



Desenvolvimento de um AGV para Tarefas Industriais

BRUNO SANTOS BORGES

julho de 2020

Desenvolvimento de um AGV para Tarefas Industriais

Bruno Santos Borges



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2020

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Bruno Santos Borges, N° 1150611, 1150611@isep.ipp.pt
Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt
Empresa: Gislotica - Projeto e fabrico de sistemas mecânicos Lda
Supervisão: Pedro Nunes, pedro.nunes@gislotica.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

27 de Julho de 2020

Agradecimentos

À Gislotica, pela oportunidade de realizar este projeto e aos seus colaboradores pelo apoio e disponibilidade.

Um agradecimento especial ao Pedro e ao Michel que foram ambos peças fundamentais para o sucesso de projeto. Sem a colaboração, paciência e disponibilidade deles nada disto tinha sido possível.

Ao meu orientador do ISEP, Engenheiro Manuel Silva, por toda a orientação científica e ajuda que me deu ao longo do projeto. O meu sincero agradecimento por toda a disponibilidade e sugestões fundamentais à realização do projeto.

À minha namorada, Mariana, a quem devo um agradecimento especial por toda a paciência e apoio incondicional. Do fundo do coração, não existiu melhor pessoa para partilhar este percurso.

Ao meu irmão, Filipe, que me ajudou sempre a encarar todas as situações da melhor forma, por me ensinar grande parte do que sei e por estar sempre disponível para me apoiar em todos os momentos.

Aos meus pais, que me deram todas as ferramentas possíveis para atingir o sucesso, e sem as quais nunca chegaria onde cheguei e penso chegar.

Resumo

O interesse por veículos autônomos tem uma história que data à mais de meio século atrás. Este interesse, juntamente com os constantes avanços tecnológicos verificados em diversas áreas, levou a que atualmente diversas indústrias possuam veículos deste tipo, podendo estes “navegar” com recurso a vários métodos. Devido aos seus ambientes variáveis, muitas aplicações requerem uma constante necessidade de adaptação do movimento, levando à adoção de um método de navegação em particular - sistema de navegação natural.

Posto isto, este projeto foca-se no desenvolvimento de um protótipo de AGV que navegue com um sistema deste tipo. Pretende-se que o produto desenvolvido seja a base para a integração de um (ou mais) AGV em aplicações industriais concebidas pela empresa - Gislotica. Esta é uma empresa de engenharia especializada no estudo e desenvolvimento de projetos que vão desde a logística (estudos de fluxos) às máquinas especiais.

Numa fase inicial, foi modelado o veículo em questão, com base nas características pretendidas para o mesmo. Este passo, permitiu estabelecer quais os requisitos necessários como, por exemplo, potência e binário, por forma a que sejam cumpridas as características pretendidas.

Obtidas as características e especificações, tornou-se possível a análise de soluções, onde foram estudadas as partes integrantes do veículo (motores, sensores, entre outras). Em termos de controlador do sistema, ou seja onde é realizado todo o processamento do algoritmo de navegação, a escolha recaiu sobre uma solução fornecida pela BlueBotics - ANT lite+. Este componente foi a base da arquitetura desenvolvida onde, salvo algumas exceções, as restantes partes integrantes devem providenciar a informação necessária ao seu bom funcionamento.

A implementação recaiu inicialmente pela montagem do protótipo, onde foi desenvolvida a sua estrutura mecânica e ainda feitas as ligações elétricas necessárias, baseadas na arquitetura do sistema. Posto isto, foi desenvolvida a programação/configuração de todas as partes integrantes, desde o PLC, PLC de segurança, motores, sensores, até ao ANT lite+.

Por fim, foram definidos e realizados um conjunto de testes, com objetivo de validar a solução e perspetivar algumas melhorias futuras. Estes compreenderam uma avaliação à segurança do sistema, desempenho em termos de movimento, análise ao ANT lite+, entre outros.

Palavras-Chave: AGV, protótipo, sistema de navegação natural, requisitos do sistema, análise de soluções, ANT lite+, validação.

Abstract

The interest in autonomous vehicles has a history that dates back more than half a century ago. This interest, together with the constant technological advances in several areas, has led to the fact that currently, several industries have vehicles of this type, which can “navigate” using various methods. Many applications require a constant need for adaptation, due to variable environments, leading to the adoption of a particular navigation method - natural navigation system.

That said, this project focuses on the development of an AGV prototype that navigates naturally, being presented and described the steps that comprise its implementation. It's intended that the developed is the basis for the integration of one (or more) AGV in industrial applications designed by the company - Gislotica. This is an engineering company specialized in studies and project development, ranging from logistics studies to special machines.

In an initial phase, the vehicle in question was modeled, based on the characteristics intended for it. This step allowed to establish the requirements, such as power and torque, so that the desired characteristics are met.

Once the characteristics and specifications were obtained, the analysis of solutions became possible, where the integral parts of the vehicle (motors, sensors, etc.) were studied, highlighting some of those present in the market. In terms of the system controller, that is, where all the processing of the navigation algorithm is performed, the choice fell on a solution provided by BlueBotics - ANT lite +. This component was the basis of the developed architecture, where (with some exceptions), all the integral parts are connected to provide ANT lite+ with the information necessary for its proper functioning.

The implementation initially fell to the assembly of the prototype, where it's mechanical structure was developed and the necessary electrical connections were made, based on the architecture of the system. That said, programming/configuration of all integral parts was developed, from the PLC, safety PLC, motors, sensors, to ANT lite +.

Finally, a set of tests were defined and performed to validate the solution and envisage some future improvements. These included an assessment of system security, performance in terms of movement, analysis of ANT lite +, among others.

Keywords: AGV, prototype, natural navigation system, system requirements, solution analysis, ANT lite +, validation.

Índice

Agradecimentos	v
Índice	xi
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxi
Acrónimos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Calendarização	3
1.5 Organização da Dissertação	5
2 <i>Automated Guided Vehicles</i>	7
2.1 História dos AGV	7
2.2 Tipos de AGV	9
2.2.1 Empilhadores Automáticos	9
2.2.2 <i>Piggyback</i> AGV	10
2.2.3 AGV Reboque	11
2.2.4 <i>Underride</i> AGV	12
2.2.5 <i>Assembly</i> AGV	12
2.2.6 AGV de Grande Carga	13
2.2.7 AGV a Diesel	14
2.3 Sistemas de Controlo	14
2.3.1 Conexão entre Sistemas	14
2.3.2 Módulo do Sistema de Controlo do AGV	16

2.4	Métodos de Navegação	17
2.4.1	Navegação Fixa	17
2.4.2	Navegação Dinâmica	18
2.5	Sistemas de Controlo de Direção	21
2.6	Carregamento	21
2.6.1	Métodos de Carregamento	22
2.6.2	Esquemas de Carregamento	22
2.7	Segurança	24
3	Sistema de Navegação Natural	25
3.1	Sistema de Navegação Natural	25
3.2	Mapeamento do Ambiente	26
3.2.1	LiDAR	26
3.2.2	Sonar	28
3.2.3	Navegação Guiada por Visão	29
3.3	Estratégias de Estimativa de Posição	31
3.3.1	<i>Scan-to-Scan</i>	32
3.3.2	<i>Scan-to-Map</i>	33
3.3.3	Abordagem Integrada	35
3.4	Filtro de Kalman	35
3.5	Vantagens e Desvantagens	42
4	Análise de Requisitos e Soluções	43
4.1	Requisitos do Sistema	43
4.1.1	Caraterísticas Pretendidas	43
4.1.2	Cinemática	45
4.1.3	Dimensionamento de Implementação Futura	46
4.1.4	Dimensionamento do Protótipo	49
4.2	BlueBotics	50
4.2.1	ANT localization	51
4.2.2	ANT lite+	52
4.2.3	Solução Adotada	53
4.3	Sensores de Mapeamento	53
4.3.1	Sensor Laser	54
4.3.2	Sensor Laser de Segurança	54
4.4	Motores	55
4.4.1	Motores CC	56
4.4.2	Motores CA	57
4.4.3	Motores Passo-a-Passo	58
4.4.4	Resumo de caraterísticas	59
4.5	Sistemas de Carregamento	59
4.5.1	Baterias	60

4.5.2	Método de Carregamento	61
4.6	Soluções de Software	62
4.6.1	SEW-Eurodrive	62
4.6.2	Navitec	63
4.6.3	Kollmorgen	63
4.6.4	Wewo Techmotion	64
4.7	Solução Alternativa - Fornecedor	64
5	Arquitetura do Sistema	67
5.1	Arquitetura Geral	67
5.2	Interligação com Sensores	69
5.3	Controlo de Movimento	71
5.3.1	Motor	71
5.3.2	Caixa Redutora	75
5.3.3	Interligação com o ANT lite+	77
5.4	Sistema de Segurança	78
5.4.1	Normas de Segurança	78
5.4.2	SICK Flexisoft	81
5.4.3	Considerações Futuras	82
5.5	Integração com Periféricos	83
5.6	Dimensionamento, Método e Esquema de Carregamento das Baterias	84
5.6.1	Protótipo	85
5.6.2	Implementação Futura	86
5.7	Lista de Componentes	88
6	Implementação Prática	89
6.1	Estrutura Elétrica	89
6.1.1	Estrutura Geral	89
6.1.2	Alimentação e Aparelhagem de Proteção	91
6.2	Montagem dos Componentes	92
6.2.1	Posicionamento dos Sensores	93
6.2.2	Montagem dos Motores	94
6.2.3	Suporte para a Eletrónica	95
6.3	Configuração dos Sensores	95
6.3.1	Cálculo da Área de Proteção	96
6.3.2	Configurações Iniciais	98
6.3.3	Definição dos Casos de Monitorização	99
6.3.4	Comutação entre Casos de Monitorização	101
6.4	Configuração do PLC de Segurança (FlexiSoft)	102
6.4.1	Integração dos Módulos	102
6.4.2	Paragem de Emergência	103
6.4.3	Lógica de Comutação de Casos - Modo Aviso	104

6.5	Integração Motores - ANT lite+	104
6.5.1	Configuração dos Motores	105
6.5.2	Instruções de Comunicação	106
6.5.3	Integração com o ANT lite+	107
6.5.4	Processo de Funcionamento	108
6.6	Configuração de Periféricos	109
6.6.1	Sinalizador Luminoso e Buzzer	109
6.6.2	HMI	110
6.7	Configuração ANT lite+	112
6.7.1	Considerações Iniciais	113
6.7.2	Pré-Integração	113
6.7.3	Integração Avançada	115
6.7.4	Construção do Mapa	119
6.7.5	Definição de Rotas	120
7	Testes ao Protótipo	123
7.1	Testes Propostos	123
7.2	Segurança	124
7.2.1	Validação das Áreas de Proteção	124
7.2.2	Acionamento dos Botões de Emergência	124
7.2.3	Redução da Velocidade - Modo de Aviso	125
7.2.4	Sinalizador Luminoso e Buzzer	126
7.3	Movimento	127
7.3.1	Comportamento dos Motores	127
7.3.2	Estabilidade do Veículo	129
7.4	HMI	130
7.5	Bluebotics	132
7.5.1	Movimento com o Joystick	133
7.5.2	Teste à Odometria	133
7.5.3	Avaliação da Navegação Natural	134
8	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	137
8.1	Conclusões	137
8.2	Desenvolvimentos Futuros	140
	Referências Bibliográficas	141
	A Anexo A - Valores do Coeficiente de Resistência ao Rolamento	149
	B Documento Excel para Obtenção das Características do Veículo	151
	C Proposta Alternativa	153

D	Descrição do Protocolo EFI-pro	155
E	Lista de Componentes do AGV	157
F	Esquema Elétrico - EPLAN	159
G	Estrutura Mecânica do Protótipo de AGV	171
H	Modos de Funcionamento do MAC402-D5	173
I	Modo de Aviso - Descrição do Funcionamento	175
J	Descrição das AOI Fornecidas pela JVL	179
K	Avaliação do Comportamento dos Motores	181

