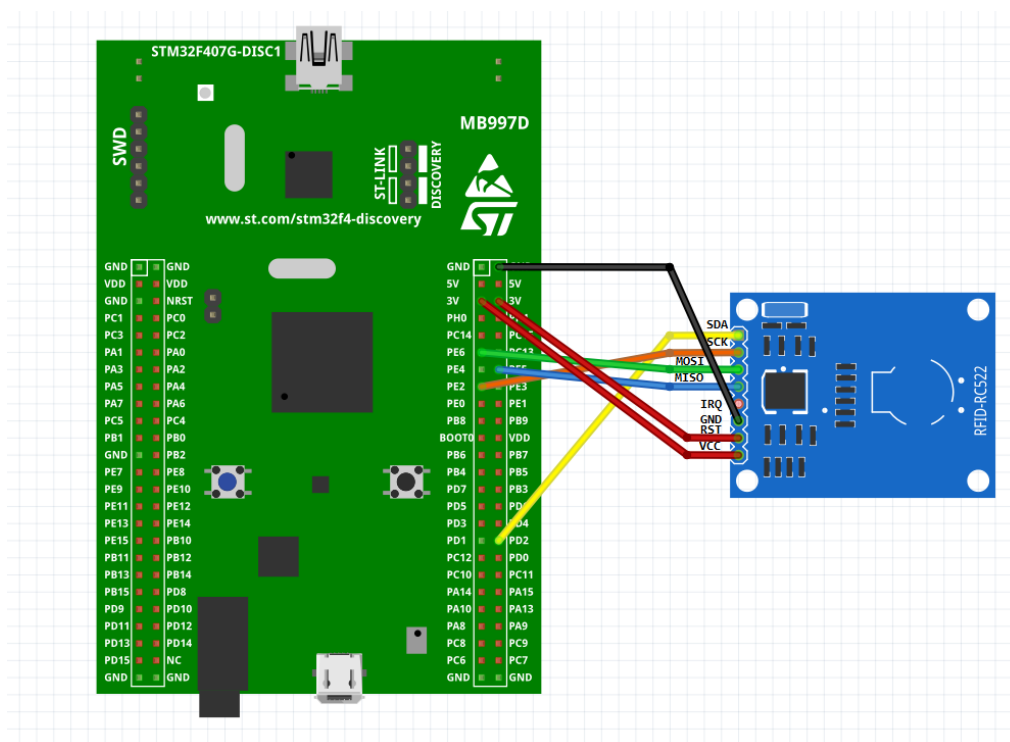


Figura 22: Esquemático da ligação da placa STM32F767ZI ao Módulo RC522.

Para a implementação deste módulo na STM32F767ZI foi utilizada uma biblioteca que se encontra disponibilizada *online* [4]. Esta biblioteca contém funções de inicialização do módulo e funções para transferência de dados entre o microcontrolador e o módulo. Destaca-se a função *MFRC522\_CheckCard* que retorna *RFID\_OK* se encontrar uma *tag* na proximidade do *RC522*, Figura 23. Essa função altera o valor da variável *CardID* para o valor *UID* da tag encontrada.

```
1 /* If card is found, its id and type are returned */
2 MFRC522_Status_t MFRC522_CheckCard(uint8_t tid, uint8_t *type) {
3 MFRC522_Status_t status = MFRC522_Request(MFRC522_PICC_REQ_IDL, id);
4 if (status == RFID_OK) { // Detected card
5 status = MFRC522_Anticollision(id);
6 status = MFRC522_SelectTag(id, type);
7 }
8
9 MFRC522_Halt();
10 return status;
11 }
```

Figura 23: Implementação da função *MFRC522\_CheckCard*.

Relativamente ao funcionamento, a leitura será somente ativa nas zonas de cruzamentos, ou nos pontos de destino, ou seja, quando todos os sensores do seguidor de linha detetam a linha preta. As etiquetas por sua vez também se localizaram nesses mesmo pontos, uma vez que se trata de zonas de decisão e o robô necessita saber que caminho optar para chegar a um determinado destino. Um esquema da rota a realizar foi desenhar de modo a testar diversas situações, Figura 24, tais como, curvas de noventa graus, curvas prolongadas, cruzamentos e chegadas a pontos de destino (Pontos A, B e C).

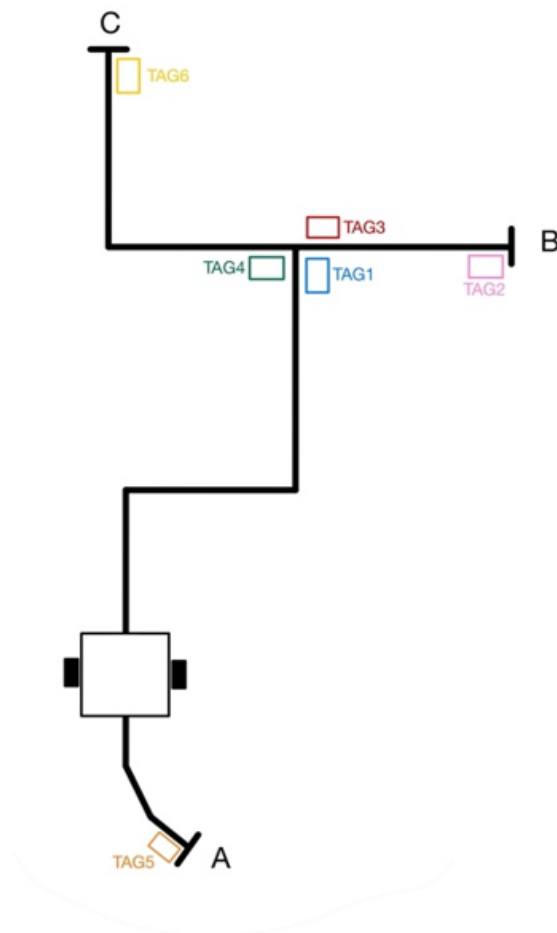


Figura 24: Percurso experimental com as *tags*, bem como os respectivos postos.

Resumindo, para estas trajetórias possíveis, as etiquetas (*tags*) é que ditam o seu percurso, assim o leitor realizará a leitura da etiqueta em cada cruzamento, a máquina de estados interpretará o UID da etiqueta e, dependendo do destino do robô, decidirá que caminho tomar para chegar ao destino, ou seja, as etiquetas presentes em cruzamentos e nos pontos destinos permitem ao robô uma orientação no trajeto e identificar o caminho a tomar.

### 3.4 Detetores de obstáculos

Para detetar obstáculos, foram utilizados um sensor ultrassónico, *Sensor Ultrassónico HC-SR045*, e um *Buzzer*.

#### 3.4.1 Sensor Ultrassónico HC-SR045

De modo a serem detetados obstáculos que se encontrem no trajeto do JIGA 8.0, foi implementado um sensor ultrassom, com a finalidade de evitar colisão e parar o robô. Este módulo utiliza a contagem de pulsos gerados por um timer, isto é, o sensor encontra-se no modo *IDLE*, sem fazer nada, até que seja

acionado ativamente. Acionar o sensor para iniciar a operação é feito enviando um pulso curto para o pino *TRIGGER* e deve ter uma largura superior  $2\ \mu\text{s}$ .

Após o sensor ser acionado, são enviados 8 pulsos de ondas sonoras a uma frequência de 108 kHz. O som viaja praticamente em linha reta até atingir um objeto e, por conseguinte, reflete de volta para o módulo do sensor. Este envia um pulso digital no pino de *ECHO* que tem uma largura igual ao tempo de viagem do som (ida e volta) entre o módulo e o objeto sentido. Assim é utilizado o pulso de *ECHO* como entrada do sensor e mede-se a sua largura, para obter o valor da distância entre o sensor e o objeto que se encontra à sua frente.

Salienta-se que o nível lógico *TTL* do módulo de sensor ultrassom *HC-SR04* é de 5 V. No entanto, uma vez que o nível lógico do microcontrolador STM32F767ZI é de 3,3 V e, como os pinos GPIO geralmente não são tolerantes a 5 V, assume-se que são apenas 3,3 V. Deste modo, é necessário adaptar o nível de operação dos sinais *ECHO* e *TRIGGER* para um valor de leitura adequado, encontrando-se este procedimento exposto na Figura 25.

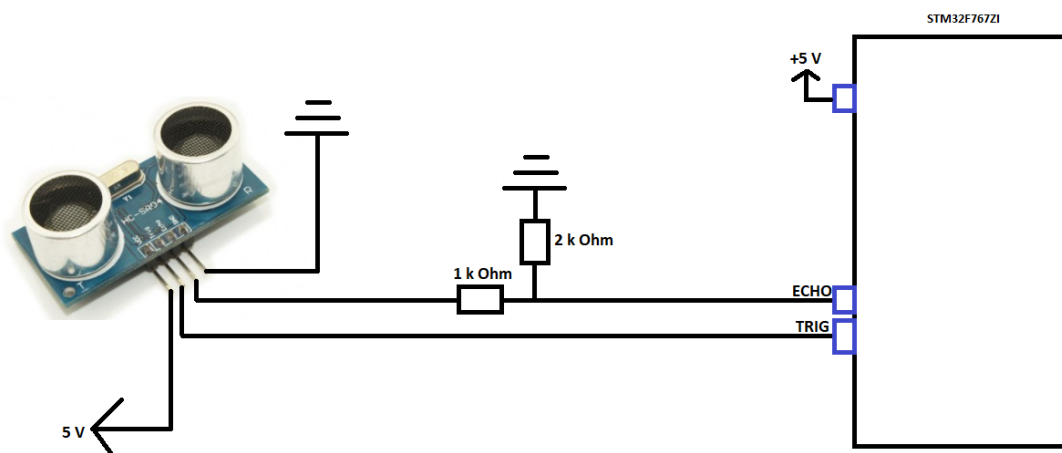


Figura 25: Diagrama de conexão entre o sensor ultrassom e a placa STM32F767ZI.

A linha *TRIG* é uma saída do microcontrolador e uma entrada para o sensor ultrassom. É um nível de saída de 3,3 V e é suficiente para acionar um nível de entrada alto lido na extremidade do sensor, então pode-se conectá-lo diretamente ao microcontrolador.

A linha *ECHO* funciona como entrada do microcontrolador e como saída do sensor. Então esta linha precisa ser deslocada do nível lógico de 5 V para 3,3 V e, por uma questão de simplicidade, usou-se resistências realizando uma divisão de tensão como mostra o diagrama de conexão abaixo.

Para a medição do pulso *ECHO*, utilizou-se um *timer* no modo de captura de entrada para medir a largura do pulso de *ECHO*.

Para o processo descrito acima, foi usada uma biblioteca de *drivers ECUAL/ HCSR04*, que usam *ICU* com *timers* para registar o tempo em que o pulso *ECHO* vai de *HIGH* a *LOW*. O *driver HCSR04* consiste nos seguintes ficheiros:

- **HCSR04.h**

Como se pode analisar no ficheiro *HCSR04.h*, Figura 26, as *APIs* fornecidas possuem todas as funcionalidades básicas que são necessárias numa biblioteca de *drivers* ultrassônicos.

```

1 #ifndef HCSR04_H_
2 #define HCSR04_H_
3
4 #define HAL_TIM_MODULE_ENABLED
5 #include "stm32f7xx_hal.h"
6 // The Number Of HC-SR04 Ultrasonic Sensors To Be Used In The Project
7 #define HCSR04_UNITS 1
8
9 typedef struct
10 {
11 GPIO_TypeDef * TRIG_GPIO;
12 uint16_t TRIG_PIN;
13 TIM_TypeDef* TIM_Instance;
14 uint32_t IC_TIM_CH;
15 uint32_t TIM_CLK_MHz;
16 }HCSR04_CfgType;
17
18
19 /*-----[ Prototypes For All Functions ]-----*/
20
21 void HCSR04_Init(uint8_t au8_HCSR04_Instance, TIM_HandleTypeDef* TMR_Handle);
22 void HCSR04_Trigger(uint8_t au8_HCSR04_Instance);
23 void HCSR04_TMR_OVF_ISR(TIM_HandleTypeDef* htim);
24 void HCSR04_TMR_IC_ISR(TIM_HandleTypeDef* htim);
25 float HCSR04_Read(uint8_t au8_HCSR04_Instance);
26
27 #endif /* HCSR04_H_ */

```

Figura 26: Configurações do *HCSR04.h*.

- *HCSR04\_Init*: Inicializa o pino *GPIO\_TRIG* necessário, o *timer* associado com o canal de *ICU* que foi selecionado.
- *HCSR04\_Trigger*: Envia um pulso de *trigger* no pino *TRIG* selecionado para iniciar o funcionamento do sensor.
- *HCSR04\_Read*: Lê a distância em qualquer instância de tempo.

As *APIs* dão ao utilizador 2 manipuladores da *ISR* que são chamados dentro das funções de retorno para eventos de interrupção do *Timer* e *ICU*.

- **HCSR04.c**

- HCSR04\_cfg.h
- HCSR04\_cfg.c

Na Figura 27, estão presentes as configurações do sensor. A estrutura de *config* é usada para atribuir o pino *GPIO\_TRIGGER (PG3)*, o periférico *TIMER* associado que estará a ser usado, neste caso *TIM2*, o canal *ICU\_TIMER* para o pino *ECHO* e, por último, a velocidade *CLK* em *MHz* para o *timer (108 MHz)*.

```
1 #include "../HCSR04/HCSR04.h"
2
3 const HCSR04_CfgType HCSR04_CfgParam[HCSR04_UNITS] =
4 {
5 // HC-SR04 Sensor Unit 1 Configurations
6 {
7 GPIOG,
8 GPIO_PIN_3,
9 TIM2,
10 TIM_CHANNEL_1,
11 108
12 }
```

Figura 27: Configurações do sensor ultrassom.