Índice de Figuras

1.1	Gráfico de Gantt com o plano de trabalhos	4
2.1	Primeiro AGV - Barrett Electronics Corporation [1]	8
2.2	Panorama atual e expectativa de crescimento dos AGV até 2024 [5]	9
2.3	Toyota BT Staxio SAE160 [6]	10
2.4	<i>Piggyback</i> AGV [1]	11
2.5	AGV reboque - Savant Automation [8]	11
2.6	<i>Underride</i> AGV [1]	12
2.7	<i>Assembly</i> AGV - Mercedes Benz [9]	13
2.8	Transporte de retro-escavadora com recurso a um AGV [10]	13
2.9	VLD Diesel AGV [11]	14
2.10	Sistema de controlo de AGV e respetivas interligações	15
2.11	Funções do sistema de controlo do AGV	16
2.12	Navegação indutiva [4]	17
2.13	Navegação ótica [14]	18
2.14	Navegação através de marcadores magnéticos [15]	19
2.15	Navegação com laser [16]	19
2.16	Navegação natural [4]	20
2.17	Sistemas de controlo de direção AGV [17]	21
3.1	Exemplo de LiDAR [26]	27
3.2	Exemplo de mapeamento com recurso a um LiDAR [27]	27
3.3	Exemplo de sonar - MaxBotix EZ-1 [28]	28
3.4	Funcionamento de um sonar [29]	28
3.5	Reflexão especular [31]	29
3.6	Exemplo de visão computacional [34]	30
3.7	Estratégias de estimativa de posição dos AGV [24]	31
3.8	Processo do <i>scan-to-scan</i> [38]	32
3.9	Processo do <i>scan-to-map</i> [38]	34

3.10	Fluxograma do funcionamento do KF	37
3.11	Efeitos de uma não linearidade na função Gaussiana [42]	38
3.12	Efeitos da aplicação da série de Taylor na linearização de função Gaussiana [42]	39
3.13	Posição do veículo ao longo do tempo - odometria [44]	41
3.14	Posição do veículo ao longo do tempo - odometria com EKF [44]	41
4.1	Esboço inicial do AGV	44
4.2	Cinemática diferencial	45
4.3	Diagrama de forças do veículo	47
4.4	Comparação entre sistemas de navegação [46]	50
4.5	Soluções ANT da BlueBotics [46]	51
4.6	Componentes do veículo - ANT localization [46]	51
4.7	Componentes do veículo - ANT lite+ [46]	52
4.8	Campos de proteção de sensores de segurança [48]	55
4.9	Tipos de motores elétricos	56
4.10	Diagrama de blocos da solução alternativa	65
5.1	Diagrama da interligação entre módulos da BlueBotics	68
5.2	Diagrama de blocos da arquitetura geral do sistema	68
5.3	Sensor de segurança - SICK microScan3	69
5.4	Interligação ANT lite+ com os sensores	70
5.5	Estrutura do servomotor MAC402-D5 [64]	72
5.6	Binário em função da velocidade [66]	73
5.7	Interligação dos motores com o ANT lite+ - PLC <i>mode</i>	78
5.8	Determinação do fator PL - baseado em [67]	79
5.9	Arquitetura do sistema de segurança	82
5.10	Interligação do PLC com periféricos	83
5.11	Sinalizador luminoso [71]	84
5.12	<i>Buzzer</i> 855T-B24SA1 [72]	84
5.13	Baterias de lítio - ZENIT [74]	87
5.14	Sistema de carregamento VAHLE [75]	88
6.1	Esquemático da estrutura geral do sistema	90
6.2	Esquema elétrico - alimentação	91
6.3	Esquema elétrico - aparelhagem de proteção	92
6.4	Estrutura mecânica - desenho CAD	93
6.5	Posicionamento dos <i>scanners</i>	94
6.6	Estrutura mecânica dos motores	95
6.7	Suporte para a eletrônica	95
6.8	Distância de reação e travagem	97
6.9	Configurações microScan3	98

6.10	Criação das áreas de proteção e aviso	100
6.11	Troca de informação para seleção do caso de monitorização	101
6.12	Integração dos módulos do FlexiSoft	102
6.13	Fluxograma da paragem de emergência	103
6.14	MacTalk - configurações e monitorização	105
6.15	AOI disponíveis no PLC	106
6.16	Fluxograma do funcionamento dos motores	108
6.17	Fluxograma - luz vermelha	109
6.18	Fluxograma - luz amarela	109
6.19	Fluxograma - luz verde	110
6.20	Fluxograma - <i>buzzer</i>	110
6.21	HMI do AGV	111
6.22	HMI - modo manual	112
6.23	HMI - modo ANT	112
6.24	Parâmetros da odometria do veículo	114
6.25	Representação dos dados dos sensores	114
6.26	Forma do veículo no ANT lab	116
6.27	Representação das <i>Hull areas</i>	117
6.28	Definição de parâmetros do movimento	117
6.29	Procedimento de calibração [47]	118
6.30	Mapeamento inicial do ambiente	119
6.31	Mapa utilizado pós-tratamento	120
6.32	Definição das rotas	121
7.1	Primeiro teste ao Modo de Aviso	125
7.2	Segundo teste ao Modo de Aviso	126
7.3	Desnível na roda omnidirecional	129
7.4	Avaliação do desnível do piso	130
7.5	HMI - exemplo 1	131
7.6	HMI - exemplo 2	132
7.7	Marcação da posição inicial	133
7.8	Marcação da posição final	133
7.9	Velocidade alvo <i>vs.</i> velocidade atual	134
7.10	Nós alvo do teste de precisão	135
B.1	Documento Excel desenvolvido - características	151
B.2	Documento Excel desenvolvido - cálculos	152
D.1	Conceito do protocolo EFI-pro [63]	155
G.1	Estrutura mecânica - perspetiva lateral	171
G.2	Estrutura mecânica - perspetiva frontal	171
G.3	Estrutura mecânica - perspetiva topo	172

I.1	Fluxograma da lógica de comutação - sensor no sentido do movimento	176
K.1	Teste 1 0,3 m/s - velocidade	181
K.2	Teste 1 0,3 m/s - binário	182
K.3	Teste 2 0,3 m/s - velocidade	182
K.4	Teste 2 0,3 m/s - binário	182
K.5	Teste 3 0,3 m/s - velocidade	183
K.6	Teste 3 0,3 m/s - binário	183
K.7	Teste 1 0,6 m/s - velocidade	183
K.8	Teste 1 0,6 m/s - binário	184
K.9	Teste 2 0,6 m/s - velocidade	184
K.10	Teste 2 0,6 m/s - binário	184
K.11	Teste 3 0,6 m/s - velocidade	185
K.12	Teste 3 0,6 m/s - binário	185
K.13	Teste 1 0,9 m/s - velocidade	185
K.14	Teste 1 0,9 m/s - binário	186
K.15	Teste 2 0,9 m/s - velocidade	186
K.16	Teste 2 0,9 m/s - binário	186
K.17	Teste 3 0,9 m/s - velocidade	187
K.18	Teste 3 0,9 m/s - binário	187
K.19	Teste 1 1,2 m/s - velocidade	187
K.20	Teste 1 1,2 m/s - binário	188
K.21	Teste 2 1,2 m/s - velocidade	188
K.22	Teste 2 1,2 m/s - binário	188
K.23	Teste 3 1,2 m/s - velocidade	189
K.24	Teste 3 1,2 m/s - binário	189

Índice de Tabelas

3.1	Vantagens e desvantagens dos sistemas de navegação natural	42
4.1	Características pretendidas para o AGV	44
4.2	Resultados da modelação efetuada	49
4.3	Características do protótipo	49
4.4	Resultados da modelação efetuada - protótipo	50
4.5	Sensores sem mecanismos de segurança compatíveis com ANT lite + [47]	54
4.6	Sensores de segurança compatíveis com ANT lite + [47]	55
4.7	Resumo de características dos motores elétricos	59
4.8	Resumo de características das baterias - baseado em [53] e [4]	60
4.9	Comparação entre métodos de carregamento - baseado em [57]	62
5.1	Principais características do sensor SICK microScan3 [62]	70
5.2	Características do MAC402-D5 - baseado em [65]	73
5.3	Características e resultados posteriores ao arranque	75
5.4	Possíveis valores para a razão de engrenagem	76
5.5	Análise binário/velocidade/potência com e sem aceleração	77
5.6	Fator de segurança binário/potência	77
5.7	Avaliação do PL - baseado em [67]	79
5.8	Requisitos para componentes de segurança - baseado em [21]	80
5.9	Bateria Gel Trojan 27-GEL [73]	86
6.1	Possíveis configurações dos sensores	93
6.2	Áreas de proteção e aviso	99
6.3	Casos de monitorização definidos	100
6.4	Lógica de decisão entre casos de monitorização	101
6.5	Bloco de dados para controlo dos motores	107
6.6	Validação da configuração do veículo	115

7.1	Teste às áreas de proteção do AGV	124
7.2	Teste ao movimento - 1,2 m/s	127
7.3	Teste ao movimento - 0,9 m/s	128
7.4	Teste ao movimento - 0,6 m/s	128
7.5	Teste ao movimento - 0,3 m/s	128
7.6	Potência mecânica para as diversas velocidades	128
7.7	Avaliação das funcionalidades gerais da HMI	131
7.8	Avaliação da precisão da navegação natural	135
7.9	Avaliação da precisão da navegação natural - desvios	135
A.1	Coefficientes de resistência do rolamento - baseados em [53] e [78]	149
C.1	Proposta por fornecedor alternativo	153
E.1	Lista de componentes do AGV	158

Acrónimos

Acrónimo	Descrição	Página
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>	1
ANT	<i>Autonomous Navigation Technology</i>	50
AOI	<i>Add On Instruction</i>	106
EKF	<i>Extended Kalman filter</i>	20
CA	Corrente alternada	55
CC	Corrente contínua	55
CIP	<i>Common Industrial Protocol</i>	71
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>	??
E/S	Entradas/Saídas	52
EFI-pro	<i>Enhanced Function Interface Pro</i>	71
EVB	<i>Electric Vehicle Batteries</i>	22
HMI	<i>Human Machine Interface</i>	83
ICP	<i>Iterative Closest Point</i>	32
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto	2
KF	<i>Kalman Filter</i>	35
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>	20
NF	Normalmente Fechado	91
PL	<i>Performance Level</i>	78
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>	51
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>	20
SNN	<i>Safety Network Number</i>	98

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é feita uma contextualização acerca do projeto realizado, realçando a sua motivação e aplicabilidade para a empresa em questão. É ainda apresentada a calendarização e a organização da dissertação.

1.1 Contextualização

Numa altura em que o desenvolvimento tecnológico é verificado em todos os níveis, a necessidade de inovação e adaptação é cada vez mais recorrente. Em diversas indústrias, esta inovação passa pela utilização de veículos autónomos, que não requeiram qualquer tipo de intervenção humana para cumprir a sua missão. Estes veículos são definidos como *Automated Guided Vehicles* (AGV), sistemas capazes de efetuarem o seu movimento de forma autónoma.

O primeiro veículo deste tipo surgiu à mais de 65 anos atrás, e tinha como princípio de funcionamento o seguimento de um fio elétrico condutor, montado na superfície fabril. Este método, apesar de inovador na altura, possuía algumas limitações como a não adaptabilidade ao ambiente, o que pode ser limitativo em certas aplicações. Também a sua instalação era mais difícil e exigia uma manutenção permanente, tudo fatores que contribuía para o custo final acrescido do produto.

Apesar disto, os constantes desenvolvimentos neste ramo tornaram os AGV numa solução que pode ser encontrada em quase todo o tipo de indústrias e aplicações. A sua flexibilidade foi bastante aumentada, a fiabilidade melhorada e ainda, devido à evolução nos ramos das baterias, o seu tempo de funcionamento prolongado. Em comparação com sistemas manuais, tornaram-se mais seguros, reduziram os danos ao material a carregar, não necessitam de operadores e trabalham continuamente e de forma mais durável. Tudo isto, em conjunto com

mais alguns fatores não referidos, justificam a crescente aposta nesta espécie de sistemas.