Para se conseguir obter o valor da distância foi ainda necessária a implementação das seguintes *interrupts*, que se verificam na Figura 28.

```
1 #void HAL_TIM_IC_CaptureCallback(TIM_HandleTypeDef *htim) // Capture interrupt
2 {
3 HCSR04_TMR_IC_ISR(htim);
4 }
5 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef* htim) // to update (overflow) interrupt
6 {
7 HCSR04_TMR_OVF_ISR(htim);
8 }
9 void SysTick_Callback(void) // SysTick Timer Interrupt each 15ms
10 {
11 SysTicks++;
12 if(SysTicks == 15) // Each 15ms
13 {
14 HCSR04_Trigger(0);
15 SysTicks = 0;
16 }
```

Figura 28: Implementação das interrupções para obter o valor da distância.

Por último, foi chamada a função *SysTick\_Callback* dentro do *SysTick\_Handler*, como mostra a Figura 29.



```

1 void SysTick_Handler(void)
2 {
3 /* USER CODE BEGIN SysTick_IRQn 0 */
4
5 /* USER CODE END SysTick_IRQn 0 */
6 HAL_IncTick();
7 /* USER CODE BEGIN SysTick_IRQn 1 */
8 SysTick_Callback();
9 /*

```

Figura 29: Função *SysTick\_Callback* chamada dentro da *SysTick\_Handler*.

### 3.4.2 Módulo *Buzzer* Ativo

Para se interagir com o *Buzzer*, tem que se fornecer uma entrada variável para o *Buzzer* e, para obter isso, foi utilizado um *PWM* para criar uma onda quadrada de baixa frequência e variando o *duty-cycle* pode-se ouvir as variações no som proveniente do *Buzzer*.

O *timer4* foi escolhido para o canal *PWM*, e os valores *prescaler* e *ARR* foram definidos, Figura 30 e Figura 31, tendo em conta que estamos a usar um *clock* de 216MHz e um *duty-cycle* que varia entre 0 até 255.

▼ Counter Settings	
Prescaler (PSC - 16 bits value)	16
Counter Mode	Up
Counter Period (AutoReload Register - ...)	49826
Internal Clock Division (CKD)	No Division
auto-reload preload	Disable

Figura 30: Periféricos do *timer4* para gerar *PWM* para o *Buzzer*.

```

1 //Starts timer for buzzer usage
2 HAL_TIM_PWM_Start(&htim4, TIM_CHANNEL_1);
3 //While the obstacle is detected the buzzer beeps
4 while(HCSR04_Read(HCSR04_SENSOR1)<=20)
5 {
6 htim4.Instance->CCR1 = value; //value of frequency used in buzzer
7 }
8 HAL_TIM_PWM_Stop(&htim4, TIM_CHANNEL_1); //Stop the buzzer

```

Figura 31: Código utilizado para a implementação do *Buzzer*.

## 3.5 Gerador PWM

Para o controlo da velocidade de rotação de cada motor implementou-se modulação por largura de impulso (PWM). Como a ponte-H utilizada requer 2 sinais PWM para o controlo de cada motor (*reverse* PWM e o *forward* PWM), foram então necessários 4 canais de um timer. Assim, usou-se o *timer1*, apresentado na Figura 32, para gerar o *PWM* dos motores. O registo de *prescaler* toma o valor de 1 e o *period* de 53999. Assim, gera-se uma onda quadrada de frequência de 1 kHz.

**TIM1 Mode and Configuration**

Mode	
Slave Mode	Disable
Trigger Source	Disable
Clock Source	Internal Clock
Channel1	PWM Generation CH1
Channel2	PWM Generation CH2
Channel3	PWM Generation CH3
Channel4	PWM Generation CH4
Channel5	Disable
Channel6	Disable

Configuration	
Reset Configuration	
✓ NVIC Settings	✓ DMA Settings
✓ Parameter Settings	✓ User Constants

Configure the below parameters :

▼ Counter Settings

- Prescaler (PSC – 16 bits value) 1
- Counter Mode Up
- Counter Period (AutoReload ... 53999
- Internal Clock Division (CKD) No Division
- Repetition Counter (RCR – 1... 0
- auto-reload preload Enable

▼ Trigger Output (TRGO) Parameters

- Master/Slave Mode (MSM bit) Disable (Trigger input effect not dela...
- Triqger Event Selection TRGO Reset (UG bit from TIMx EGR)

Figura 32: Configurações do *timer1* de modo a funcionar como gerador de *PWM*.

## 3.6 Aplicação para Dispositivos Móveis

Foi desenvolvida uma aplicação para dispositivos móveis *Android*, através da ferramenta *MIT App Inventor*, uma plataforma online onde é possível criar aplicações para telemóveis através da programação em blocos. Esta plataforma divide a app em 2 processos:

1. *Design*;
2. *Blocks*.

Primeiramente, no que toca ao *Design* consiste na interface do interface utilizador, como pode ser visto na Figura 33. As funcionalidades escolhidas foram botões, textos, imagens, *Bluetooth*, etc.

Pode ser melhorada e acrescentadas funcionalidades, mas como é projeto didático e de forma a validar a mesma só foram criadas essas duas funcionalidades.

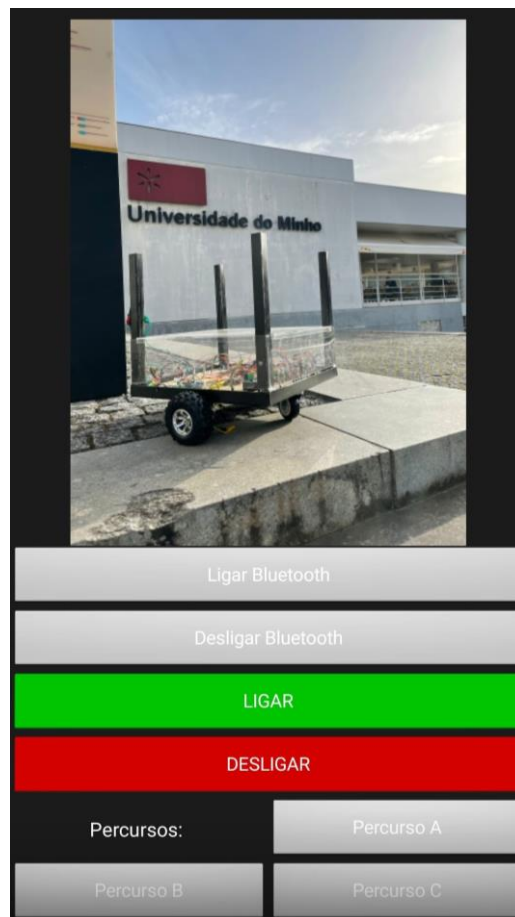


Figura 33- Menu principal da aplicação para dispositivos móveis.

Após a criação desta interface, avançou-se para a parte da implementação de código no *Blocks*, onde foi definida cada funcionalidade que a aplicação deve realizar. Exemplo disso é a Figura 34.

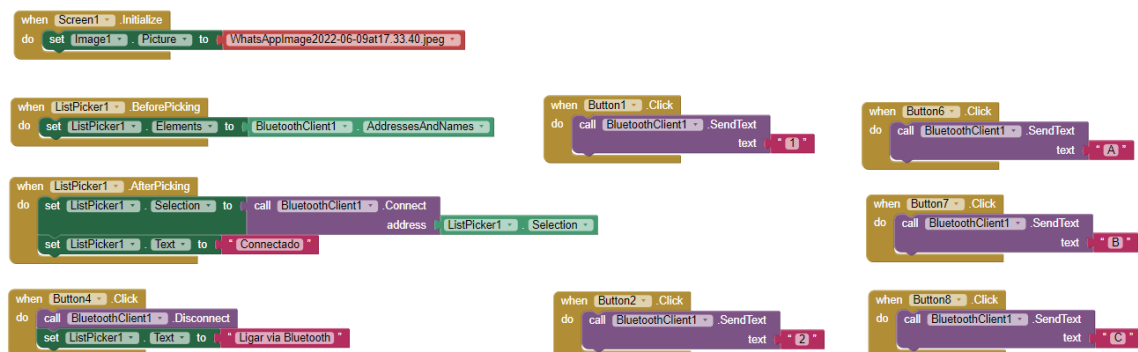


Figura 34: Programação em blocos.

Para efetuar a ligação do dispositivo *Android* com o JIGA, o utilizador deve clicar no botão “Ligar via Bluetooth” e escolher o dispositivo HC-05 no menu de opções de ligação.

Utilizou-se o *Bluetooth* para envio de dados de forma a de ligar/desligar o JIGA e escolher os percursos.

Funcionalidades da *app*:

- Ligar e desligar o robô;
- Conectar e desconectar o Bluetooth;
- Escolha de percursos pré-definidos entre postos.

Para isto, foi necessário ligar o módulo Bluetooth e o microcontrolador SM32F767ZI. Isto pode-se verificar no diagrama da Figura 35.

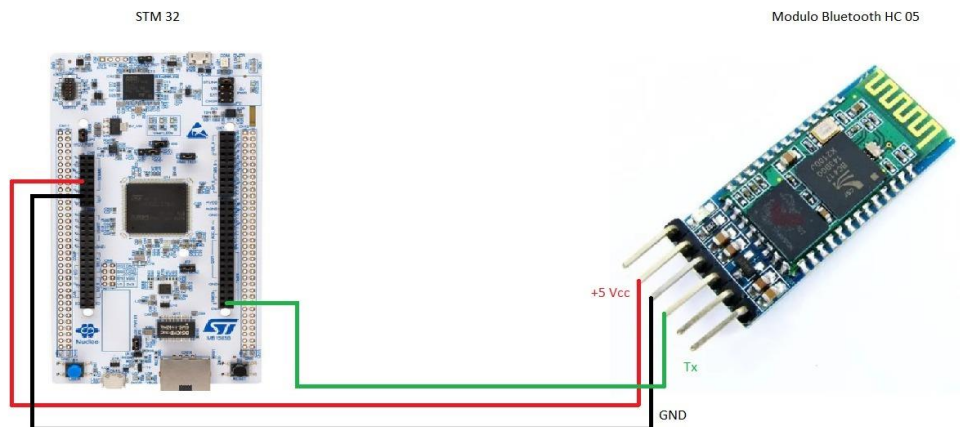


Figura 35: Diagrama de conexão do módulo Bluetooth HC-05 com a STM32F767ZI.

Quando se encontra ligado pode-se transmitir e receber dados entre o dispositivo móvel e o microcontrolador.

### 3.7 Máquina de Estados

A base do código do robô é a máquina de estados da Figura 36, sendo responsável por interpretar todos os valores enviados pelos periféricos referidos anteriormente e também, controlar todas as funções do robô.

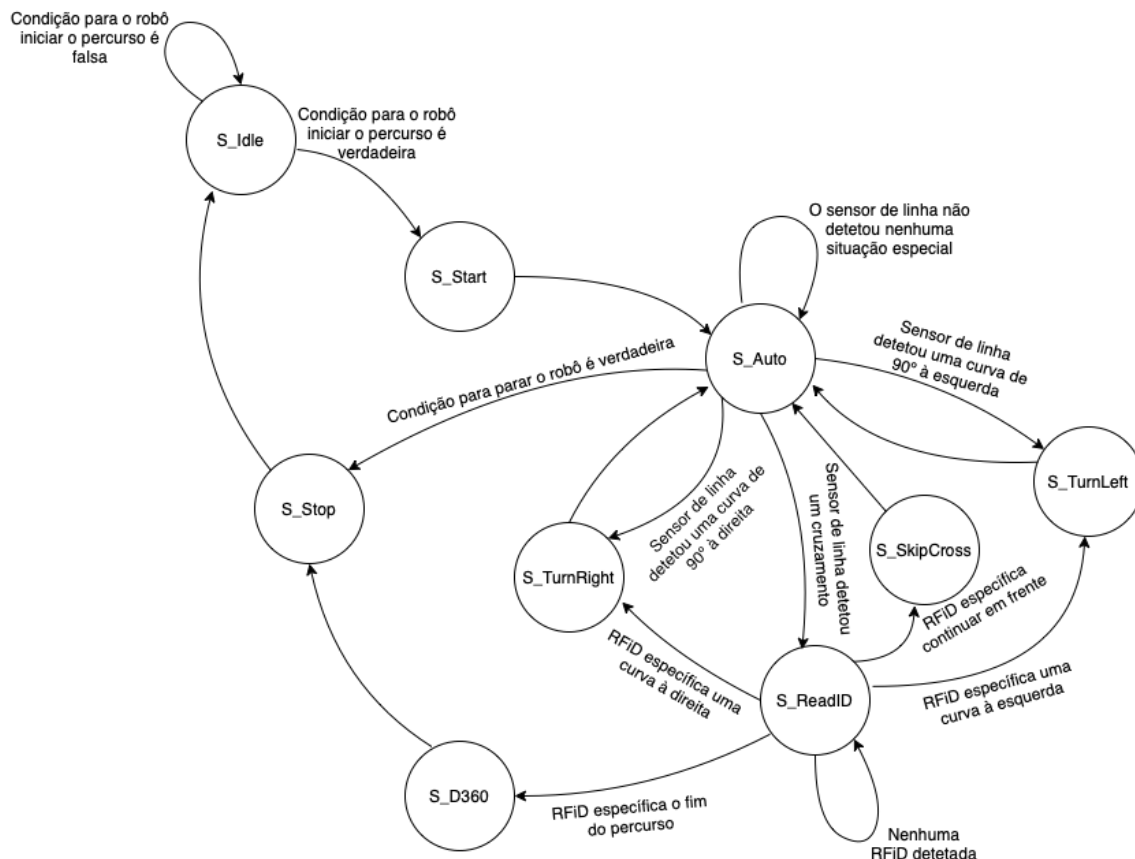


Figura 36: Diagrama de interligação entre todos os estados existentes para o correto funcionamento do JIGA 8.0.