Atualmente, muitas unidades fabris possuem características variáveis no seu ambiente (caixas, paletes de produtos, etc.), obrigando nestes casos à necessidade de adaptação constante do movimento. Conjugando um AGV com um sistema que permita a adaptação da sua trajetória ao ambiente, um sistema de navegação natural, é possível superar este entrave. Alcança-se assim um veículo, capaz de tomar decisões próprias e que oferece uma fácil adaptação a novos ambientes e aplicações.

Com base na contextualização feita, o projeto proposto enquadra-se no âmbito da Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e surge da necessidade da Gislotica, uma empresa especializada no desenvolvimento de máquinas industriais, em implementar um protótipo de um AGV com um sistema de navegação natural.

Foi elaborada uma análise das diversas soluções existentes do mercado, comparando e seleccionando a mais adequada. Posteriormente foi desenvolvida uma arquitetura do sistema, que serve como base para a implementação prática, onde são efetuadas todas as configurações e ajustes necessários para que o veículo funcione dentro das especificações, de forma autónoma e segura.

A construção deste protótipo serviu como ponto de partida para implementações futuras, onde se visiona a integração de um (ou mais) AGV com sistema de navegação natural em determinadas aplicações, atingindo a meta principal - evolução no desempenho do processo produtivo.

1.2 Motivação

Este projeto nasceu da vontade da empresa em modernizar algumas das suas soluções, recorrendo a uma tecnologia cada vez mais emergente nos mercados, os veículos autónomos. A sua inclusão visa determinadas aplicações industriais, tornando-as mais rápidas e eficientes. Para isso, a solução encontrada consistiu na integração dum AGV que se movesse com um sistema de navegação natural, onde se adaptaria com facilidade ao ambiente fabril onde irá operar.

Tem-se em vista que o protótipo desenvolvido sirva como base para implementações futuras, sendo utilizado para efeitos de teste e validação. O veículo possui características (velocidade máxima, carga suportada, inclinação máxima, entre outras) que lhe conferem uma robustez suficiente para ser utilizado em diversas situações.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste projeto consiste no desenvolvimento dum protótipo de AGV que utilize um sistema de navegação natural para efetuar o seu movimento. Como se trata de um projeto começado de “raiz”, surgiu a necessidade da definição de alguns objetivos adjacentes ao principal:

- contextualização sobre os diferentes tipos de AGV, referindo a sua origem e projeções sobre o futuro da sua utilização;
- estudar os diversos componentes inerentes à utilização de um veículo deste tipo (baterias, sistemas carregamento, sensores utilizados, métodos de navegação, entre outros);
- explorar as características dum sistema de navegação natural, identificando os sensores passíveis de utilização, estratégias de estimativa de posição e as suas vantagens/desvantagens face a outros métodos;
- definir as características alvo do veículo a implementar e fazer a respetiva modelação com base nas mesmas;
- analisar as diversas soluções presentes no mercado para os principais componentes do AGV, justificando as opções tomadas em detrimento de outras;
- definir e detalhar a arquitetura do sistema, servindo esta como base para a implementação do mesmo;
- explicar todo o processo de implementação efetuado, desde a sua configuração até ao seu funcionamento;
- efetuar testes de validação e apresentar respetivos resultados.

É ainda pretendido que, no final do trabalho, o veículo se encontre preparado para, de maneira simples e rápida, ser adaptado às aplicações industriais em que se poderá vir a inserir.

1.4 Calendarização

O gráfico de Gantt ilustrado na Figura 1.1 tem como objetivo sumarizar o plano de trabalhos para este projeto.

1.5 Organização da Dissertação

No Capítulo 1 é feita uma contextualização do projeto em questão, realçando a motivação, principais objetivos, calendarização e organização do relatório.

Seguindo-se o Capítulo 2, é feito um levantamento relativo às tecnologias inerentes aos AGV, apresentando alguns dos tipos existentes. Também são explorados os diversos tipos de sistemas de controlo, métodos de navegação, controlo de direção, baterias, métodos e esquemas de carregamento utilizados nestes veículos.

No capítulo seguinte, 3, são analisados os diversos conceitos necessários à compreensão de um sistema de navegação natural, a utilizar na implementação prática. O seu conteúdo passa pela forma como é feito o mapeamento do ambiente, estratégias de estimativa de posição e ainda o filtro de Kalman, importante em sistemas deste tipo.

O quarto capítulo pretende apresentar as características pretendidas para o AGV e, com base nestas, fazer a sua modelação e apresentar as diversas soluções existentes no mercado. Esta análise servirá como base para a escolha dos componentes, detalhada aquando da apresentação da arquitetura do sistema. O capítulo termina apresentando uma solução alternativa à adotada, que foi estudada durante o processo de análise de soluções.

O próximo capítulo, Capítulo 5, apresenta a arquitetura do sistema implementado. Adicionalmente são justificadas as escolhas efetuadas para os seus principais componentes, com base no estudo anterior.

O Capítulo 6 demonstra todo o processo de implementação realizado. Inicia com a apresentação da estrutura mecânica e esquema elétrico do veículo, passando para a programação e configuração das diversas partes integrantes. Finaliza com o processo de integração do ANT lite+, da Bluebotics.

O penúltimo capítulo, Capítulo 7, apresenta os diversos testes efetuados ao protótipo. Serve como ponto de partida para a avaliação e validação da solução implementada, bem como base para perspetivar desenvolvimentos futuros.

Por fim, o Capítulo 8, onde são retiradas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e identificadas algumas propostas de melhorias.

Capítulo 2

Automated Guided Vehicles

No decorrer do presente capítulo é efetuado um levantamento bibliográfico das tecnologias inerentes aos AGV, iniciando com uma pequena contextualização das suas origens. De seguida são identificados alguns dos tipos de AGV existentes, sistemas de controlo, métodos de navegação, controlo de direção, baterias, métodos e esquemas de carregamento e terminando com algumas considerações sobre a segurança nestes veículos.

2.1 História dos AGV

À mais de 65 anos atrás, surgiu a ideia por parte de um inventor mecânico de substituir os motoristas de um reboque de tractor por um sistema de automação, que facilitasse o transporte de produtos dentro da fábrica. Foi assim introduzido numa fábrica de mercearias um veículo que era usado para puxar um atrelado, e cujo funcionamento consistia em seguir um fio elétrico condutor montado no chão. Este veículo, apresentado na Figura 2.1, foi pioneiro no que viria a ser um conceito amplamente desenvolvido e utilizado em diversas áreas na atualidade [1].

Este conceito surgiu com o nome de *Automated Guided Vehicle* (AGV), existindo atualmente diversas definições para o descrever. Uma definição geralmente aceite é a referida em [2], onde um AGV é classificado como “sistema de transporte sem condutor, utilizado para movimento de materiais”.

Com o tempo, maioritariamente fábricas e armazéns, começaram a adaptar as suas infraestruturas para a implementação destes veículos. Isto requereu a inserção de medidas de protecção, tais como marcações de piso e ainda uma educação dos trabalhadores do modo de funcionamento do sistema. Como seria de esperar, os AGV reduziram a mão de obra necessária o que levou a uma certa resistência por parte de grupos de trabalhadores que receavam perder os seus trabalhos. Se

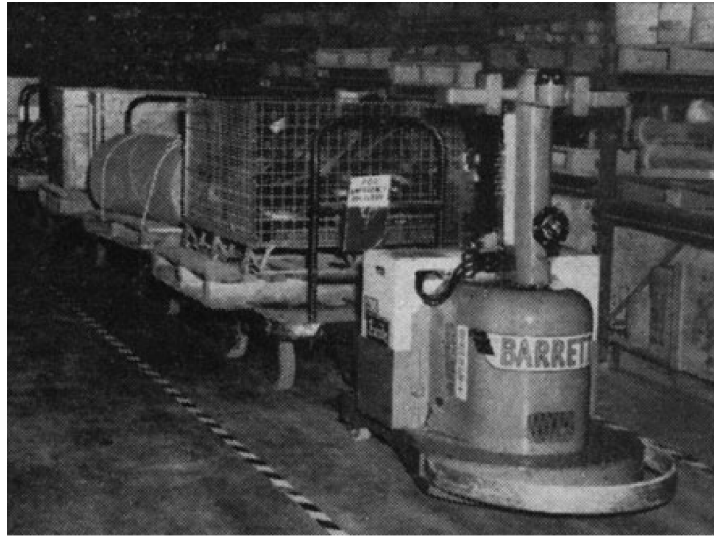


Figura 2.1: Primeiro AGV - Barrett Electronics Corporation [1]

esta perda por parte de trabalhadores que operavam em funções como condução de empilhadores ou carregamento manual de materiais se verificou, também existiu a criação de novos postos de trabalho relacionados com o fornecimento destes sistemas [1].

Desde a sua introdução, como referido, os AGV começaram a ser utilizados em grande parte das indústrias, sendo as suas normais restrições relacionadas com o material a transportar e o espaço disponível. As constantes evoluções tanto a nível de *hardware* como a nível de *software*, levaram a que estes começassem a ser uma alternativa viável a mecanismos tais como empilhadores e tapetes rolantes. Estes usualmente oferecem características que podem ser vantajosas, por exemplo oferecendo uma flexibilidade no que toca à alteração dos seus percursos, ocupando apenas um espaço por um tempo limitado, melhor eficiência e redução de danos durante o transporte. De salientar que, devido ao seu custo relativamente elevado, os AGV oferecem uma maior eficiência quando utilizados frequentemente, por exemplo num sistema de transporte coordenado entre diversos veículos [3].

No final dos anos 80, o investimento nestes equipamentos diminuiu devido aos seus elevados custos. O conceito de *Lean Manufacturing* foi introduzido, e utilizado por diversas indústrias, e visava a diminuição de desperdício e consequente criação de valor, o que levou a que existisse um desinvestimento neste tipo de tecnologia. Por isso, apenas no final dos anos 90, com o desenvolvimento tecnológico voltou a existir um maior investimento nos AGV que possuíam agora vantagens tais como uma melhor sensorização, navegação a laser e controlo através de um computador, oferecendo uma maior flexibilidade e fiabilidade do que os sistemas anteriores [4].

Até aos dias de hoje o mercado dos AGV continua numa evolução constante, muito devido à introdução de conceitos como a flexibilização dos sistemas de fabrico e a Indústria 4.0, onde as fábricas pretendem atingir uma maior qualidade e personalização do produto, num menor tempo e com o menor custo possível. A contínua procura dos AGV é visível nos dados estatísticos fornecidos na Figura 2.2, que representa o panorama atual e a expectativa de crescimento dos mesmos até 2024.

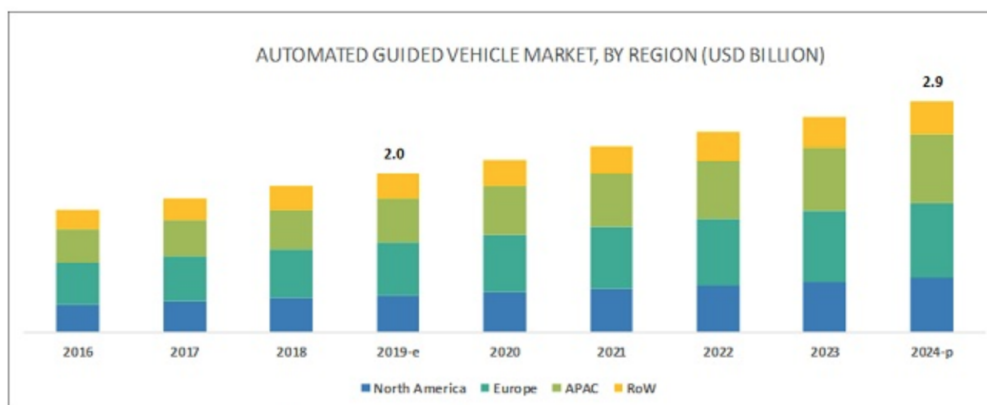


Figura 2.2: Panorama atual e expectativa de crescimento dos AGV até 2024 [5]

Esta perspectiva leva à previsão da constante evolução desta tecnologia, através do desenvolvimento tecnológico contínuo e do aparecimento de novos conceitos que vão permitir a sua participação cada vez mais recorrente nas indústrias em que esta se insere.