Posto isto, na Tabela 19, estão presentes os estados e uma explicação sucinta dos mesmos.

Tabela 19: Tabela de Estados.

Estado	Descrição
S_Idle	Estado no qual se espera a receção de um carácter através da <i>UART</i> ou do acionamento de um botão, que indiquem o início do ciclo do robô.
S_Start	Estado responsável pela ativação dos sinais de <i>PWM</i> fornecidos às ponte-h e dá início ao controlo PID.
S_Auto	Estado responsável por detetar condições para as quais o controlador PID não tem resposta (curvas de 90° e cruzamentos), também é responsável por parar o robô caso exista um obstáculo à sua frente.
S_TurnRight	A transição para este estado é feita caso os três sensores mais à direita do sensor de linha sejam os únicos com nível lógico 1. Este estado é responsável por desativar o controlador PID e realizar uma curva de 90° à direita e depois volta a ativar o controlador PID regressando ao estado <i>S_Auto</i> .
S_TurnLeft	A transição para este estado é feita caso os três sensores mais à esquerda do sensor de linha

	sejam os únicos com nível lógico 1. Este estado é responsável por desativar o controlador PID e realizar uma curva de 90° à esquerda e depois volta a ativar o controlador PID regressando ao estado <i>S_Auto</i> .
S_ReadID	A transição para este estado é feita caso os cinco sensores do sensor de linha estejam com nível lógico 1. Este estado é responsável por desativar o controlador PID e realizar a leitura de uma <i>RFiD</i> , a qual vai indicar ao robô que direção tem de seguir dependendo do destino predefinido do mesmo.
S_SkipCross	Estado responsável por seguir em frente num cruzamento caso a <i>RFiD</i> presente no mesmo assim o indique.
S_D360	Estado responsável por virar o robô ao contrário caso este tenha chegado ao seu destino.
S_Stop	Estado que desativa todos os sinais <i>PWM</i> e o controlador PID.

### 3.8 Conclusões do capítulo

No que diz respeito a este capítulo, estudou-se os seguintes circuitos: seguidor de linha, sistema RFID, habilitação dos motores, gerador de PWM, máquina de estados e detetores de obstáculos.

No que concerne ao circuito seguidor de linha efetuou-se calibração e ensaios, para permitir ter na saída uma tensão entre os 0 V e os 3,3 V.

Relativamente ao controlo dos motores recorreu-se a uma máquina de estados, que permite o funcionamento entre as duas rodas, os dois motores, de forma a ter a movimentação pretendida.

Recorrendo ao uso do módulo RFID, com auxílio da máquina de estados, é possível receber sinais de informação e, detetando um cruzamento e dependendo da *tag* que lê muda de direção, para ou arranca.

Referente ao gerador de PWM, provém de uma comparação da tensão de saída do circuito do seguidor de linha e da tensão gerada por um sinal dente de serra.

Do que foi dito sintetiza-se que a aglomeração de todos estes códigos permite que o JIGA 8.0 siga a linha preta colocada no chão, pare, vire e arranque quando receba sinal das etiquetas.

## 4.Carregamento Sem Fios

Relativamente a este capítulo, aborda-se a composição da constituição do carregamento, bem como as etapas realizadas para a constituição do mesmo.

### 4.1 Descrição Sumária do Produto

Para a realização desta parte do projeto, exploraram-se as leis de Ampere [5] e Faraday [6]. Partindo destas leis, sabe-se que um fio com corrente alternada gera à sua volta um campo magnético. Posto isto, se nas localidades próximas dessa região houver circuitos elétricos pode-se induzir uma corrente nele devido a uma tensão induzida. Usualmente estes sistemas são constituídos por 2 enrolamentos (primário e secundário), com um espaçamento de ar entre eles. Não existindo conexão física, a eficiência é posta em causa.

Recorrendo ao uso do modelo de indutância mútua ( $M$ ), pode caracterizar-se o sistema, utilizando conceitos de tensão induzida e refletida para entender o efeito de acoplamento entre os dois enrolamentos. De forma a acoplar energia do lado primário para o secundário usa-se o  $M$ .

De forma a dimensionar o sistema, foi necessário um estudo relativo aos sistemas de transferência de energia sem fio. Com este estudo, deparou-se pela falta de informação de um protocolo de como dimensionar o sistema pretendido. Esta lacuna de informação refletiu-se num desafio acrescido neste projeto. Deste modo, conversou-se com investigadores que têm vindo a desenvolver sistemas de indução de forma a perceber os conceitos, riscos associados, precauções e procedimento. Analisando toda esta informação, deu-se prioridade à funcionalidade do sistema, de forma validar o conceito, não dando prioridade à eficiência do sistema. Com base nesta premissa, implementou-se a seguinte metodologia:

- De forma a maximizar o campo magnético recebido pelo robô, determinou-se o diâmetro máximo da espira do primário com base nas dimensões da base do JIGA 8.0. Pretendia-se que a espira do primário ficasse sobressaísse no solo e ficasse compreendida entre rodas. Ou seja, a espira do primário ficasse na superfície do solo, e não incorporada, bem como permitisse o JIGA 8.0 deslocar sobre a superfície de indução.;
- O passo seguinte passou por determinar o espaçamento existente entre a base do JIGA 8.0 com o solo. Com este parâmetro, definiu-se uma distância máxima entre espiras. De mencionar que

para a determinação desta distância foi necessário ter em consideração a altura das placas de madeira que acoplam as espiras;

- O terceiro passo passou por determinar o diâmetro máximo pretendido para a espira do secundário, considerando as dimensões da base do JIGA 8.0;
- No próximo passo definiu-se o número de espiras em cada espira. Para tal, foi necessário estabelecer alguns parâmetros de funcionamento, nomeadamente: 70 V na espira do primário, 12 V no sistema de carregamento da bateria; 40 kHz como frequência de ressonância do sistema;
- No quinto passo calculou-se a eficiência de transferência de energia, com apenas as perdas nos enrolamentos;
- Depois com todos os parâmetros definidos, determinou-se a distância de segurança do carregamento sem fios e a magnitude do campo magnético à medida que se aumenta a distância ao centro do enrolamento primário.

Uma vez definida metodologia de implementação, procedeu-se à análise e consequente implementação do sistema de transferência de energia sem fios, sendo os tópicos analisados em seguida.

## 4.2 Constituição do Protótipo

O carregador é composto por vários componentes principais, sendo enumerados de seguida.

- Duas placas de madeira;
- Fio de cobre esmaltado;
- 32 Peças para suporte das bobinas;
- Banco de Condensadores acoplado num circuito inversor;
- Conversor CC/CC;
- Fonte de tensão;
- 3 fusíveis;
- 2 disjuntores.



Na Figura 37 encontra-se representada uma imagem do protótipo do sistema de indução implementado para ensaios laboratoriais preliminares.



Figura 37: Protótipo do sistema de indução implementado.

### 4.3 Simulações

De forma a estudar o sistema de indução e dimensionar as bobinas, utilizou-se o *software COMSOL Multiphysics* para simular todos os parâmetros necessários e possíveis. Primeiramente foi medida a base do JIGA 8.0 para descobrir o diâmetro máximo que a bobina do secundário (recetor) pode ter. Esse diâmetro é de 35 cm. Medido o máximo diâmetro procedeu-se à simulação que obtém o valor máximo de indutância mútua, através do raio, como mostra a Figura 38.

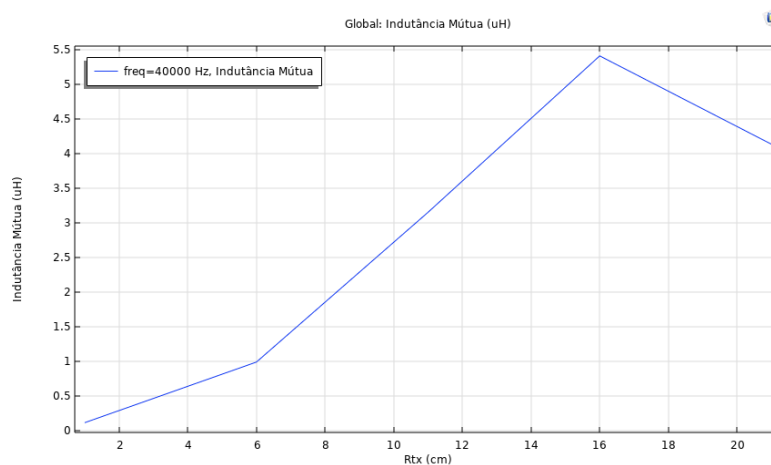


Figura 38: Gráfico da indutância mútua em função do raio.

A etapa seguinte passou por descobrir o número de voltas de fio para a bobina no lado primário (emissora), Figura 39, que possibilita a potência que é pretendia, 12 Watts, na bobina secundária (recetora). Estipulou-se um valor mais elevado na simulação para compensar as perdas que apenas se vão apresentar na prática.

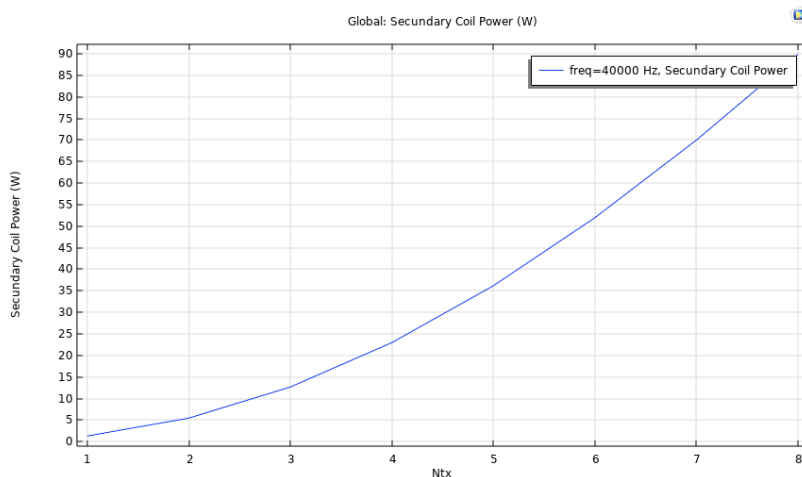


Figura 39: Número de voltas do lado primário, para os valores de potência.

Após isso, para uma tensão de excitação de 70 V, simulou-se o número de voltas de fio no secundário, recetor, para a máxima potência obtida neste, Figura 40. De mencionar que a tensão de 70 V é obtida na saída do conversor ressonante uma vez que, com uma tensão CC à entrada de 24 V, este apresenta uma tensão de saída sinusoidal cuja amplitude apresenta um fator de  $\pi$ .

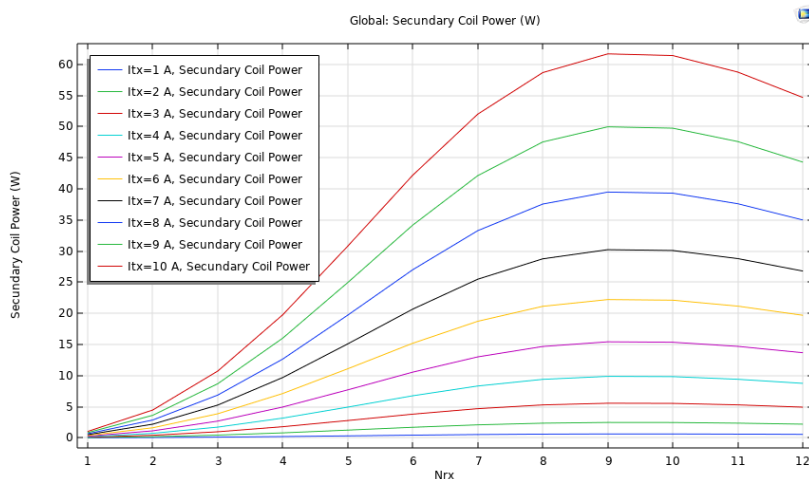


Figura 40: Número de voltas de fio para obter potência máxima no secundário, tendo uma tensão de excitação de 70 V.

De seguida, foram determinados os valores da potência, da corrente, da tensão e das indutâncias, Figura 41.

freq (Hz)	Primary voltage (V)	Secondary voltage (V)	Primary power (W)	Secondary power (W)	Primary current (A)	Secondary current (A)	Primary Coil inductance (uH)	Secondary Coil inductance (uH)
40000	70.000	36.834-10.806i	65.776	61.395	1.8793-11.918i	-3.0695+0.90046i	22.803	22.933

Figura 41: Valores simulados.

Por fim, simulou-se uma distância de segurança de 30 cm, a que pessoas devem encontrar-se distanciadas dos enrolamentos enquanto eles estão em funcionamento. Esta análise é apresentada na Figura 42.