2.2 Tipos de AGV

Os AGV são frequentemente classificados como veículos autónomos utilizados para executar funções de, por exemplo, transporte de materiais e utilizados em armazéns, hospitais, fábricas, entre outros. No entanto, estes podem ter diversas formas e feitios, dependendo do tipo de aplicação em que se inserem. Com isto, nesta secção pretende-se contextualizar o leitor sobre alguns dos tipos de AGV existentes e as suas possíveis aplicações.

2.2.1 Empilhadores Automáticos

Um empilhador é uma máquina, conduzida por um operário, usualmente utilizada para carregar e descarregar mercadoria carregada em paletes. Com o objetivo de automatizar o processo de empilhamento foram criados empilhadores automáticos que consistem num AGV que, tal como o nome indica, realizam funções de carga e descarga de paletes, entre outras. Um exemplo deste tipo de AGV é o

desenvolvido pela Toyota, o Toyota BT Staxio SAE160 representado na Figura 2.3.



Figura 2.3: Toyota BT Staxio SAE160 [6]

Segundo a Toyota [6], o veículo encontra-se equipado com uma avançada tecnologia de navegação laser, que permite um posicionamento preciso do mesmo, e características de segurança de alto nível, tais como sensores de proximidade e de deteção de objetos acima do piso. Permite ainda a sua utilização como AGV único ou integrado num sistema de AGV em funcionamento simultâneo.

2.2.2 Piggyback AGV

Os *Piggyback* (Figura 2.4) AGV diferem dos AGV anteriores no sentido em que não contêm uma base para levantar ou baixar o material. Consequentemente, uma das suas maiores desvantagens é o facto de requererem uma certa altura para recolher o produto, altura esta que deve ser ajustada ao tapete rolante que o AGV possui. Como este veículo possui um tapete rolante, tem a vantagem de conseguir transportar diferentes tipos de produtos [7].



Figura 2.4: *Piggyback* AGV [1]

2.2.3 AGV Reboque

Este tipo de veículo atrela a si um ou mais carros, tornando o transporte dos mesmos muito mais fácil e cómodo, quando comparado com um transporte manual. Fornece ainda um aumento da segurança e produtividade, razão pela qual são bastante utilizados em indústrias como a automóvel, aeroespacial, entre outras. Um exemplo deste veículo é o apresentado na Figura 2.5, desenvolvido pela Savant Automation.



Figura 2.5: AGV reboque - Savant Automation [8]

2.2.4 Underride AGV

Um *Underride* AGV coloca-se por baixo do local onde se encontra o material a transportar e levanta-o ligeiramente, tal como é visível na Figura 2.6.



Figura 2.6: *Underride* AGV [1]

Alguns destes AGV conseguem, ao colocar-se por baixo do material a transportar, obter informações como o conteúdo do material, possíveis especificações e local de destino. São veículos que ocupam um espaço reduzido em comparação com outros, sendo a sua ocupação definida maioritariamente pelo tamanho do material a transportar. Por todas estas características descritas, este é usado em ambientes como hospitais, e ainda em armazéns como os da Amazon [4].

2.2.5 Assembly AGV

Estes AGV permitem o transporte e montagem de objetos, ao longo de uma linha de produção, salientando que por este motivo movem-se normalmente por um caminho fixo e a uma velocidade menor. Na fase de projeto é muito importante ter em atenção a etapa de montagem, mas também a segurança devido à provável presença de operadores na linha de produção. Em fábricas como a da Mercedes em Ludwigsfelde (Alemanha) já se encontram integrados estes veículos nas suas linhas de produção, tal como é visível na Figura 2.7 [9].



Figura 2.7: *Assembly* AGV - Mercedes Benz [9]

2.2.6 AGV de Grande Carga

Os AGV de grande carga, diferenciam-se dos veículos anteriores por suportarem um valor de carga bastante superior. Devido a esta necessidade, a sua fase de desenho e escolha de componentes, requer uma atenção especial por forma a não ocorrerem imprevistos no transporte. Na Figura 2.8 é visível o transporte de uma retro-escavadora com recurso a um AGV deste tipo.



Figura 2.8: Transporte de retro-escavadora com recurso a um AGV [10]

2.2.7 AGV a Diesel

A sua utilização é predominante em veículos que operam num local exterior e permite geralmente o transporte de elevadas cargas. Um exemplo deste tipo de AGV, representado na Figura 2.9, é o desenvolvido pela VLD que opera em docas e permite o transporte de materiais com peso máximo de 70 toneladas e uma velocidade máxima de 6 m/s [11].



Figura 2.9: VLD Diesel AGV [11]

2.3 Sistemas de Controlo

Um sistema de controlo fabril tem como objetivo a interligação entre as diferentes partes integrantes da fábrica, tais como veículos, periféricos e o sistema de operação de logística interna [4]. O bom funcionamento deste sistema é importante para que o centro fabril mantenha uma coordenação eficiente, diminuindo os desperdícios temporais e aumentando a produtividade da fábrica.

2.3.1 Conexão entre Sistemas

Um sistema de controlo de AGV é uma estrutura complexa, que requer a interligação entre diversos sistemas e consequentes periféricos. Para facilitar a compreensão, na Figura 2.10 é apresentada uma ilustração simplificada deste tipo de sistema.

No entanto, esta tecnologia nem sempre requer um sistema de decisão complexo, levando a que a sua interligação com os diversos componentes fabris não seja necessária. Geralmente isto ocorre em sistemas onde o AGV possui uma rota

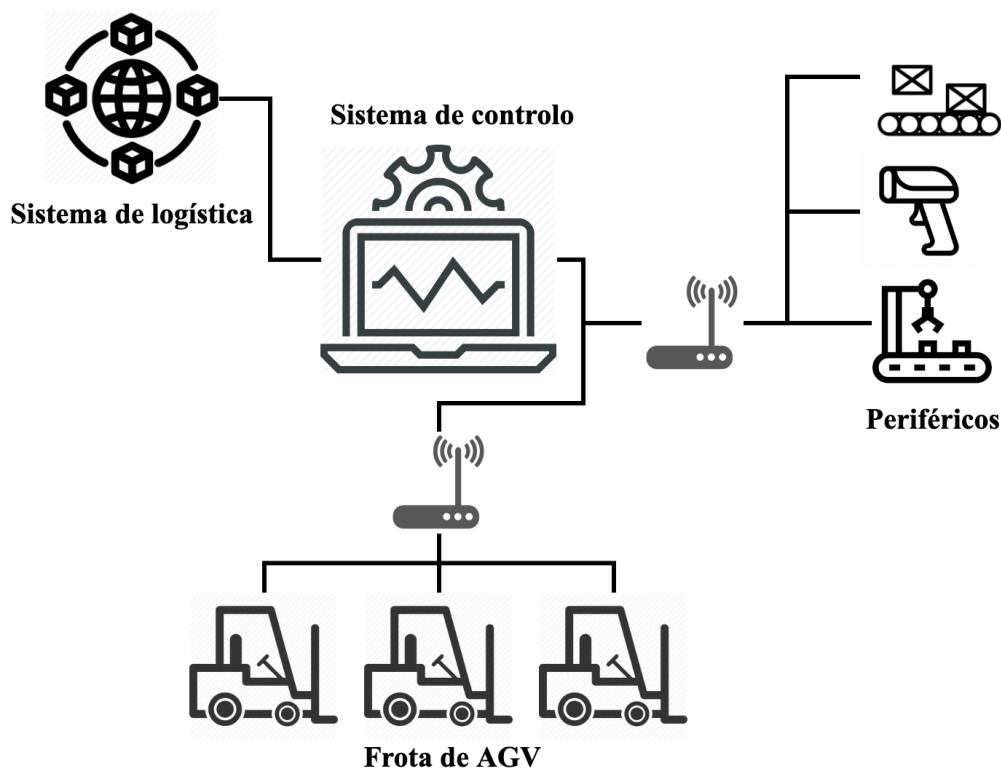


Figura 2.10: Sistema de controlo de AGV e respetivas interligações

pré-definida, levando a que o seu controlo seja de forma simples e sem grande possibilidade de adaptação do seu movimento. No entanto, geralmente, por forma a atingir uma maior autonomia, estes são normalmente interligados com o sistema de controlo fabril permitindo a sua comunicação com o sistema de logística para que recebam ordens e informações do processo. Para além disto, o sistema de controlo pode fornecer uma interface gráfica com o utilizador que permita a monitorização dos veículos e respetivos parâmetros.

Tendo em conta o apresentado, a interligação do AGV com o sistema é identificada em três passos [4]:

- **ordem transporte** - receber ordens de transporte, avaliá-las consoante o seu sistema de prioridades e verificar a sua exequibilidade;
- **envio veículo** - decisão sobre qual o AGV a efetuar o transporte;
- **processamento ordem transporte** - planear o caminho e respetivas atividades a realizar durante o percurso, garantindo um movimento eficiente e livre de problemas.

2.3.2 Módulo do Sistema de Controlo do AGV

Como referido, a interligação do AGV com o sistema de controlo fabril pode ser descrita em três passos. No entanto, o seu módulo de controlo fornece diversas funções representadas na Figura 2.11:

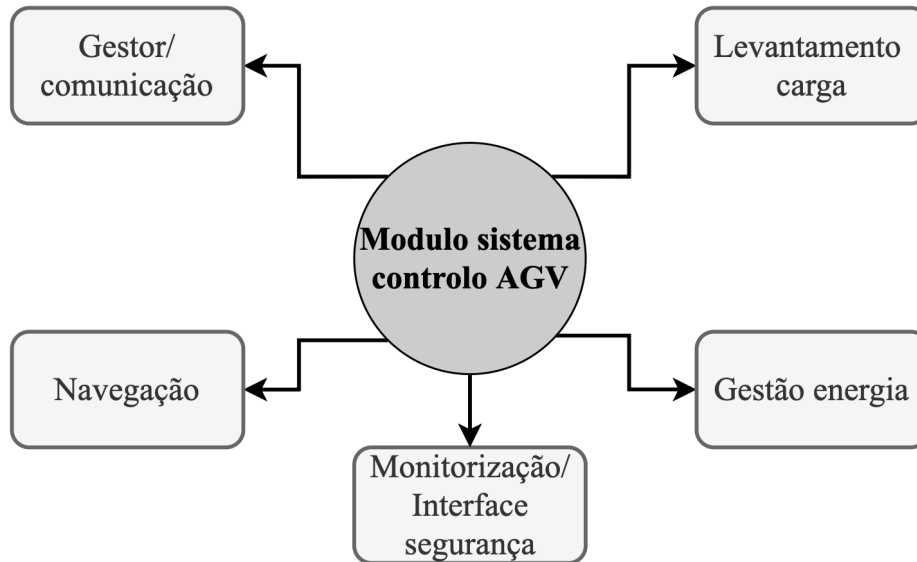


Figura 2.11: Funções do sistema de controlo do AGV

As cinco funções descritas podem ser resumidas da seguinte forma:

- **gestor/comunicação** - processar a ordem de transporte em comandos individuais e ativar os diversos componentes do veículo tais como *drives*, equipamento de segurança, direção, entre outros;
- **navegação** - executar todas as tarefas de determinação da posição, navegação e orientação de caminho;
- **levantamento de carga** - assumir a coordenação de carga e descarga de material;
- **gestão de energia** - manter a gestão de energia do veículo de forma mais eficiente possível;
- **monitorização/interface de segurança** - manutenção da segurança do pessoal e da propriedade e garantir que os AGV dentro de uma frota não colidem entre si [1].

2.4 Métodos de Navegação

Os métodos de navegação dos AGV descrevem a forma como estes efetuam as suas deslocações entre os locais pretendidos. Existem duas classificações principais para descrever a forma como estas são efetuadas: navegação fixa ou navegação dinâmica. A opção a implementar depende da trajetória, custos de instalação, requisitos de flexibilidade e necessidade ou não para expansão futura do sistema. A navegação fixa é atualmente a opção mais barata no mercado, no entanto possui uma flexibilidade bastante mais reduzida quando comparada com a navegação dinâmica [12].

2.4.1 Navegação Fixa

Nos métodos de navegação fixa os AGV seguem um caminho pré-determinado que pode ser identificado através de linhas físicas, localizadas no tecto ou no chão, tornando este método simples e de baixo custo. Existem dois tipos de métodos de navegação fixa: navegação indutiva e navegação óptica.

Navegação Indutiva

A navegação indutiva funciona através da criação de um campo magnético ao longo do caminho, detetado pelo AGV através de uma antena. Apesar de ser uma configuração simples e barata, uma reconfiguração deste tipo de sistema de navegação implica uma nova implementação de fios condutores no chão e, por isso, maiores custos [13]. Uma das suas principais desvantagens prende-se com a danificação dos fios condutores impedir o correto funcionamento do AGV. Uma representação desta navegação é exemplificada na Figura 2.12.

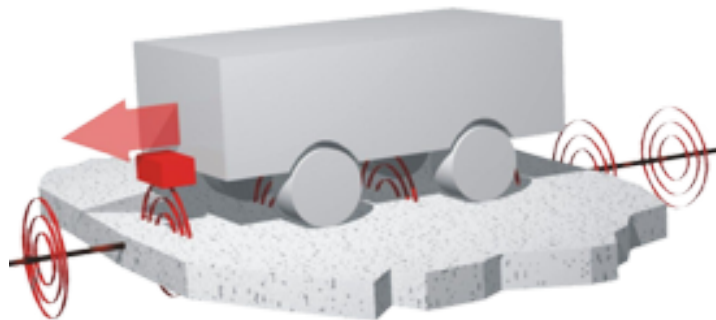


Figura 2.12: Navegação indutiva [4]

Navegação Ótica

Neste tipo de navegação, o veículo segue uma linha ou fita colorida. Esta orientação é conseguida com recurso a um sensor que consegue detetar a faixa

e, conseqüentemente, possibilitar o ajuste de posição do AGV. Sendo um método bastante semelhante ao referido anteriormente, apresenta como principal desvantagem (à semelhança do método anterior) o facto de danos nas faixas de orientação impedirem o correto funcionamento do sistema. No entanto, permite ao mesmo tempo uma maior facilidade na troca de trajetórias [13]. Na Figura 2.13 é visível uma representação deste sistema:



Figura 2.13: Navegação ótica [14]

2.4.2 Navegação Dinâmica

A navegação dinâmica é um método de navegação que não requer, ao contrário da navegação fixa, de qualquer tipo de linhas de orientação para efetuar o seu movimento, sendo a trajetória do veículo adaptada consoante as condições do meio onde este opera. Existem vários tipos de métodos de navegação dinâmica, sendo neste capítulo referidos os seguintes: navegação através de marcadores magnéticos, navegação através de radio-frequência, navegação com laser e navegação natural.

Navegação através de Marcadores Magnéticos

O princípio de funcionamento da navegação com recurso a marcadores magnéticos consiste em o veículo seguir pequenos marcadores magnéticos colocados no chão. Os AGV vão de um ponto para o seguinte, usando sensores e controlos tais como sensores de efeito *hall*, *encoders*, contadores e outros tipos de *encoders* para calibrar os erros de ângulo da direção [15]. Na Figura 2.14, é explicado resumidamente o funcionamento deste método navegação.

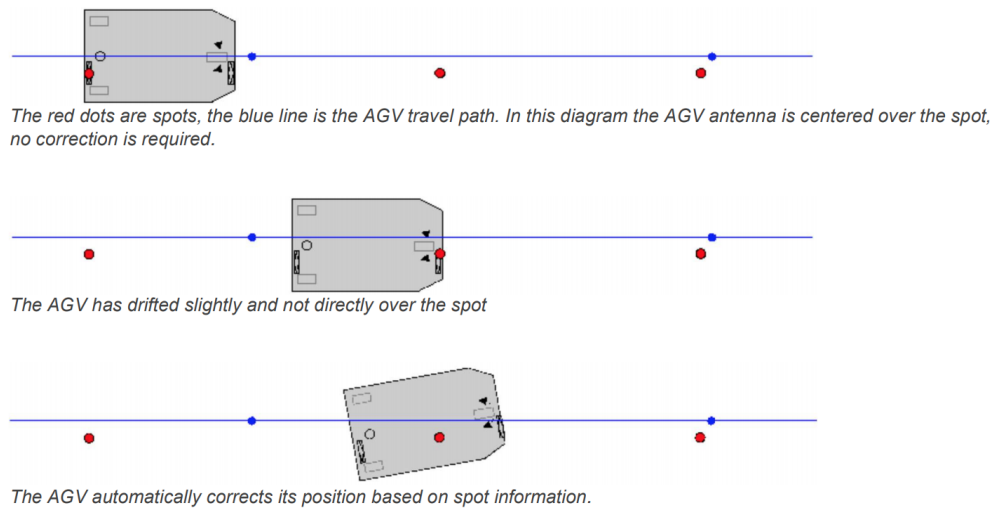


Figura 2.14: Navegação através de marcadores magnéticos [15]

Este sistema possui vantagens, tais como um posicionamento preciso e baixos custos de manutenção [16].

Navegação através de Rádio-frequência

A navegação com recurso à rádio-frequência é semelhante à navegação de marcadores magnéticos, com a diferença de que em vez de marcadores magnéticos são colocadas etiquetas de rádio-frequência no chão. As etiquetas são lidas por um leitor montado no AGV. O sistema é barato e simples de implementar, mas é sensível a condições externas [4].

Navegação com Laser

Na navegação com laser são colocados em locais tais como paredes e postes, refletores que são acedidos pelo laser rotativo usado pelo AGV, tal como é demonstrado na Figura 2.15.

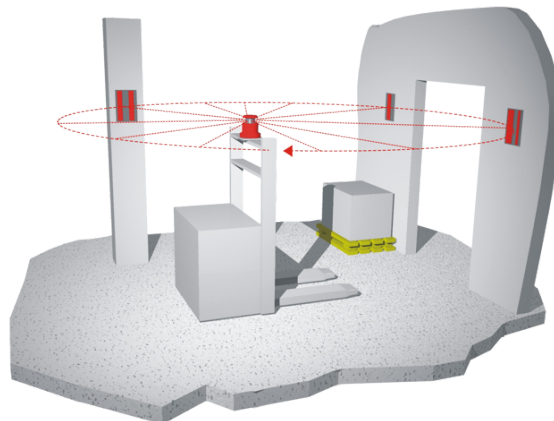


Figura 2.15: Navegação com laser [16]

O laser rotativo envia sinais de laser em 360° e caso encontre um refletor este último envia de volta o sinal para o AGV, sendo normalmente necessária a detecção de pelo menos três para o veículo ser capaz de obter a sua localização. Após cumprida esta condição, a área é mapeada e guardada na memória do AGV [13].

Apesar das suas inúmeras vantagens, tais como a facilidade de instalação, posicionamento preciso e custos de manutenção reduzidos, este tipo de navegação apresenta um investimento inicial elevado [16].

Navegação Natural

Existem várias técnicas que se enquadram dentro de um sistema de navegação natural, representada na Figura 2.16. No entanto, a tecnologia considerada mais importante e que será a referida, tem como nome *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). Esta tecnologia combina odometria (uso de dados do veículo, como por exemplo velocidade dos motores e raio das rodas, para estimar a posição do veículo ao longo do tempo), *scanners* laser e um *extended Kalman filter* (EKF). Os *scanner* laser são também chamados de *Light Detection And Ranging* (LiDAR). Este método distingue-se do anterior (navegação laser) por não depender de refletores colocados em locais específicos para determinar a sua posição, mas sim do mapeamento do estado atual do ambiente, tornando esta configuração mais flexível a novas mudanças.

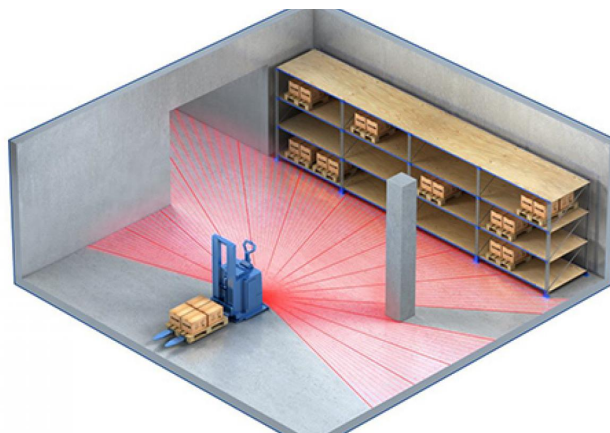


Figura 2.16: Navegação natural [4]

O AGV ao viajar por novos ambientes deteta novos objetos com recurso ao *scanner*, sendo que graças à sua odometria este consegue ter uma boa, mas não ideal, percepção da sua localização. Devido a essa imperfeição é usado um EKF, que compara a posição obtida através da odometria com a forma como os objetos se movem quando o AGV se encontra em movimento, possibilitando um mapeamento da sua área eficaz e conseqüentemente a definição de um caminho sem colisões [4].

Para além do LiDAR, existem alternativas como sonares e câmaras. Os primeiros, apesar de serem alternativas mais baratas, não são tão precisos. Já os segundos, conseguem identificar através das imagens, objetos e outras características presentes no ambiente que nenhuma das duas alternativas anteriores consegue, no entanto são sistemas bastante caros, que podem ser influenciados pela iluminação do local e que requerem uma capacidade computacional elevada.

2.5 Sistemas de Controlo de Direção

Os sistemas de controlo de direção referem-se à forma como o AGV efetua o seu movimento ou, tal como o nome indica, controla a sua direção. A Figura 2.17 apresenta as opções de controlo de direção mais comuns.

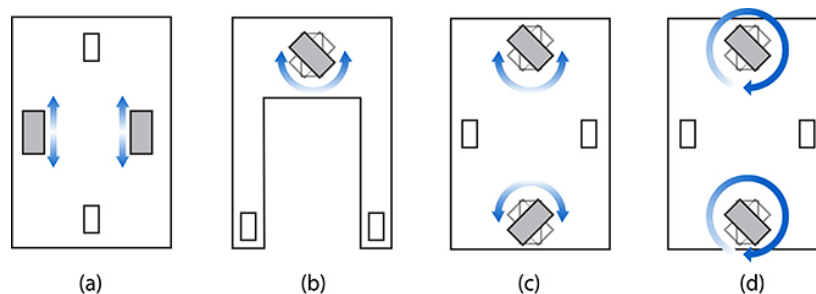


Figura 2.17: Sistemas de controlo de direção AGV [17]

Estas podem ser classificadas em [18]:

- **unidirecional** - um eixo traseiro fixo e uma roda dianteira de tração/direção que roda sobre si mesma. Esta é a configuração b) da Figura 2.17.
- **bidirecional** - existem três tipos de configurações bidirecionais. Na configuração a) da Figura 2.17, o AGV tem as rodas colocadas lado a lado, permitindo a sua movimentação lateral. Na configuração c) o veículo é constituído por duas rodas de tração/direção, uma à frente e outra atrás com movimento de 360° em qualquer uma das direções. Por fim, na configuração d) o veículo consegue rodar 360° em torno de si próprio.