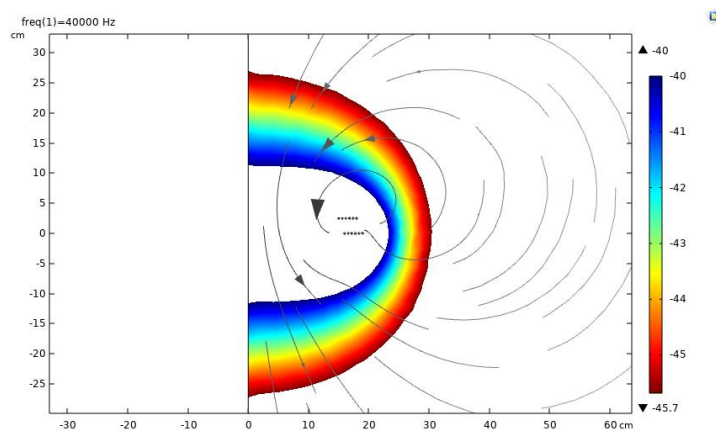


Figura 42: Distância de segurança dos enrolamentos enquanto estão em funcionamento.

Posto isto, é possível ver os parâmetros todos na Tabela 20.

Tabela 20: Parâmetros dos enrolamentos.

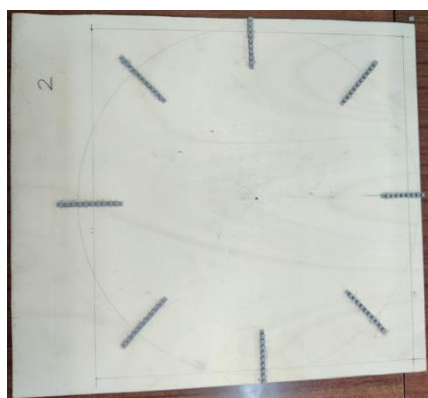
Nome	Expressão	Valor	Descrição
rwire	1,5 [mm]	0,0015 m	Raio do fio
fr	40 [kHz]	40 000 Hz	Frequência
Ntx	6	6	Número de voltas no primário
Nrx	6	6	Número de voltas no secundário
Rrx	15 [cm]	0,15 m	Raio do secundário
Rtx	16 [cm]	0,16 m	Raio do primário
d	2,5 [cm]	0,025 m	Distância, em altura, entre as espiras
Vtx	70 [V]	70 V	Tensão do transmissor
dw	3 [mm]	0,003 m	Distância entre voltas dos enrolamentos

## 4.4 Processo para a Construção do Carregamento

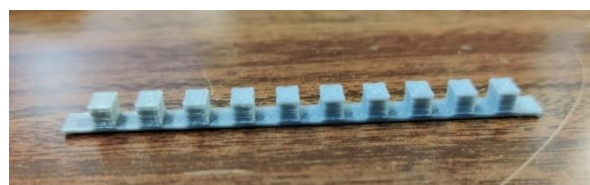
De modo a realizar o carregamento, o trabalho foi repartido em várias etapas. Estas encontram-se explicadas nos seguintes tópicos abaixo, de forma mais pormenorizada.

### 4.4.1 Suportes para as bobinas

Primeiramente fez-se o corte de duas placas de madeira, uma para acoplar a bobina primário e a outra para a bobina secundária. Nessas placas, desenhou-se os diâmetros das espiras, Figura 43-(a), e, através da ferramenta *Autodesk* construíram-se 32 peças 3D em forma de “pente” para cada enrolamento, Figura 43-(b), sendo colocadas na placa com o objetivo de manter a forma desejada da bobina.



(a)



(b)

Figura 43: Placa madeira; (a): Desenho do diâmetro das espiras; (b): Peça 3D em forma de pente.

### 4.4.2 Fio para as bobinas

Para esta escolha fez-se um estudo prévio, nomeadamente do efeito pelicular. Este efeito, trata-se do fenómeno responsável pelo aumento da resistência aparente do fio, em função do aumento da frequência da corrente elétrica. Em corrente contínua, a corrente distribui-se de forma uniforme em toda secção, porém quando é em corrente alternada, o mesmo não se verifica. Não obstante, quanto maior for a frequência, menor a área de secção de condução e mais perto da extremidade do fio, levando a um aquecimento maior, exemplo ilustrativo verifica-se na Figura 44 [7].

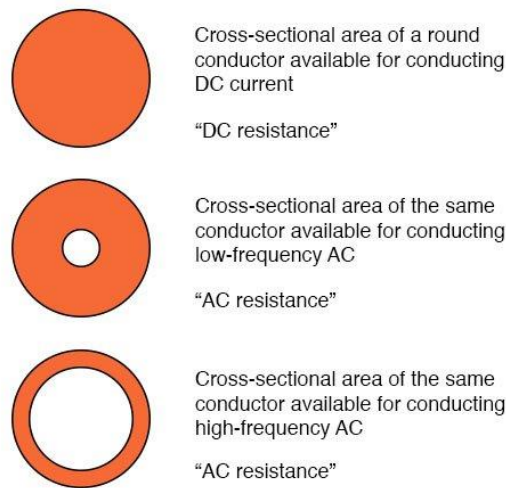


Figura 44: Comportamento do fio perante o efeito pelicular [7].

Posto isto, também é possível ver na Figura 45, a relação do diâmetro do fio com a frequência máxima que o mesmo aguenta [8].

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Conductor cross section in mm <sup>2</sup>	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper	Breaking force Soft Annealed Cu 37000 PSI
0000	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	380	302	125 Hz	6120 lbs
000	0.4096	10.40384	84.9	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz	4860 lbs
00	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz	3860 lbs
0	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz	3060 lbs
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz	2430 lbs
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz	1930 lbs
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	158	75	500 Hz	1530 lbs
4	0.2043	5.18922	21.1	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz	1210 lbs
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz	960 lbs
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz	760 lbs
7	0.1443	3.66522	10.6	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz	605 lbs
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz	480 lbs
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz	380 lbs
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz	314 lbs
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz	249 lbs
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz	197 lbs
13	0.072	1.8288	2.63	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz	150 lbs
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz	119 lbs
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz	94 lbs
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz	75 lbs
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	19	2.9	13 k Hz	59 lbs
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	16	2.3	17 kHz	47 lbs
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	14	1.8	21 kHz	37 lbs
20	0.032	0.8128	0.519	10.15	33.292	11	1.5	27 kHz	29 lbs
21	0.0285	0.7239	0.412	12.8	41.984	9	1.2	33 kHz	23 lbs
22	0.0253	0.64516	0.327	16.14	52.9392	7	0.92	42 kHz	18 lbs
23	0.0226	0.57404	0.259	20.36	66.7808	4.7	0.729	53 kHz	14.5 lbs
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	3.5	0.577	68 kHz	11.5 lbs
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz	9 lbs
26	0.0159	0.40386	0.128	40.81	133.8568	2.2	0.361	107 kHz	7.2 lbs
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	1.7	0.288	130 kHz	5.5 lbs
28	0.0126	0.32004	0.080	64.9	212.872	1.4	0.226	170 kHz	4.5 lbs
29	0.0113	0.28702	0.0647	81.83	268.4024	1.2	0.182	210 kHz	3.6 lbs
30	0.01	0.254	0.0507	103.2	338.496	0.86	0.142	270 kHz	2.75 lbs
31	0.0089	0.22606	0.0401	130.1	426.728	0.7	0.113	340 kHz	2.25 lbs
32	0.008	0.2032	0.0324	164.1	538.248	0.53	0.091	430 kHz	1.8 lbs

Figura 45: Relação do diâmetro do fio com a frequência máxima [8].

De modo a dimensionar o fio, calculou-se o diâmetro máximo do fio que consiga minimizar o efeito pelicular considerando a frequência de ressonância que se pretende, com base na equação (5.3.2).

$$\begin{aligned}
 \text{diâmetro do fio} &= \frac{6.62}{\sqrt{40000}} * 2 \\
 &= 0,662 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{5.3.2}$$

Recorrendo ao laboratório do GEPE, encontraram-se fios de cobre envernizados com diâmetros de 0,32 mm, 0,45 mm, 2,45 mm e 3,71 mm. Excluindo o primeiro valor, 0,32 mm, pois teriam de ser dadas mais voltas nos enrolamentos. Também não podiam ter sido usados os valores de 3,71 mm, nem de 2,45 mm, uma vez que não são valores viáveis, dado que não são indicados a frequência que é imposta. Logo, o fio utilizado foi o que tem valor de diâmetro 0,45 mm.

O passo seguinte passou por determinar o número de fios com diâmetro de 0,45 mm em paralelo, de modo a perfazer a secção desejada. Para dimensionar a área de secção do fio, usou-se a regra de “*três simples*” (3 A - 5 A por 1 mm<sup>2</sup>), visto que na simulação obtiveram-se 8,5 A, valor eficaz, portanto para se ter margem de manobra, foi calculado um fio para 9 A.

Logo:

$$\begin{array}{ccc} 3 \text{ A} & & 1 \text{ mm}^2 \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ 9 \text{ A} & & X \end{array}$$

$$X = 3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área Secção fio (0,45mm)} = \left(\frac{0,45}{2}\right)^2 * \pi = 0,159 \text{ mm}^2$$

$$\begin{array}{ccc} 0,159 \text{ mm}^2 & & 1 \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ 3 \text{ mm}^2 & & X \end{array}$$

$$X = 19$$

Portanto, tiveram de ser enrolados 19 fios em paralelo.

De modo a enrolar os fios, primeiramente teve-se de os esticar unindo cada ponta a um disco onde se prendiam, Figura 46, e numa das pontas o disco encontrava-se acoplado a um berbequim que o rodava, de forma a enrolar o fio.



Figura 46: Processo de esticar e enrolar os fios.

Estando os fios enrolados, foi colocado nos suportes 3D desenvolvidos, de forma a ter as voltas necessárias, Figura 47.

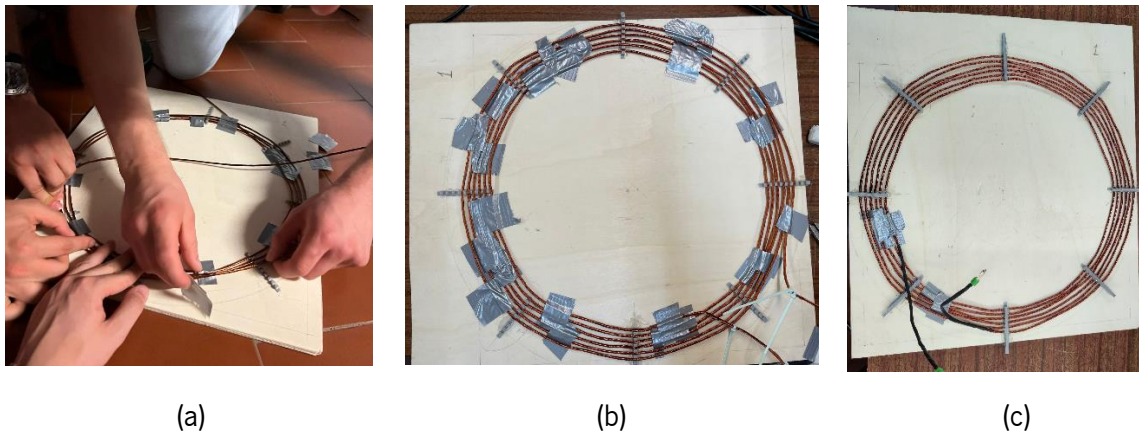


Figura 47: Colocação do fio para formar a bobina; (a): Colocar o fio nas peças 3D e segurar com fita cola; (b): fio seguro por fita cola, já colocado sobre a peça 3D inferior; (c): Resultado final da colocação do fio nas peças 3D.

### 4.4.3 Banco de Condensadores

De forma a criar um circuito ressonante, foi necessário dimensionar um valor de condensador de forma a implementar um circuito ressonante LC. Este circuito irá minimizar a reatância do sistema, fazendo com que se comporte como carga puramente resistiva, obtendo-se uma corrente em fase com a tensão.

Após medido o valor prático da indutância da bobina do primário e comparado com o teórico procedeu-se ao dimensionamento do condensador. Tendo em conta a frequência de ressonância e a indutância do primário e secundário, consegue-se descobrir assim os valores tanto dos condensadores do primário como do secundário, estando na equação (5.3.3.1) e na (5.3.3.2), respetivamente.



$$C_p = \frac{1}{(2 * \pi * f)^2 * L_p} = \frac{1}{(2 * \pi * 40000)^2 * 24,5 * 10^{-6}} = 0,6488 \mu F \quad (5.3.3.1)$$

$$C_s = \frac{1}{(2 * \pi * f)^2 * L_p} = \frac{1}{(2 * \pi * 40000)^2 * 23,9 * 10^{-6}} = 0,662 \mu F \quad (5.3.3.2)$$

#### 4.4.4 Estágio de Retificação

Devido ao circuito ressonante de alta frequência, é necessário um conversor CA-CC com diodos de recuperação rápida. Considerando ainda os valores de tensão e de corrente de operação, escolheu-se o *D0865C6*.

Os diodos *D0865C6* possuem as características apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21: Características do Diodo D0865C6.

Característica	Valor
$I_f$ (corrente contínua) máxima	11 A
$V_{RRM}$ (Tensão Inversa de Pico Repetitivo)	650 V
$T_j$ (Temperatura de Operação)	175 °C
Tempo de recuperação	1 ns

A partir do gráfico da Figura 48 [9], assume-se que nas condições de operação não é necessário o uso de um dissipador.