2.6 Carregamento

Um sistema de carregamento é uma parte importante a considerar no projeto de um AGV, sendo este constituído (para além das baterias) por o seu método e esquema. Nesta secção são apresentados os principais métodos e esquemas de carregamento existentes, referindo as suas características e respetivas vantagens e desvantagens.

2.6.1 Métodos de Carregamento

Atualmente, existem três principais métodos de carregamento de AGV. Estes são: carregamento de baterias de tração, transferência de energia sem contacto e sistemas híbridos.

Carregamento de Baterias de Tração

O carregamento de baterias de tração, ou *Electric Vehicle Batteries* (EVB) como são normalmente designadas, consiste no carregamento destas através do contacto com uma fonte de energia. Algumas das baterias, como as de níquel cádmio ou chumbo ácido, são EVB tipicamente encontradas em AGV [1].

Transferência de Energia sem Contacto

A transferência de energia sem contacto, envolve a transferência indutiva de energia sem contacto de um condutor montado no chão para um, ou mais, AGV. Este método data de à 30 anos atrás, tendo desde então vindo a ser cada vez mais usado em aplicações como automatização de fábricas, sistemas de iluminação, sistemas de electrónica, entre outros [1] [19].

São sistemas de carregamento que têm como vantagens não requererem intervenção humana, não serem afetados por sujidade, produtos químicos ou clima e poderem, em princípio, ser aplicados a sistemas de carregamento dinâmico onde um veículo pode ser carregado enquanto está em movimento [19].

Sistemas Híbridos

Estes sistemas conjugam a transferência de energia sem contacto com uma bateria auxiliar. Esta é consideravelmente mais pequena que as EVB referidas anteriormente, e é apenas utilizada em pequenas tarefas. A utilização desta bateria é bastante vantajosa pois permite que se certas áreas da fábrica não estiverem equipadas para transferência de energia sem contacto a bateria auxiliar entra em funcionamento, e ainda em caso de avaria do AGV este é direcionado para fora do *layout*, não interferindo com o funcionamento do sistema [4].

2.6.2 Esquemas de Carregamento

Na presente secção são apresentados resumidamente os cinco esquemas de carregamento, geralmente mais usados: troca manual de bateria, troca automática de bateria, carregamento oportuno, carregamento automática e carregamento alternado [20].

Troca Manual de Bateria

Este esquema é o mais simples dos cinco descritos. Consiste no transporte do AGV (quando a bateria se encontra num nível baixo) para uma estação onde é feita a troca manual da respetiva bateria.

Troca Automática de Bateria

Neste caso, à semelhança do esquema anterior, quando a bateria do AGV estiver num nível baixo este é transportado para uma estação de troca. A diferença prende-se com o facto de na troca automática de bateria, esta troca ser feita com recurso a uma máquina e não a um humano, o que normalmente leva a um procedimento mais rápido.

Carregamento Oportuno

O carregamento oportuno consiste na utilização dos períodos em que o AGV não se encontra a executar qualquer tarefa para efetuar o seu carregamento. Normalmente é utilizado quando o sistema leva a que os AGV tenham diversas paragens, normalmente curtas, aproveitando esse tempo para carregar as suas baterias em carregadores localizados próximos dos pontos de paragem. Com um bom funcionamento, este esquema tem pouco ou nenhum efeito no tempo de operação, desde que os tempos mortos sejam utilizados devidamente [20].

Carregamento Automático

O esquema de carregamento automático é normalmente utilizado em sistemas com rotas imprevisíveis e/ou com pouca oportunidade de carregamento. Quando a bateria chega a uma dada percentagem, o AGV move-se para uma estação onde o seu carregamento é efetuado, permanecendo lá até que a bateria esteja num nível considerado aceitável. Ao contrário do método anterior, e devido à pouca oportunidade de carregamento, aqui deve ser adicionado ao tempo de operação do AGV o seu tempo de carregamento, levando a que eventualmente seja necessário um maior número de veículos [20].

Carregamento Alternado

O carregamento alternado faz uso das características dos sistemas com carregamento oportuno e carregamento automático. Um modo de funcionamento consiste no funcionamento do AGV em carregamento oportuno e quando a sua bateria descarrega até um dado nível este dirige-se a uma estação onde carrega durante um maior período de tempo. Outro modo de funcionamento baseia-se também no carregamento oportuno, com a diferença de que quando um AGV inicia o seu carregamento este é mantido na estação até a bateria atingir um nível aceitável, não podendo o seu carregamento ser interrompido.

2.7 Segurança

A segurança é uma parte fulcral quando se considera o projeto de um AGV. Estes devem implementar medidas que garantam a segurança tanto do veículo em si, como de todos os trabalhadores que interagem com este. Sendo assim, em 1998 foi criada a Norma Europeia para segurança de veículos autónomos (EN1525 - *Driverless industrial trucks and their systems*) que obriga a que os veículos cumpram certas premissas. A norma é extensa e tem diversos requisitos, no entanto é importante destacar alguns [21]:

- garantir que pessoas ou objetos localizados no percurso sejam reconhecidos e que o AGV pare antes de os atingir. Caso a colisão ocorra esta não deve exceder uma dada força e o veículo deve desligar-se imediatamente;
- os AGV devem ser equipados com mecanismos de sinais sonoros ou luminosos, por forma a alertarem os trabalhadores da sua presença;
- todos os AGV devem possuir a possibilidade de controlo manual e um botão de emergência.

Capítulo 3

Sistema de Navegação Natural

Ao longo do capítulo atual é feita uma contextualização sobre diversos conceitos necessários à melhor compreensão de um sistema de navegação natural. São referidas estratégias de mapeamento do ambiente, de reconhecimento de posição, apontadas vantagens e desvantagens de um sistema deste tipo e ainda apresentadas algumas soluções de software que podem ser utilizados.

3.1 Sistema de Navegação Natural

O conceito de sistema de navegação natural já foi resumidamente apresentado, na Subsecção 2.4.2, como parte do método de navegação dinâmica, onde o veículo não requer qualquer tipo de linhas de orientação para efetuar o seu movimento. No entanto, é importante detalhar toda a envolvente de um sistema de navegação natural visto que este conceito é utilizado na construção do protótipo de AGV.

A navegação natural é um termo que tem cada vez mais vindo a ser usado na indústria, e que se considera como o futuro da movimentação autónoma. O conceito fundamental tem como acrónimo SLAM e permite um sistema de navegação natural onde os veículos identificam e mapeiam a área circundante e tomam as suas decisões consoante o *feedback* obtido, tornando o veículo autónomo. Uma definição adequada para este conceito é a referida em [22] : “SLAM é o processo pelo qual um robô móvel consegue construir um mapa do seu ambiente e, ao mesmo tempo, usar este mapa para calcular a sua localização”.

Durante a última década existiu um rápido progresso, juntamente com muitas implementações convincentes, dos métodos SLAM. A grande maioria do trabalho concentrou-se em melhorar a sua eficiência computacional, garantindo estimativas consistentes e precisas para o mapa e a posição do veículo. No entanto, também

tem existido muita pesquisa sobre questões como não linearidade e associação de dados, vitais para alcançar uma implementação prática e robusta [22].

Tendo em conta o referido, é possível resumir o SLAM em 4 passos [23]:

- **mapeamento do ambiente** - o AGV navega e mapeia o ambiente real;
- **associação de dados** - os dados recebidos devem ser comparados com o ambiente teórico;
- **estimativa de posição** - o veículo deve estimar a sua posição atual com base nos dados recebidos;
- **atualização do estado** - estado e mapa do AGV são recalculados com base na comparação entre a informação antiga e nova.

3.2 Mapeamento do Ambiente

O primeiro passo de um algoritmo SLAM é mapear o seu ambiente. Em grande parte das aplicações um sistema deste tipo utiliza mais que um tipo de sensor, por forma a atingir esse mesmo objetivo de uma forma mais precisa. Por exemplo, a odometria é usada em conjunto com a cinemática do robô, para calcular o movimento com base na rotação da roda. Os sensores de sonar, que funcionam a partir da emissão de ultra-sons para deteção e localização de objetos, podem estimar a posição com base nas distâncias entre objetos. Os LiDAR, que utilizam normalmente uma tecnologia laser para mapear o ambiente, podem ser usados de várias maneiras para estimar o movimento ou a posição do robô móvel [24]. Nesta secção são descritos três dos principais meios de mapeamento utilizados num sistema com SLAM: LiDAR, sonar e visão computacional.

3.2.1 LiDAR

O LiDAR (Figura 3.1) é um tipo de tecnologia que emite pulsos intensos e focados de luz e mede o tempo necessário para que as reflexões sejam detetadas pelo sensor. Essas informações são usadas para calcular intervalos ou distâncias para objetos. Por exemplo, para obter as coordenadas tridimensionais (por exemplo, x , y , z ou latitude, longitude e altitude) dos objetos é necessário calcular [25]:

1. a diferença temporal entre a emissão e retorno do pulso;
2. o ângulo do qual o pulso foi emitido;
3. a localização absoluta do sensor na superfície da Terra.



Figura 3.1: Exemplo de LiDAR [26]

Através dos valores das coordenadas é possível construir um mapa da envolvente do AGV, tal como o representado na Figura 3.2.

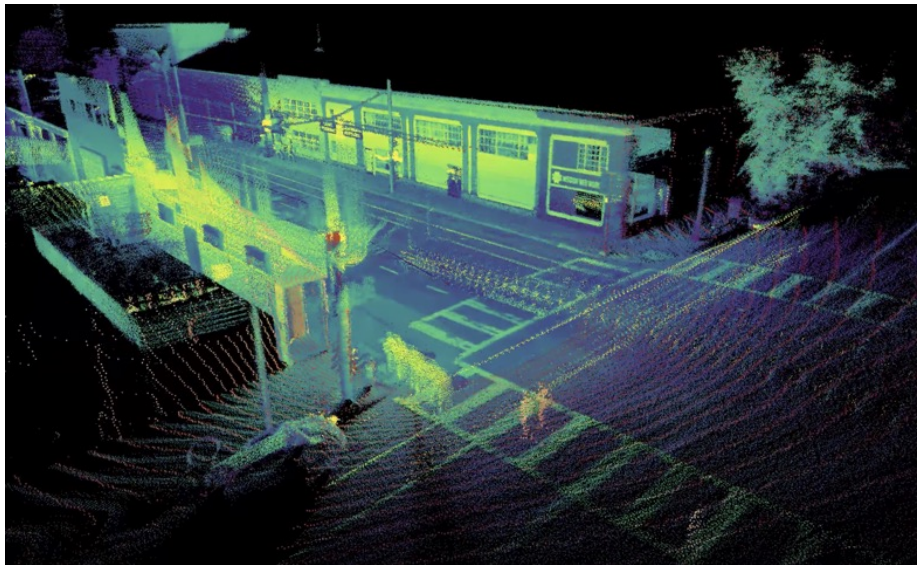


Figura 3.2: Exemplo de mapeamento com recurso a um LiDAR [27]

Um LiDAR é um sistema ativo, ou seja, estes geram e direcionam energia (pulso laser) para um objeto e conseqüentemente detetam radiação (luz refletida). Esta característica confere-lhes a capacidade de recolher informação durante a noite, em períodos onde o ar tem menos nuvens e quando não chove. Como a maior parte dos AGV não operam ao ar livre nem em ambientes escuros, esta característica não é de grande importância para os mesmos, no entanto em navios que operam durante a noite esta é já de grande relevância [25]. Outra

característica importante é o facto de conseguirem fazer leituras de posições a um distância considerável, o que não é normalmente possível com a utilização de tecnologias como, por exemplo, câmaras de visão.

3.2.2 Sonar

O nome sonar advém do acrónimo *sound navigation and ranging*, e é uma técnica que funciona através da emissão de ultra-sons que chocam com os obstáculos e retornam à fonte. Um exemplo deste sensor é o da Figura 3.3.



Figura 3.3: Exemplo de sonar - MaxBotix EZ-1 [28]

Com isto, na Figura 3.4 é apresentada uma ilustração do modo de funcionamento deste sensor.

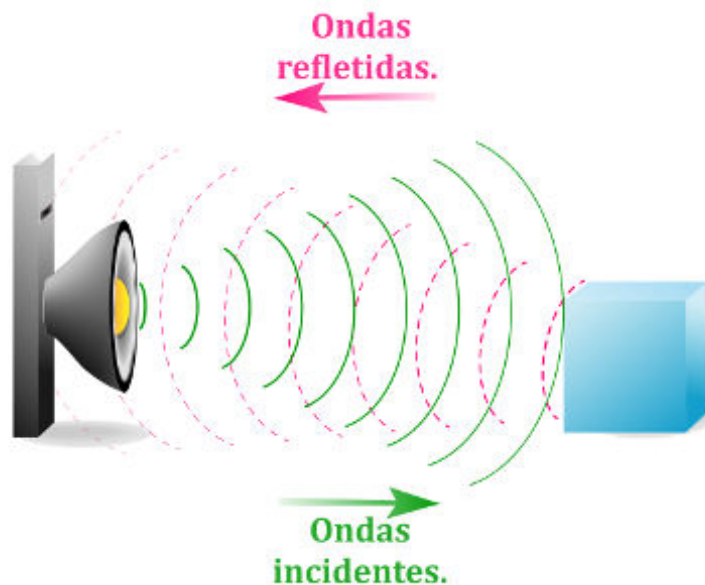


Figura 3.4: Funcionamento de um sonar [29]

A determinação da distância de um dado objeto é baseada na medição do tempo necessário para que um sinal ultra-sónico retorne aos sensores, sendo que intensidade da reflexão depende do tamanho, forma, textura e orientação da superfície refletora. Como é de esperar, superfícies de maior dimensão refletem mais e aumentam a probabilidade de uma reflexão ser detectada [30].

As maiores vantagens deste sistema consistem no seu baixo custo e facilidade de implementação, tendo no entanto como desvantagens a sua velocidade de processamento e reflexão especular. Esta última consiste na onda incidente fazer o mesmo ângulo da refletida em relação à superfície, originado um comportamento como o da Figura 3.5, onde existe um espelhamento do plano.



Figura 3.5: Reflexão especular [31]

Os sonares são muito conhecidos pela sua utilização em navios, com a finalidade de detetar objetos ou animais acima ou debaixo de água. No entanto, a sua utilização também se estende a outras aplicações como os AGV, sendo que devido às desvantagens referidas são menos utilizados que outros sensores como, por exemplo, os LiDAR.

3.2.3 Navegação Guiada por Visão

A visão computacional é uma área que tem como objetivo retirar diversas informações através de uma imagem ou, como referido em [32]: “Num nível abstracto, o objetivo da visão computacional é utilizar a informação fornecida por uma imagem por forma a inferir algo sobre o mundo”. Sendo assim, pode-se dizer que a visão computacional pretende desenvolver métodos que se assemelhem à visão humana, permitindo através de uma imagem reconhecer objetos, pessoas, animais, entre outros.

Quando um humano entra em contacto com um objeto pela primeira vez é estabelecido um contacto sensorial com o mesmo tendo em vista a sua aprendizagem, estabelecendo uma relação e tornando-a parte da sua experiência pessoal. Com recurso a esta, cada vez que existir novo contacto com o mesmo objeto, este será mais fácil de reconhecer [33].

Baseado neste estilo de aprendizagem, foi introduzida a área de *Machine Learning*, um dos ramos da inteligência artificial e no qual a visão computacional é baseada. Esta área tem como objetivo a programação de sistemas que, com recurso a algoritmos computacionais desenvolvidos, “aprendam” uma determinada tarefa sem esta ter sido explicitamente comandada para executar [34].

No caso da Figura 3.6, é visível que através de um algoritmo de visão computacional foi possível detetar e identificar objetos tais como um cão, um carro e uma bicicleta.

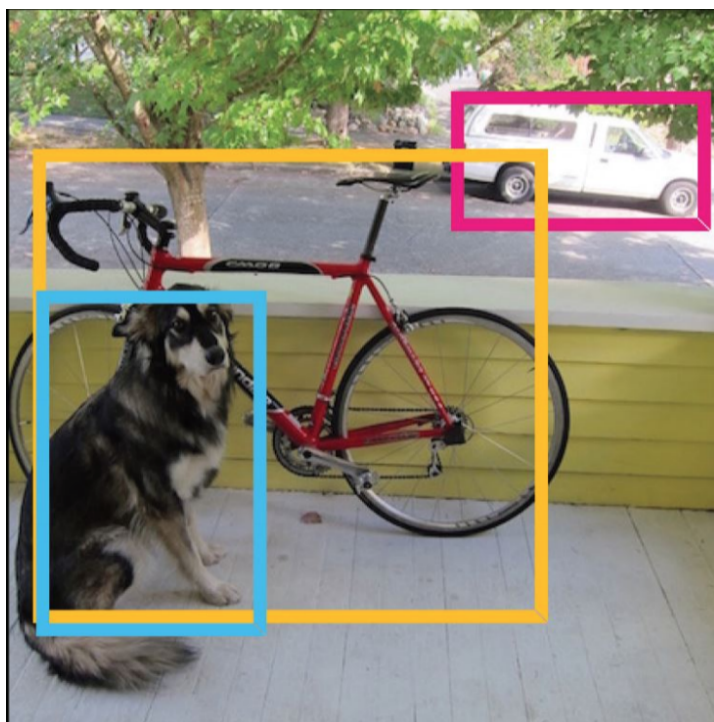


Figura 3.6: Exemplo de visão computacional [34]

Uma nota importante vai para a distinção entre processamento de imagem e visão computacional. O processamento de imagem consiste na criação de uma nova imagem a partir de outra já existente, através da modificação do seu conteúdo de alguma forma, e não se foca em identificar conteúdo, ao contrário do que acontece na visão computacional [33].

Relativamente aos AGV, um que utilize visão computacional para se movimentar torna o sistema mais flexível, e menos suscetível a falhas visto que existe

uma grande quantidade de informação a ser retirada de uma imagem. Esta informação é consideravelmente mais ampla do que a adquirida por outros sensores, como os LiDAR ou sonar, fornecendo dados como a cor que estes últimos não conseguem. No entanto, uma maior quantidade de informação requer também uma maior capacidade de processamento que caso não exista pode tornar os sistemas lentos. Outra desvantagem a considerar é que caso exista uma iluminação deficiente, as imagens capturadas não serão ideais e irão fornecer informações não ótimas para o bom funcionamento do sistema [35].

3.3 Estratégias de Estimativa de Posição

Entender a sua localização e ambiente tem uma importância fulcral no funcionamento de um veículo que se posiciona num ambiente desconhecido. Sendo assim, com base na informação recebida pelos sensores, um AGV deve ser capaz de reconhecer a sua posição atual por forma a localizar-se no ambiente em que se encontra. Para isso, existem vários métodos que se encontram apresentados na Figura 3.7.

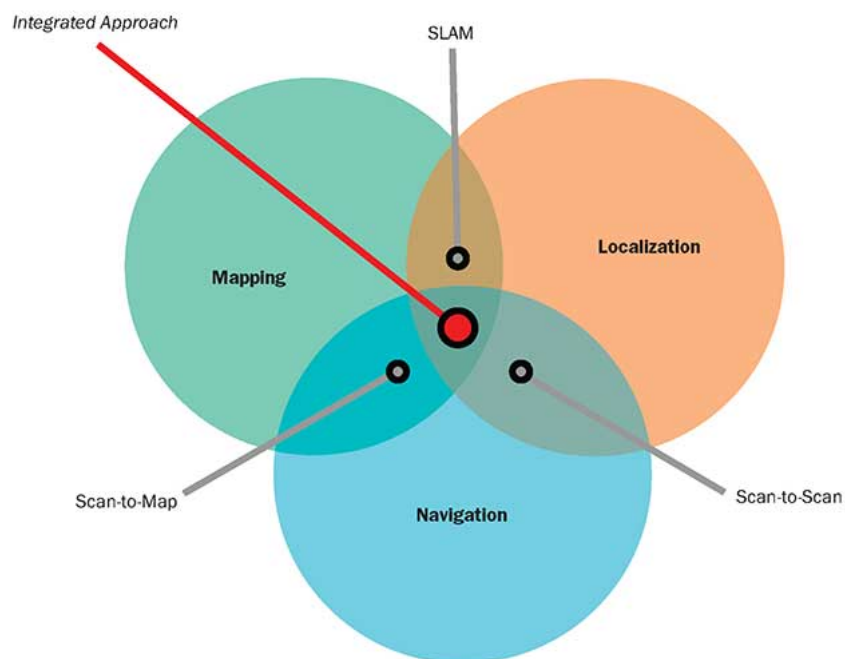


Figura 3.7: Estratégias de estimativa de posição dos AGV [24]

Este esquema serve de base para uma melhor contextualização dos métodos descritos no decorrer da presente secção.

3.3.1 Scan-to-Scan

Este primeiro método é baseado num algoritmo incremental, onde os dados recebidos pelo sensor são utilizados para estimar a posição do AGV entre *scans* consecutivos, resultando numa posição atualizada e acumulada do veículo. A abordagem mais comum (e que é descrita) é baseada na técnica *Iterative Closest Point* (ICP), que tem como objetivo minimizar a distância entre dois pontos através do cálculo iterativo dos parâmetros de transformação (constituídos pelos parâmetros de translação e rotação). Esta técnica, introduzida pela primeira vez em 1991 em [36], é frequentemente utilizada para reconstruir mapas a duas ou três dimensões, localizar robôs, entre outras aplicações¹. Por forma a entender melhor o seu funcionamento, na Figura 3.8 encontra-se representado o seu processo [37] [38].

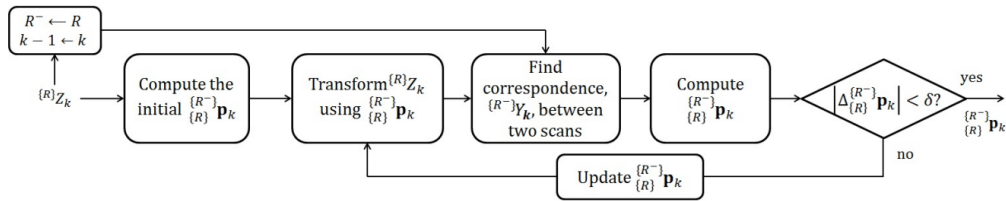


Figura 3.8: Processo do *scan-to-scan* [38]

Quando *scans* são efetuados com recurso a um sensor posicionado num robô em movimento, os dados são obtidos com respeito a diferentes sistemas de coordenadas, sendo R^- relativo ao *scan* anterior e R ao atual. Os pontos obtidos através do *scan* anterior e atual podem ser representados com recurso à Equação 3.1 e Equação 3.2, respetivamente.

$$\{R^-\} Z_{k-1} = \left\{ \{R^-\} \mathbf{z}_{k-1} \mid \forall i \in \{1, \dots, m\} \right\} \quad (3.1)$$

$$\{R\} Z_k = \left\{ \{R\} \mathbf{z}_k \mid \forall i \in \{1, \dots, m\} \right\} \quad (3.2)$$

, em que m representa o número de pontos e k o instante temporal.