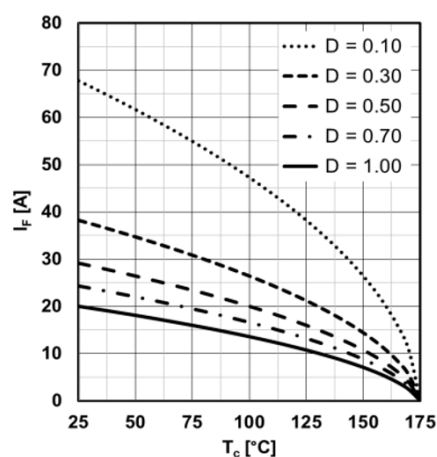


Figura 48: Condições de operação [9].



No final da ponte retificadora foi acoplado um condensador eletrolítico de suavização (de valor 100nF) para converter o *ripple* de saída numa saída de tensão DC mais suave.

#### 4.4.5 Conversor CC-CC

A tensão apresentada nos terminais do enrolamento secundário varia conforme a distância e a eficiência do sistema, sendo apenas determinado o valor real de forma experimental. Por isso, foi utilizado um conversor CC-CC *Buck*, Figura 49, para se manter a tensão de alimentação da bateria aos 12 V. Para além disto, o conversor funciona também como um limitador de corrente onde protege o circuito contracorrentes elevadas (no caso ajustado para 1 A).

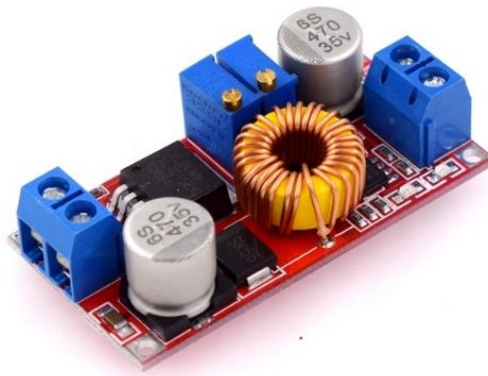


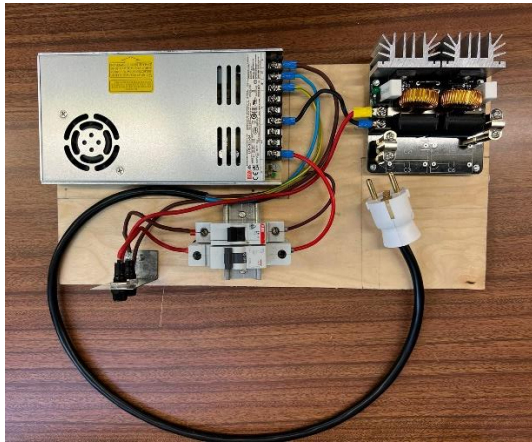
Figura 49: Conversor CC-CC.

#### 4.4.6 Circuito de Alimentação no Primário

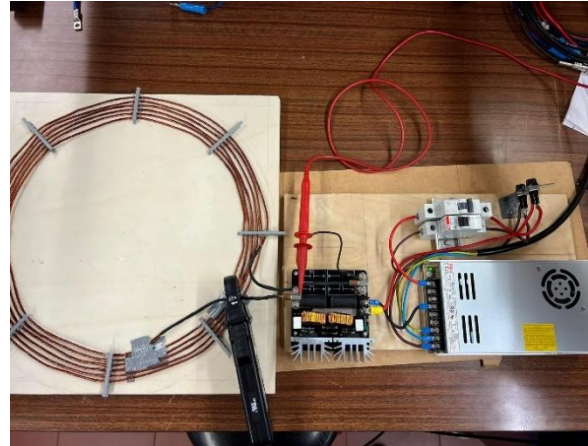
Para alimentação do circuito foram utilizados os seguintes componentes:

- Fonte de alimentação comutada;
- Inversor de sinal DC para AC;
- Disjuntores (5 A e 20 A);
- Fusíveis (5 A e 20 A).

O principal objetivo dos disjuntores é não se ter a tensão que o circuito pede, no instante que liga, levando a uma grande demanda de corrente, por isso primeiro liga-se a fonte até ficar constante a tensão e depois conecta-se o circuito. O que foi dito encontra-se representado na Figura 50.



(a)



(b)

Figura 50: Circuito de alimentação no primário; (a): Circuito de alimentação; (b): Circuito de alimentação ligado ao primário.

## 4.5 Conclusões

Em suma, ao longo da realização do carregamento sem fios foram encontrados vários problemas, devido ao reduzido conhecimento na área, sendo assim foi fundamental uma forte investigação e várias reuniões de apoio.

De realçar a simulação como ponto de partida para este estágio, e também a parte física de acoplação de fios e componentes, que foi sempre de maneira mais profissional dando sempre grande ênfase aos pormenores.

Posto isto, foram desenvolvidas habilidades essenciais para o futuro, ao nível da atenção que é necessária quando se testa pela primeira vez vários estágios, desenvolvidos separadamente, de uma maneira conjunta, profissionalismo na parte da acoplação de contactos físicos e aprendizagem mais a fundo na utilização de equipamentos de medição.

## 5. Resultados Experimentais

No que concerne a este capítulo, são abordados os resultados dos ensaios experimentais em cada parte individual que constituem o circuito eletrónico do robô. Para tal, apresentam-se imagens dos multímetros e dos diferentes circuitos para os respetivos sistemas.

### 5.1 Sistema de Controlo Seguidor de Linha

De modo a testar o seguidor de linha, foram ligados os 5 sensores presentes no seguidor de linha à placa STM32F767ZI. Para isso, foram retirados valores de tensão para cor branca e cor preta da linha, em diferentes pontos das linhas. No que diz respeito à cor branca, esta tem valores de tensão compreendidos entre os 2,3 V e os 3,3 V. Já no que concerne à cor preta, os valores de tensão que o seguidor de linha lê são no máximo de 1 V. Exemplos desses valores estão presentes na Figura 51.



(a)

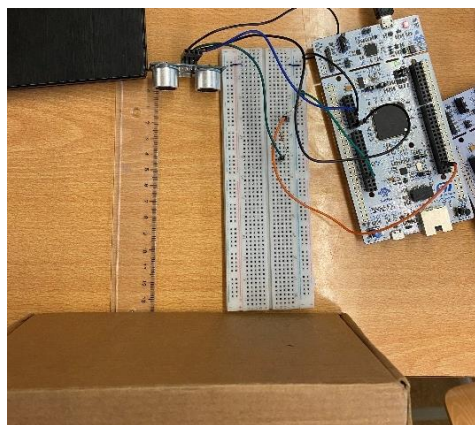


(b)

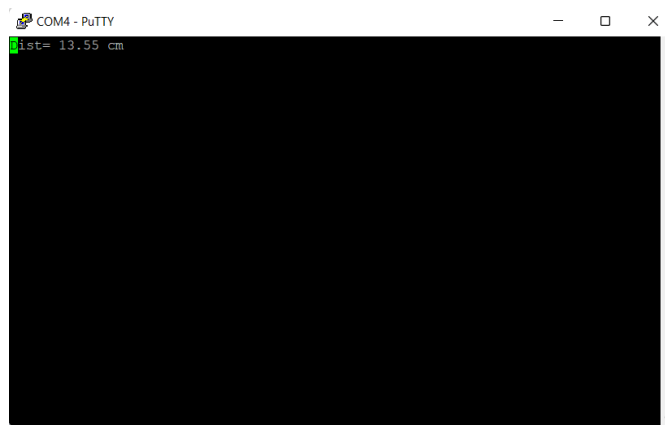
Figura 51: Valores de tensão lidos consoante a cor da linha; (a): Valor refletido na linha de cor branca; (b): Valor de tensão refletido na linha de cor preta.

### 5.2 Detetor de obstáculos

Para verificar que a distância que o sensor mede é a correta, utilizou-se uma régua desde o sensor até ao objeto, sendo o ensaio apresentado na Figura 52-(a). O valor processado na STM foi enviado via terminal, comprovando a correta configuração tal como apresentado na Figura 52-(b).



(a)



(b)

Figura 52: Resultado experimental do detetor de obstáculos; (a): Medição com a régua; (b): Distância obtida no terminal.

## 5.3 Módulo RFID

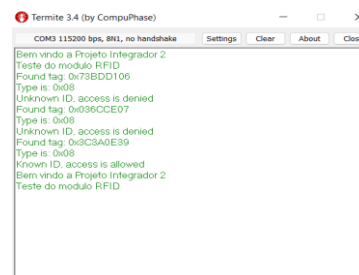
De forma a auxiliar a movimentação do protótipo, impondo o sentido de rotação em caso de cruzamento, entroncamento ou paragem, criou-se um sistema com módulo RFID que permitem gerar sinais até 6 cm de distância (Figura 53).



(a)



(b)



(c)

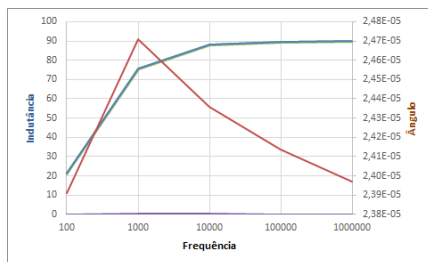
Figura 53: Módulo RFID: (a) Módulo; (b) emissor infravermelho; (c) Duas *tags* desconhecidas, isto é, não programadas, a tentarem se ligarem ao módulo, sendo que o acesso é negado e, por último a *tag* conhecida a permitir acesso.

## 5.4 Carregamento Sem Fios

### 5.4.1 Indutância e Resistência das Bobinas

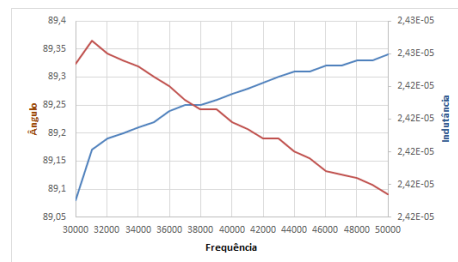
Após a construção das bobinas, foi utilizada uma ponte RLC para medir a indutância das bobinas, verificando-se assim que os valores reais são idênticos aos simulados, Figura 54 e Figura 55.

Frequência	Z(ohm)	deg(deg)	Ls(H)
100	5,40E-02	21,03	2,39E-05
1000	1,60E-01	75,56	2,47E-05
10000	1,53E+00	88,18	2,44E-05
100000	1,52E+01	89,48	2,41E-05
1000000	1,51E+02	89,88	2,40E-05



(a)

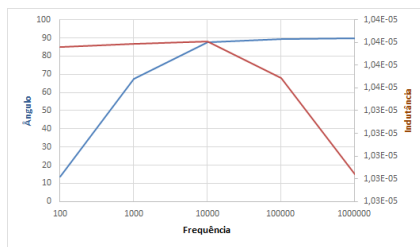
Frequência	Z(ohm)	deg(deg)	Ls(H)
30000	4,57E+00	89,08	2,42E-05
31000	4,72E+00	89,17	2,43E-05
32000	4,88E+00	89,19	2,43E-05
33000	5,03E+00	89,2	2,42E-05
34000	5,18E+00	89,21	2,42E-05
35000	5,33E+00	89,22	2,42E-05
36000	5,48E+00	89,24	2,42E-05
37000	5,63E+00	89,25	2,42E-05
38000	5,79E+00	89,25	2,42E-05
39000	5,94E+00	89,26	2,42E-05
40000	6,09E+00	89,27	2,42E-05
41000	6,24E+00	89,28	2,42E-05
42000	6,39E+00	89,29	2,42E-05
43000	6,55E+00	89,3	2,42E-05
44000	6,70E+00	89,31	2,42E-05
45000	6,85E+00	89,31	2,42E-05
46000	7,00E+00	89,32	2,42E-05
47000	7,15E+00	89,32	2,42E-05
48000	7,30E+00	89,33	2,42E-05
49000	7,45E+00	89,33	2,42E-05
50000	7,61E+00	89,34	2,42E-05



(b)

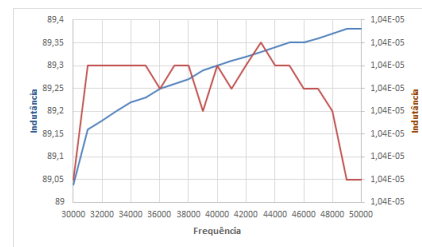
Figura 54: Medições da indutância da bobina primária para diferentes frequências; (a): Resultados para extremos de frequências, bem como o respetivo gráfico; (b): Resultados para frequências no intervalo da frequência de ressonância e respetivo gráfico.

Frequência	Z(ohm)	deg(deg)	Ls(H)
100	2,76E-02	13,72	1,04E-05
1000	7,07E-02	67,61	1,04E-05
10000	6,54E-01	87,62	1,04E-05
100000	6,52E+00	89,5	1,04E-05
1000000	6,46E+01	89,82	1,03E-05



(a)

Frequência	Z(ohm)	deg(deg)	Ls(H)
30000	1,96E+00	89,04	1,04E-05
31000	2,03E+00	89,16	1,04E-05
32000	2,09E+00	89,18	1,04E-05
33000	2,16E+00	89,2	1,04E-05
34000	2,22E+00	89,22	1,04E-05
35000	2,29E+00	89,23	1,04E-05
36000	2,35E+00	89,25	1,04E-05
37000	2,42E+00	89,26	1,04E-05
38000	2,48E+00	89,27	1,04E-05
39000	2,55E+00	89,29	1,04E-05
40000	2,61E+00	89,3	1,04E-05
41000	2,68E+00	89,31	1,04E-05
42000	2,75E+00	89,32	1,04E-05
43000	2,81E+00	89,33	1,04E-05
44000	2,88E+00	89,34	1,04E-05
45000	2,94E+00	89,35	1,04E-05
46000	3,01E+00	89,35	1,04E-05
47000	3,07E+00	89,36	1,04E-05
48000	3,14E+00	89,37	1,04E-05
49000	3,20E+00	89,38	1,04E-05
50000	3,27E+00	89,38	1,04E-05



(b)

Figura 55: Medições da indutância da bobina secundária para diferentes frequências; (a): Resultados para extremas de frequências e gráfico respectivo; (b): Resultados para frequências no intervalo da frequência de ressonância e respectivo gráfico.

Analisando os dados obtidos, o valor de indutância da bobina mantém-se praticamente constante para um espectro de frequência largo.

Através do ohmímetro de precisão, com a referência KEYSIGHT 34450A. foram medidos os valores de resistência de cada enrolamento. O ensaio foi realizado com 4 fios, dois de alimentação e dois de sinal, tendo sido realizada uma média de 30 amostras de forma a atenuar o erro de medição, obtendo-se os valores de resistência seguintes:

- $R_{\text{bobina primária}} = 0,047 \, \Omega$ ;
- $R_{\text{bobina secundária}} = 0,036 \, \Omega$ .

## 5.4.2 Teste do Enrolamento Primário Sem o Secundário

Montou-se a fonte de tensão, o banco de condensadores compensador e inversor para verificar a frequência de ressonância, tensão e corrente, para isso utilizou-se o osciloscópio, como mostra a Figura 56.



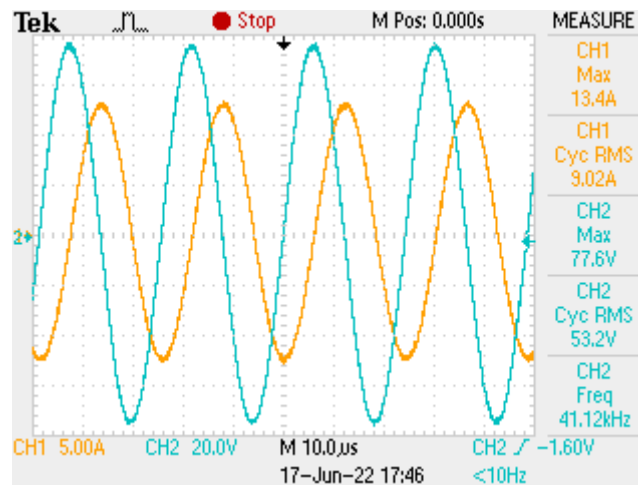


Figura 56: Resultado experimental obtido no osciloscópio.

### 5.4.3 Teste de Todo o Sistema Com Uma Carga

Para este teste montou-se o todos os componentes do carregamento sem fio e usou-se como carga duas lâmpadas em paralelo, cada uma com tensão de 12 V e resistência de 46  $\Omega$ . Para efeitos de segurança foi-se aproximando a bobina do secundário à do primário lentamente para verificar a tensão e corrente no secundário. Verificou-se que a tensão obtida na bobina secundária era muito elevada por isso foi necessário remover duas espiras a essa bobina, Figura 57.

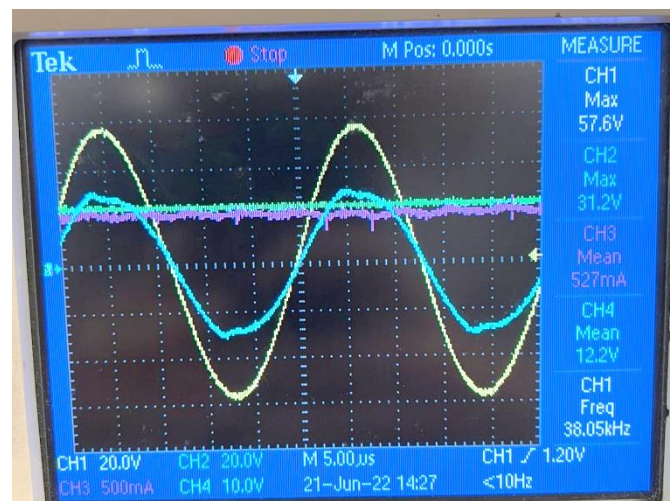


Figura 57: Imagem do osciloscópio tensão, corrente na bobina primária e secundária e frequência.

### 5.4.4 Teste do Carregamento Sem Fios Com a Bateria

Depois de concluir-se todos os testes individuais e um pré-final com uma carga a simular a bateria, finalizou-se a os resultados experimentais com o teste do carregamento sem fios conectado à bateria que ia alimentar o circuito de controlo e potência do JIGA 8.0. Isto encontra-se visível nas Figura 58 e Figura 59.

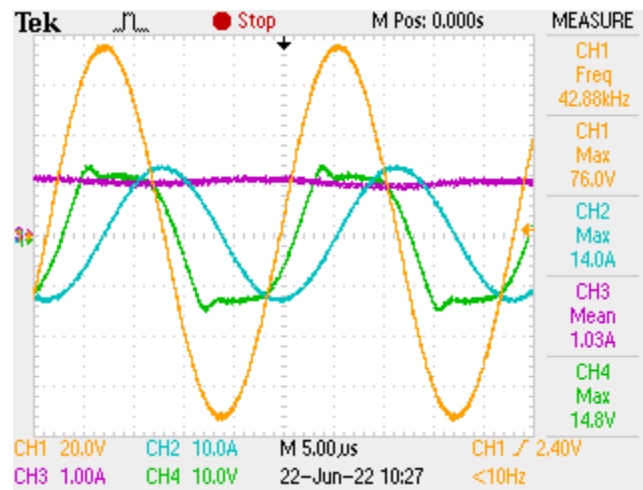
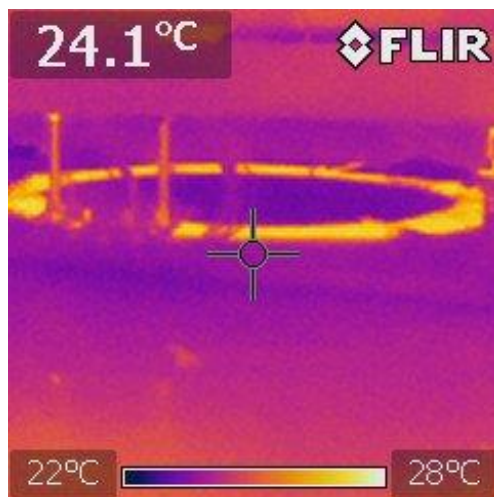
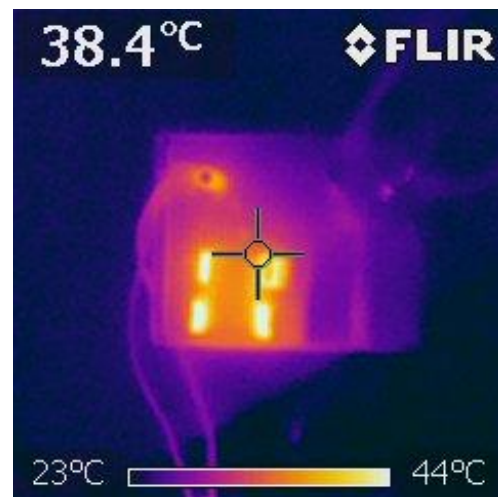


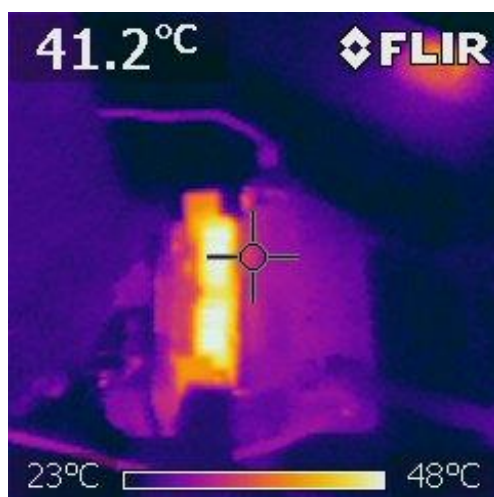
Figura 58: Imagem do Osciloscópio, CH1- tensão da bobina primária, CH2-corrente na bobina primária, CH3-tensão na bobina secundária e CH4- corrente na carga.



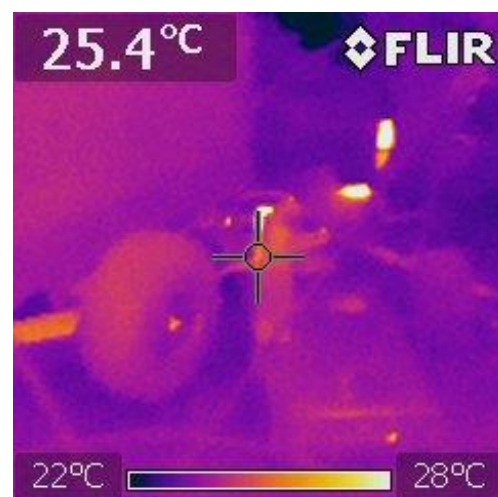
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 59: Imagens térmicas dos vários componentes; (a) Enrolamento primário; (b) Ponte retificadora; (c) Inversor; (d) Fonte de alimentação



## 5.5 Conclusões

A continua testagem de forma isolada das diversas aplicações a ser introduzidas no projeto contribui para a solidez final do sistema. Primeiramente, ao nível do *software* os problemas que surgiam eram facilmente resolvidos utilizando a ferramenta de *debug*, no entanto, na implementação do módulo RFID tornou-se mais complicado a verificação do correto funcionamento do mesmo. Uma vez que não se possuía o UID de cada *tag* utilizada, assim não se conseguiu constatar a correta leitura por parte do leitor. Tal fator não se demonstrou importante uma vez que apenas se pretendia que o *UID* associado a cada *tag* fosse único e que o leitor registasse sempre o mesmo valor.

Conseguiu-se proceder à montagem e testagem dos diversos circuitos integrantes do robô, dos diversos sensores e motores. Nomeadamente os motores, o sensor de linha e os detetores de obstáculos. Nos subcapítulos anteriores os resultados esperados foram validados e confirmados.

Relativamente aos ensaios feitos no carregamento, os resultados em partes foram validados e, por isso, avançou-se para o aglomerado do sistema e o sucessivo teste, confirmando assim que este funciona de forma correta.

## 6. Estudo de Fiabilidade, Segurança e Certificação

No desenvolvimento de um produto, onde se inclui sistemas mecânicos e eletrónicos, é necessário um estudo prévio de fiabilidade, segurança e certificação, de modo a verificar a regulamentação existente, que permite avaliar o projeto nestas três dimensões.

### 6.1 Certificação

Para que um produto possa ser comercializado na União Europeia, é obrigatória a sua certificação, Figura 60. Esta para além de obrigatória, previne que o produto tenha uma má utilização, pondo em risco a segurança de todos que utilizam e rodeiam o produto.

Para que um produto seja certificado deve existir um dossiê técnico que documente a conformidade, e tem de ser ainda redigida e assinada uma declaração UE de conformidade. Assim, existe uma marcação CE relativa a máquinas, em que as mais utilizadas regra geral são as Diretivas Máquinas, as Diretivas Baixa Tensão e as Diretivas Compatibilidade Eletromagnética [10]. O processo de pedido de certificação em Portugal pode ser pedido em [11], sendo exemplificado as etapas de avaliação e decisão.



Figura 60: Símbolo da marcação CE

Este produto como inclui um carregamento sem fios, também é necessária uma certificação com uma marcação Qi, Figura 61.



Figura 61: Símbolo da marcação *QI*.

## 6.2 Fiabilidade

Relativamente à fiabilidade do JIGA, ao longo do tempo este dependerá do bom funcionamento dos componentes do sistema, tais como: resistências, potenciômetros, motores, baterias, a própria placa STM32, entre outros.

Problemas de ruído eletromagnético pode ocorrer, sendo recomendado incorporar o sistema eletrónico dentro de uma caixa metálica. Contudo, sendo um projeto didático, parte desta caixa metálica foi substituída por uma placa de acrílico de forma a ser possível demonstrar o trabalho desenvolvido. Não obstante, o local do microcontrolador e bateria foi dimensionado de forma a ficar totalmente fechado, evitando assim a entrada de poeiras e salpicos de água. Desta forma, é possível obter um grau de proteção IP63. De forma a maximizar esta proteção para IP67 ou algo semelhante, todo o sistema deve ficar vedado, nomeadamente os orifícios utilizados para a passagem de cablagem.

Segundo Smith [12] existem vários fatores que podem comprometer os componentes, entre eles:

- **Ambientais:** calor e humidade podem provocar danos em componentes mais sensíveis;
- **Mecânicas:** mau trabalho de soldagem, defeitos de componentes ou dilatações térmicas podem causar este tipo de danos;
- **Idade:** ao decorrer do envelhecimento dos componentes eletrónicos a probabilidade de avaria aumenta devido a deterioração natural.

Os componentes mais sensíveis a estes danos são:

- Baterias;
- Condensadores;
- Semicondutores.

## 6.3 Segurança

No que concerne à segurança, existem alguns mecanismos e alguns cuidados que devem ser adotados.

### Mecanismos de proteção:

1. O botão de ligar/desligar deve permitir a interrupção de imediato das ações do robô pela parte do utilizador, realizando um corte de energia ao sistema;
2. Para prevenção de curto-circuitos pode ser implementado um mecanismo de proteção da bateria, de forma a não danificar a mesma, nomeadamente com a incorporação de um sistema de gestão de bateria, na nomenclatura inglesa *battery managememnet system* (BMS). O BMS além de mecanismos de proteção provém de um sistema de gestão de carga ativo, mantendo as baterias com o mesmo estado de carga, evitando assim possíveis problemas de operação e danificação da bateria [13];
3. Pode ser implementada uma proteção de componentes contra sobretensões para quando a alimentação é ligada ou desligada;
4. Uso de fusíveis de modo a proteger o sistema contra sobrecargas;
5. Utilização de disjuntores para proteger o sistema de carregamento sem fios contra sobrecorrentes, causadas pelo excesso de carga ou curto-circuitos;
6. Conversor CC-CC, de modo a limitar a corrente e a tensão.

### Cuidados:

1. Quando o aparelho não está a ser utilizado deve ser desligado;
2. O robô não se destina ao manuseamento por pessoas com capacidades mentais, sensoriais ou físicas reduzidas, por crianças ou por pessoas com falta de experiência ou conhecimento;
3. Não se deve estar em cima das linhas pretas quando o robô se está a deslocar para evitar colisões;
4. Estar distanciado, no mínimo, a 30 cm enquanto os enrolamentos do carregamento estiverem ligados.



## 7. Manual de Utilizador



Este manual tem como grupo-alvo todos os utilizadores do JIGA 8.0. É recomendável a sua leitura e compreensão antes da utilização do produto. Todas as questões de segurança devem ser cumpridas, bem como o seu manuseamento, de forma a garantir a total funcionalidade do sistema.

### 7.1 Segurança

Existem alguns perigos associados à má utilização do JIGA 8.0. Devem ser por isso tomadas certas medidas para um uso seguro deste. Na Tabela 22, são esclarecidos os diferentes níveis de perigo que o utilizador deve ter em atenção durante o seu manuseamento.

Tabela 22: Tipos de Perigos.

Simbologia	Descrição	Aplicação no projeto
 <b>DANGER</b>	Indica uma situação potencialmente perigosa que pode resultar em morte ou lesões muito graves.	Não colocar nenhuma parte física do corpo em contacto nos termináveis da fonte que liga à rede elétrica
 <b>WARNING</b>	Indica uma situação potencialmente perigosa que pode resultar em lesões graves.	Remover os objetos do trajeto do robô  - Conferir que não existem objetos no trajeto do JIGA de forma a não haver colisões. Pode provocar danos tanto como no robô como em pessoas.  Conferir que o utilizador se encontra à distância de segurança, 30 cm, dos enrolamentos do sistema de carregamento sem fios quando se encontram ligados.

 <b>CAUTION</b>	<p>Indica uma situação potencialmente perigosa que pode resultar em situações menores ou lesão moderada. Alertas contra práticas inseguras.</p>	<p>Usar apenas em superfícies secas e lisas</p> <p>- Para não haver prejuízos, não só no produto como também em pessoas, este deve apenas ser utilizado em superfícies onde não haja perigo de deslizamento</p>
 <b>NOTICE</b>	<p>Indica informações importantes, incluindo situações que podem resultar em danos ao equipamento ou à propriedade.</p>	<p>Utilizar apenas do interior de edifícios</p> <p>- Há risco de danificar o robô, este nunca deve ser utilizado no exterior de edifícios.</p> <p>Remover objetos indesejados do chão</p> <p>- O artigo não consegue detetar objetos e pode colidir ou passar por cima destes.</p> <p>Evitar ambientes extremamente húmidos</p> <p>- A humidade da divisão não deve ser muito elevada porque pode levar a que o produto seja danificado.</p>

## 7.2 Sobre o JIGA

O JIGA 8.0 é um robô que tem como principal objetivo facilitar o transporte de ferramentas, mercadorias de baixo porte, entre outros, no interior de uma zona industrial, onde terá pontos de paragem previamente controlados. O utilizador tem de definir com uma linha branca, o caminho que pretende que o robô siga, bem como os pontos de paragem e mudanças de direção, recorrendo à colocação de dispositivos de simulação, neste caso específico, infravermelhos.

Caso pretenda que o robô pare, devem ser colocados etiquetas, tags, com esse objetivo. Já se desejar mudar de direção deve ser reproduzir um sinal para o lado que pretende que vire.

Primeiramente o produto deve ser colocado no início do trajeto e de seguida ligar o interruptor, isto é, carregar no botão, para que o sistema se ative e inicie a sua trajetória. Mais tarde, ao decorrer do percurso, o utilizador deve ter colocado etiquetas consoante o caminho que pretenda que siga, nos vários pontos assinalados para que o robô prossiga no seu trajeto de forma correta. Terminando, o JIGA deverá ir de encontro ao posto de carregamento e, por conseguinte, o utilizador pode então, desligar o robô.

Como exemplificação da forma correta, na Figura 62, está presente o diagrama de funcionamento, enaltecendo que o trajeto é feito com emissores preposicionados.

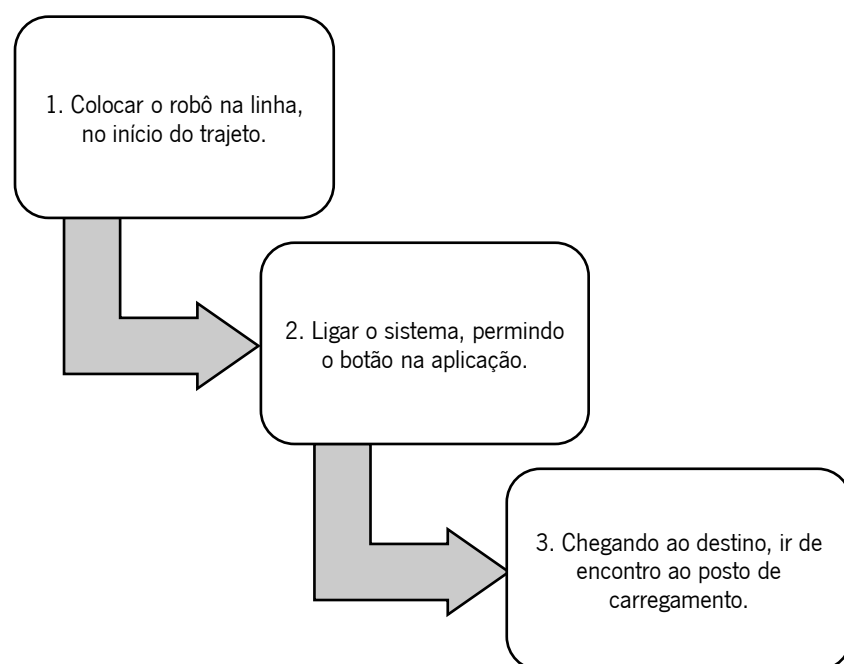


Figura 62: Diagrama de Funcionamento do Robô.

### 7.3 Especificações

$$\tau = F \cdot \frac{\text{diamtro da roda}}{2} \leftrightarrow F = 7,84662 \text{ N}$$
$$F = m \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} \leftrightarrow m = 39,233 \text{ Kg}$$

Tabela 23: Tabela das Especificações do JIGA

Característica	Especificação
Dimensão	50 cm (altura) x 44 cm (largura)x 44 cm (comprimento)
Peso do robô	13 Kg
Carga máxima	26 Kg
Tipo de Bateria	UCG7.2-12 (12 V 7,2 AH)
Binário máximo	0,47 N.m
Autonomia do JIGA	7 h
Velocidade máxima	0,2 m/s
Tempo que demora a atingir a velocidade máxima	1 s
Carregador do Robô	12 V

De mencionar que a autonomia pode variar em função da carga, do tipo de trajeto realizado e do número de etapas. Assim, estimou-se um consumo médio do sistema em condições nominais de operação.

A Figura 63, apresenta uma vista frontal e geral do JIGA 8.0. Na mesma vêem-se os componentes principais para funcionamento e sustentação do mesmo.



Figura 63: Visão frontal do robô.

Na Figura 64, tem a disposição da placa STM32F767ZI, das ponte-H e da bateria.



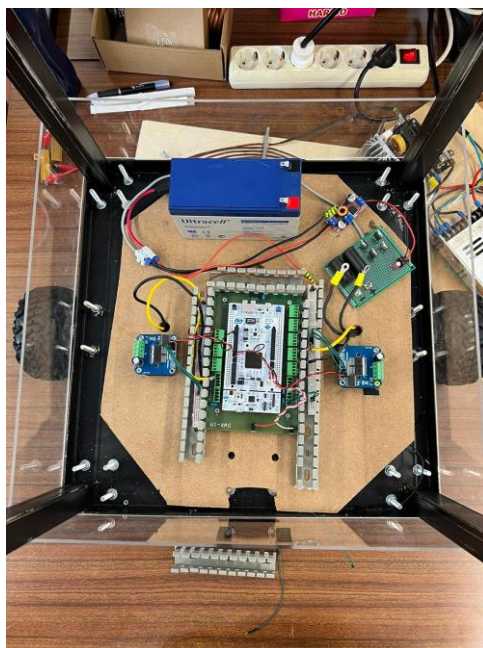


Figura 64: Visão superior do JIGA 8.0, bem como a disposição da bateria, da placa STM32F767ZI e das ponte-H-

Na Figura 65, é apresentada a disposição da bobina do secundário acoplada ao JIGA 8.0, bem como a disposição do sensor seguidor de linha e do módulo RFID.

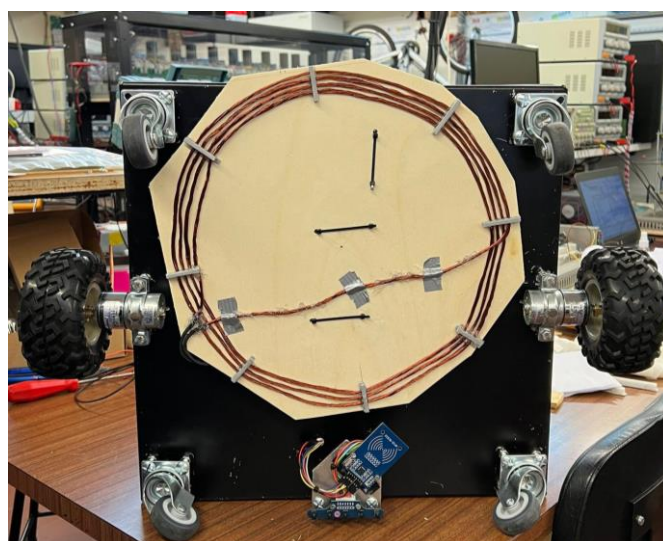


Figura 65: Visão inferior da vista inferior do robô, tal como a disposição dos componentes e da bobina do secundário.

## 8. Conclusões

Este capítulo é referente às conclusões do presente projeto. Primeiramente, são apresentadas as considerações finais, com um balanço do projeto desenvolvido e os seus resultados. Por fim, apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro, no seguimento do projeto desenvolvido.

### 8.1 Conclusão

O JIGA 8.0 é um robô que pode ser usado de forma colaborativa com as pessoas, aliviando o transporte de carga e libertando-as para atividades que não exigem tanto esforço físico e que sejam de maior valor nas empresas, otimizando-se a produção. O seu percurso é predefinido por uma linha preta, contudo o utilizador pode controlá-lo a partir da aplicação quando necessário. As suas funcionalidades são: seguir uma linha, identificar cruzamentos e seguir o percurso predefinido pelo utilizador através de *RFIDs*, para a segurança das entidades próximas o robô possui um sensor de obstáculos e um *buzzer* que permite evitar colisões e avisar o utilizador de que o robô está parado.

Relativamente aos conhecimentos e competências adquiridas pelo grupo, destaca-se conhecimentos na parte de controlo e *software*, e na parte de eletrónica de potência. Deste modo, foi possível trabalhar com vários módulos e o estudo de diversas ferramentas para implementar o objetivo final do grupo. É assim necessário um espírito crítico por parte de todos os elementos para decidir os melhores componentes e o melhor caminho a utilizar. Desta forma, foi possível constatar que a implementação de novos módulos não requer um conhecimento aprofundado sobre o mesmo, mas sim uma visão geral e saber como implementar a sua biblioteca.

Para este desenvolvimento, foi necessário projetar os elementos mecânicos e os eletrónicos, assim prosseguiu-se às simulações para as bobinas do carregamento, ao desenvolvimento do controlador PID e do módulo RFID. Face a isto, foram tomadas decisões funcionais e construtivas em relação ao desenvolvimento do protótipo e consequentemente iniciou-se a construção do mesmo.

De forma a serem validadas todas as soluções propostas, efetuaram-se simulações e ensaios de tudo realizado para o desenvolvimento do projeto. No que respeita a questões de segurança e especificações técnicas procedeu-se à elaboração de um manual de utilização do protótipo.

Um dos desafios consistiu na elaboração de um controlador PID. A inexperiência, inicialmente, fez com que o processo de corrigir as oscilações fosse demorado e de diversas tentativas, tendo os ajustes sido

feitos numa perspetiva de tentativa e erro. Posto isto, com a prática adquiriram-se mais competências no que se refere a esta atividade.

Para além do que foi dito, tiveram de ser ultrapassadas algumas adversidades no que toca ao posicionamento do sensor seguidor de linha, tendo de ser colocado na frente do JIGA 8.0, em vez de se encontrar situado no meio do mesmo.

Não obstante, o manuseamento da tecnologia RFID com *tags*, devido nunca ter havido contacto com a mesma, revelou-se difícil em detetar as tags, devido a serem pequenas. Verificou-se ainda dificuldades em encontrar uma biblioteca do módulo RC522 que fosse compatível com o microcontrolador usado, STM32F7ZI.

No que concerne à exploração de conhecimentos anteriormente adquiridos nas UC, as que se mostraram mais relevantes na elaboração do protótipo foram a própria cadeira Projeto Integrador em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores 2 e Eletrónica de Potência. Relativamente a PIEEEIC 2 enaltece-se o uso da placa STM32, sendo fundamental para uma maior proximidade com as potencialidades, bem como as funcionalidades, permitindo o controlo total do robô, tal como a sua movimentação, derivando dos conhecimentos lecionados nesta UC.

No que se refere a Eletrónica de Potência, este possuiu um papel importante para a elaboração do carregamento sem fios, sendo este uma peça fundamental para a automatização de processos dentro de uma fábrica visto que, o robô ao ser capaz de carregar sem a necessidade da ajuda de um operador facilita em grande parte todos os processos. Sendo o carregamento sem fios um mecanismo de fácil utilização, garante uma fácil adaptação a qualquer tipo de indústria, visto que se trata de um equipamento *user-friendly*.

Devido à complexidade e exatidão de parâmetros necessários, o carregamento sem fios apresentou vários desafios novos ao longo do seu desenvolvimento, desde pequenos erros causados pela fadiga a tentativas de apressar processos de testes levando à danificação de componentes. Erros que ficaram registados e ajudaram na evolução como profissionais e futuros engenheiros.

O objetivo do projeto foi conseguido. Relativamente à construção mecânica, foi possível elaborar todas as estruturas necessárias e, que tinham sido previstas. Contudo, no decorrer dos ensaios experimentais evidenciaram-se falhas, nomeadamente no controlo PID e no uso do módulo RFID, que foram sendo progressivamente ultrapassadas. Relativamente ao carregamento sem fios, evidenciaram-se igualmente alguns percalços, mas foram igualmente superados.

## 8.2 Trabalhos futuros

Após a conclusão deste projeto, com um balanço positivo, surgem ainda algumas sugestões de trabalho futuro, de modo a colmatar algumas questões em aberto, cuja execução não foi viável, que são apresentadas neste subcapítulo.

Existe uma potencialidade de melhoria e com funcionalidades acrescidas para este projeto, que não foram implementadas. Para um funcionamento mais seguro e melhor, sugerem-se as seguintes aplicações:

- Utilizar uma câmara conectada à aplicação, de forma a visualizar os movimentos que o robô executa;
- Localizar o JIGA 8.0, recorrendo ao sistema de posição do mesmo;
- Sensor de bateria capaz de dotar o robô com inteligência artificial, de modo a ir ter ao posto de carregamento;
- Desenvolver um sistema luminoso, capaz de informar os utilizadores acerca do modo de operação do robô;
- Deve-se fazer cumprir as normas de certificação *Qi*, pois o carregamento sem fios não cumpre todos os requisitos para essa certificação e a possível comercialização;
- Adicionar inteligência artificial ao robô de forma tornar a navegação do mesmo mais eficiente.

Sendo o tema do projeto um robô industrial, as possibilidades de melhoria são enormes e somente dependentes da criatividade dos criadores, tendo em conta as potencialidades de um mundo digital em crescimento.

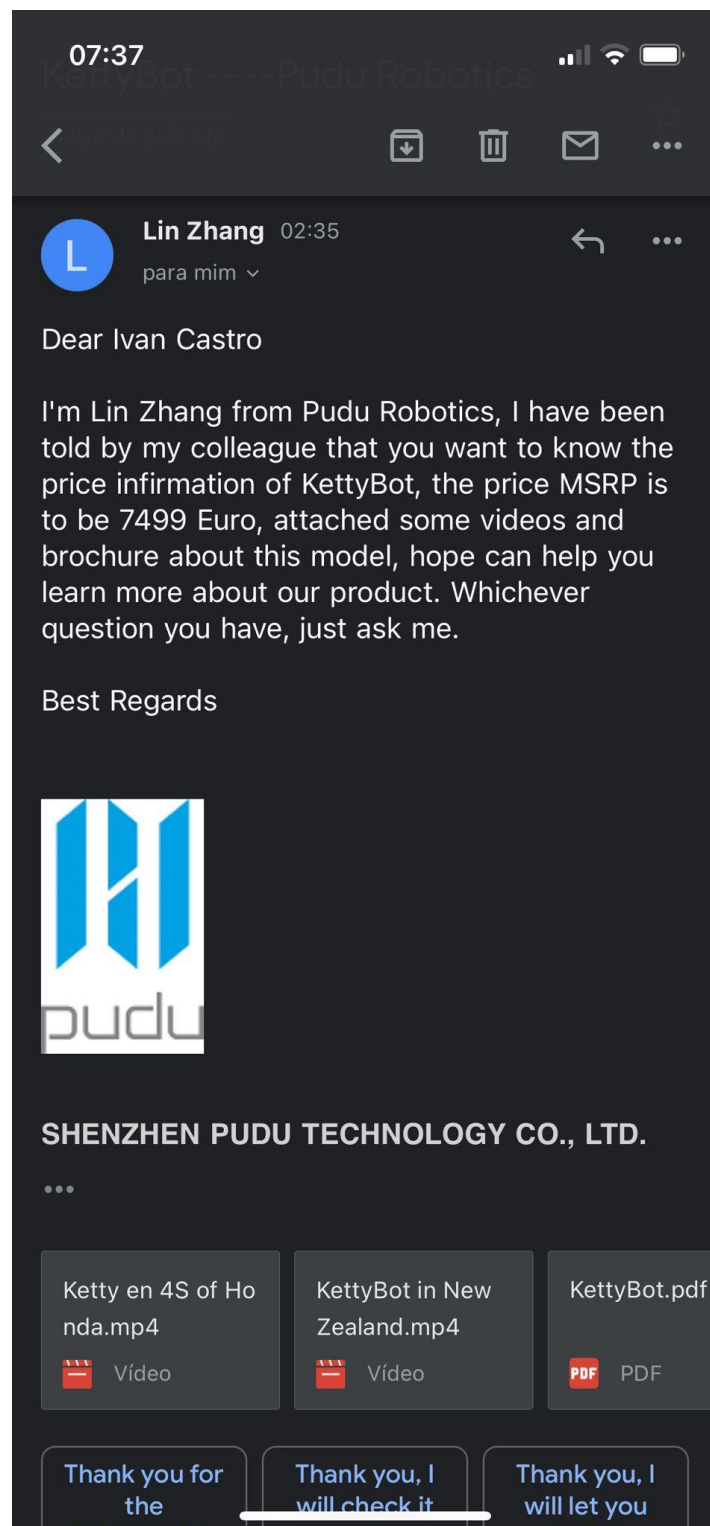
## 9.Referências

- [1] Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. New York: Productivity Press.
- [2] Ambadipudi, A., Heineke, K., Kampshoff, P., & Shao, E. (2017). Gauging the disruptive power of robo-taxis in autonomous driving. In *Automotive & Assembly*.
- [3] Knight, Will. "At Amazon Warehouses, Humans and Machines Work in Frenetic Harmony." MIT Technology Review, MIT Technology Review, 21 Mar. 2016, [www.technologyreview.com/s/538601/inside-amazons-warehouse-human-robot-symbiosis](http://www.technologyreview.com/s/538601/inside-amazons-warehouse-human-robot-symbiosis)
- [4] *GitHub Entrepresie (n.d)*, Retrieved march 2022 from <https://github.com/erazemk/stmrfid>
- [5] Ortiz, O., & Sasse, F. D. (2003). Contração de Lorentz, lei de Gauss e lei de Ampère. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25, 278-281.
- [6] DE LIMA, D. S. (2020). *ENSINO DE FÍSICA POR INVESTIGAÇÃO: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DA LEI DE FARADAY* (Doctoral dissertation, Universidade Federal do Para).
- [7] *All about circuits (n.d.)*, Retrieved may 2022, from <https://www.allaboutcircuits.com/>
- [8] *PowerStream – Wire Gauge and Current Limits Including Skin Depth and Strength (n.d.)*, Retrieved may 2022, [https://www.powerstream.com/Wire\\_Size.htm](https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm)
- [9] *Infineon - 6th Generation CoolSiC™ (n.d.)*, Retrieved march 2022 from [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IDH08G65C6-DS-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4625cc9456a015cd477f0d32dce](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IDH08G65C6-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4625cc9456a015cd477f0d32dce)
- [10] Aguiar, F. C. M. B. D. (2014). *Uma metodologia para aplicação da marcação CE em máquinas* (Doctoral dissertation).

- [11] *Certif – Associação para a certificação (n.d.)*, Retrieved february 2022, from <http://www.certif.pt/>
- [12] Smith, C. A. (2007). Failure analysis of electronic components and interconnection systems. *Circuit World*.
- [13] Szumanowski, A., & Chang, Y. (2008). Battery management system based on battery nonlinear dynamics modeling. *IEEE transactions on vehicular technology*, 57(3), 1425-143

## 10.Anexos

### Anexo I: Email da Empresa PUDU



## Anexo II: Diagrama de blocos do JIGA 8.0.

### BLOCK DIAGRAM

The purpose of this diagram is to give the viewer a basic understanding of how the various blocks interact, in order to make the cargo robot (JIGA 8.0) move.

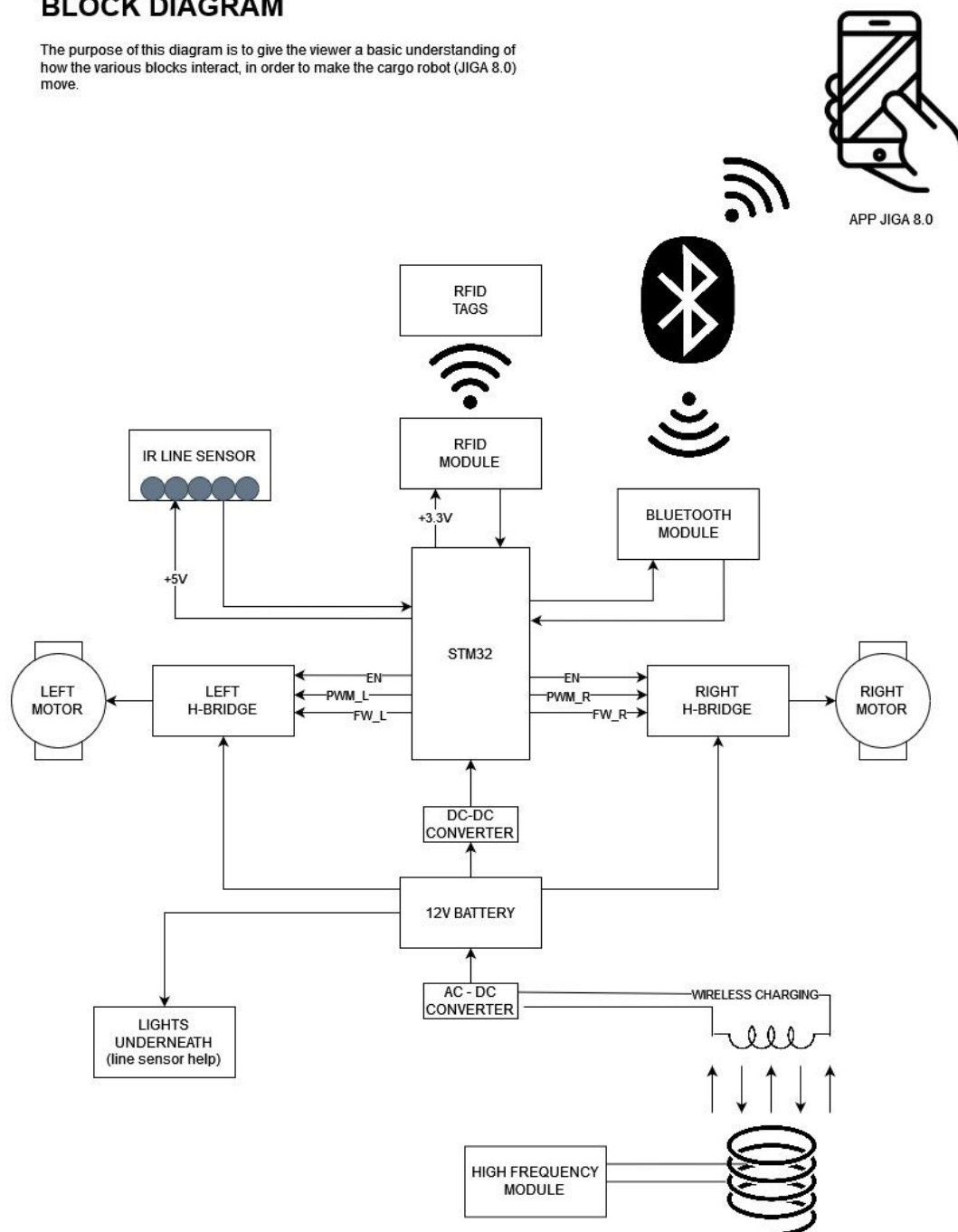


Figura 66: Diagrama de blocos do JIGA 8.0.