O primeiro passo consiste em iterativamente encontrar os parâmetros de transformação relativos (\mathbf{p}_k), entre os dois sistemas de coordenadas, associando os dados obtidos através dos *scans*, tal como é visível na Equação 3.3.

$$\{R^-\} \{R\} \mathbf{p}_k = [t_k^x, t_k^y, \phi_k]^T \quad (3.3)$$

¹De referir que o ICP já é utilizado à bastantes anos, o que levou a que fossem criadas diversas variantes, que podem ser encontradas na literatura.

onde t_k^x e t_k^y correspondem aos parâmetros de translação e ϕ_k aos de rotação. Isto permite a transformação dos novos pontos com sistema de coordenadas R , em pontos que possuam o sistema de coordenadas antigos R^- (Equação 3.4).

$$\begin{aligned} \{R^-\} \mathbf{z}_k^i \{R^-\} \{R\} \mathbf{p}_k &= \mathbf{R}(\phi_k) \{R\} \mathbf{z}_k^i + \mathbf{t}_k = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\phi_k) & -\sin(\phi_k) \\ \sin(\phi_k) & \cos(\phi_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{R\} z_k^x \\ \{R\} z_k^y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_k^x \\ t_k^y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Com isto, é possível associar $\{R^-\} Z_k$ (ponto atual com o sistema de coordenadas anterior) com $\{R^-\} Z_{k-1}$ (ponto anterior com sistema de coordenadas anterior). Esta associação, representada na Equação 3.5, resulta em $\{R^-\} Y_k$ que será utilizado para a obtenção dos novos parâmetros de transformação relativos (\mathbf{p}_k).

$$\{R^-\} Y_k = \left\{ \{R^-\} Y_k^i \mid \forall i \in \{1, \dots, m\} \right\} \quad (3.5)$$

De salientar que existem diversos métodos para a obtenção de $\{R^-\} Y_k$ e \mathbf{p}_k , que não serão objetos de avaliação no presente trabalho.

A obtenção iterativa dos parâmetros de transformação \mathbf{p}_k é efetuada até que o valor absoluto do incremento seja inferior a um dado limite, tal como indica a (Equação 3.6) [38].

$$|\Delta \{R^-\} \{R\} \mathbf{p}_k| < \delta \quad (3.6)$$

Para finalizar, referir que o *scan-to-scan* não se baseia em qualquer tipo de mapa, mas sim na navegação e posição do AGV, o que pode ser vantajoso quando não existe possibilidade de ter um. Em contrapartida, por ser um algoritmo incremental, o erro pode aumentar ao longo do tempo sem grande possibilidade de correção [24] [37].

3.3.2 Scan-to-Map

No *scan-to-map*, um mapa local é gerado através dos dados obtidos pelos sensores, e de seguida comparado com um mapa global previamente construído. Ou seja, em vez da comparação ser efetuada relativamente ao *scan* anterior (tal como se verificava no *scan-to-scan*) aqui o novo *scan* é comparado com um mapa definido globalmente. De forma semelhante ao efetuado anteriormente para o *scan-to-scan*, na Figura 3.9 é apresentado um esquema do processo do *scan-to-map*, que serve como guia de orientação para o descrito na presente secção.

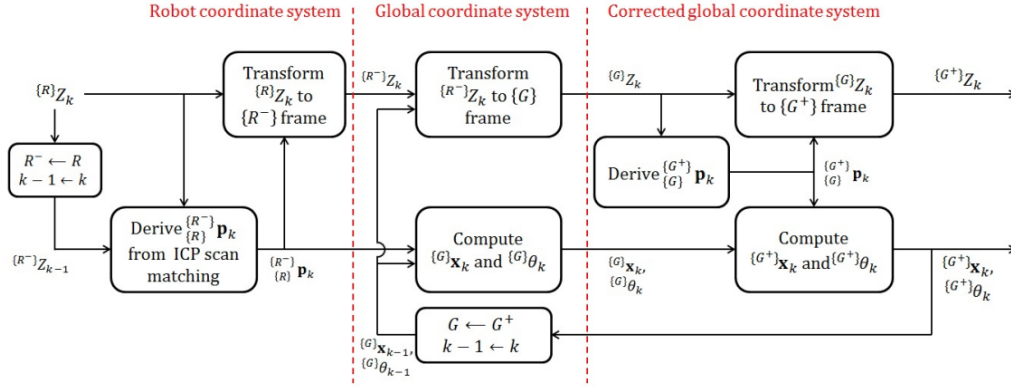


Figura 3.9: Processo do *scan-to-map* [38]

Partindo do esquema apresentado, o primeiro passo é converter o *scan* da posição do robô no sistema de coordenadas atual $\{R\}Z_k$ para a posição no sistema de coordenadas anterior $\{R^-\}Z_k$. Esta transformação é possível com recurso à utilização do *scan-to-scan* por forma a obter os parâmetros de transformação $\mathbf{p}_k^{ICP} = [\mathbf{t}_k^{ICP}, \phi_k^{ICP}]^T$. Conhecendo estes, é aplicada a Equação 3.7.

$$\{R^-\}z_k^i(\{R^-\}\mathbf{p}_k^{ICP}) = \mathbf{R}(\phi_k^{ICP})\{R\}z_k^i + \mathbf{t}_k^{ICP} \quad (3.7)$$

Tendo o novo *scan* associado ao anterior, o próximo passo consiste em transformar cada ponto $\{R^-\}Z_k$ em um com sistema de coordenadas global G , utilizando os dados da orientação do robô no instante anterior ($\{G\}\mathbf{x}_{k-1} = [\{G\}x_{k-1}, \{G\}y_{k-1}]^T$ e $\{G\}\theta_{k-1}$), tal como é apresentado na Equação 3.8.

$$\{G\}z_k^i = \mathbf{R}(\{G\}\theta_{k-1})\{R^-\}z_k^i + \{G\}\mathbf{x}_{k-1} \quad (3.8)$$

De salientar que é também necessário converter os dados da orientação do robô x_k e θ_k do sistema de coordenadas R^- para o sistema de coordenadas global G . Na realidade, $\{R^-\}\mathbf{x}_k$ e $\{R^-\}\theta_k$ são equivalentes, respetivamente, aos valores dos parâmetros de transformação \mathbf{t}_k^{ICP} e ϕ_k^{ICP} , tal como é ilustrado na Equação 3.9 e Equação 3.10

$$\{G\}\mathbf{x}_k = \mathbf{R}(\{G\}\theta_{k-1})\{R^-\}\mathbf{x}_k + \{G\}\mathbf{x}_{k-1} = \mathbf{R}(\{G\}\theta_{k-1})\mathbf{t}_k^{ICP} + \{G\}\mathbf{x}_{k-1} \quad (3.9)$$

$$\{G\}\theta_k = \{R^-\}\theta_k + \{G\}\theta_{k-1} = \phi_k^{ICP} + \{G\}\theta_{k-1} \quad (3.10)$$

Este sistema global de coordenadas está, no entanto, localizado de forma incorreta devido ao desalinhamento do sistema de coordenadas anterior e ao erro

de estimativa de orientação, causadas pelo *scan-to-scan*. Por isso, o *scan-to-map* propõe a conversão iterativa dos pontos no sistema de coordenadas G para um sistema de coordenadas do mapa corrigido G^+ , com recurso aos parâmetros de correção $\{{}^{G^-}\}\{{}^{G^+}\}\mathbf{p}_k$, tal como é apresentado na Equação 3.11.

$$\{{}^{G^+}\}\mathbf{z}_k^i(\{{}^{G^-}\}\{{}^{G^+}\}\mathbf{p}_k) = \mathbf{R}(\phi_k)\{{}^G\}\mathbf{z}_k^i + \mathbf{t}_k \quad (3.11)$$

Adicionalmente, os parâmetros de correção também corrigem os dados de orientação do robô, representados pelas Equação 3.12 e Equação 3.13.

$$\{{}^{G^+}\}\mathbf{x}_k = \mathbf{R}(\phi_k)\{{}^G\}\mathbf{x}_k + \mathbf{t}_k \quad (3.12)$$

$$\{{}^{G^+}\}\theta_k = \{{}^G\}\theta_k + \phi_k \quad (3.13)$$

Sendo assim, devido à correção realizada pela associação entre os *scans* efetuados com o mapa global, este método não acumula erros de orientação e posição do robô, o que é uma vantagem evidente face ao *scan-to-scan*. No entanto está sujeito a outros, como por exemplo, o mapa armazenado não coincidir com o real ou a existência de repetição de ambiente. Este último é causado caso o mapa seja muito semelhante de vários ângulos ou posições. Caso um ou mais deste pontos se verifique, o posicionamento do AGV será muito deslocado podendo levar a desvios consideráveis no percurso [24] [38].

3.3.3 Abordagem Integrada

Nenhuma das estratégias anteriores é completamente satisfatória, logo o mais indicado é utilizar uma que conjugue os aspetos de todas as mencionadas anteriormente. Tem-se assim a abordagem integrada que conjuga *scan-to-scan*, *scan-to-map-matching* e a odometria, tal como é visível na Figura 3.7. A odometria, já referida num momento anterior, é um aspeto importante do SLAM e utiliza dados provenientes do veículo (raio das roda, razão de engrenagem, velocidade, entre outros.) para prever a posição do veículo ao longo do tempo [24].

O AGV consegue assim reunir toda a informação dada pelo ambiente mapeado, o mapa teórico e os seus próprios sensores para fornecer a estimativa de posição mais precisa possível, conseguindo ultrapassar as limitações inerentes a cada método, tornando o sistema mais fiável e robusto em aplicações reais.

3.4 Filtro de Kalman

O *Kalman filter* (KF), introduzido pelo matemático R. E. Kalman, tem como objetivo permitir obter uma estimativa do estado do robô através da informação

proveniente dos diferentes sensores. Este é bastante poderoso no sentido em que suporta estimativas de estados passados, presentes e até futuros, e baseia-se nas seguintes premissas [39]:

- linearidade do sistema;
- ruído que afecta o sistema é gaussiano, com média nula e variância constante;
- ruído e medições não estarem correlacionados.

Uma função Gaussiana num KF representa o valor previsto, com o ruído/erro/incerteza representados através da variância. O valor previsto é centrado em torno do valor médio, com a largura da função a fornecer a indicação da sua incerteza, onde maior largura corresponde a uma incerteza superior [40].

Este tipo de filtro pode ser dividido em duas fases distintas: estimação e atualização. Na primeira fase, que não inclui informações do estado atual, são utilizados os sensores presentes no sistema para se estimar o estado do mesmo o que, devido à constante integração do ruído, leva a um crescimento acentuado do erro de estimação. Por forma a atenuar este último ponto, procede-se à segunda fase, a atualização. Aqui, ao contrário do que acontecia na primeira fase, são utilizadas medidas atuais para se obter uma estimativa mais precisa do estado [39].

Sendo assim, com base nas premissas descritas, o KF pretende estimar o estado de um processo controlado em tempo discreto, com base na Equação 3.14 (fase de estimação) e com medições baseadas na Equação 3.15 (fase de atualização).

$$x_{k+1} = \mathbf{A}_k x_k + \mathbf{B}_k u_k + w_k \quad (3.14)$$

$$z_k = \mathbf{H}_k x_k + v_k \quad (3.15)$$

A variável x_k representa o estado do sistema num dado instante, z_k a medição efetuada e u_k o sinal de controlo. Quanto às variáveis w e v estas representam os ruídos do processo e medição, respetivamente. Tal como é visível na Equação 3.16 e Equação 3.17, estas variáveis seguem uma distribuição normal com média nula onde \mathbf{Q} e \mathbf{R} são a variância do ruído do processo e medição, respetivamente [41].

$$p(w) \sim N(0, \mathbf{Q}) \quad (3.16)$$

$$p(v) \sim N(0, \mathbf{R}) \quad (3.17)$$

A matriz \mathbf{A} com $\dim(\mathbf{A}) = n \times n$, relaciona o estado no instante anterior $k-1$ com o estado atual k , na ausência de sinal de controle e ruído. Já a matriz \mathbf{B} ($\dim(\mathbf{B}) = n \times 1$) relaciona o sinal de controle u com o estado x . Por fim, a matriz \mathbf{H} com $\dim(\mathbf{H}) = m \times n$ relaciona o estado com a medição z_k [41].

Por forma a entender melhor o modo de funcionamento de um KF, é apresentado o fluxograma da Figura 3.10:

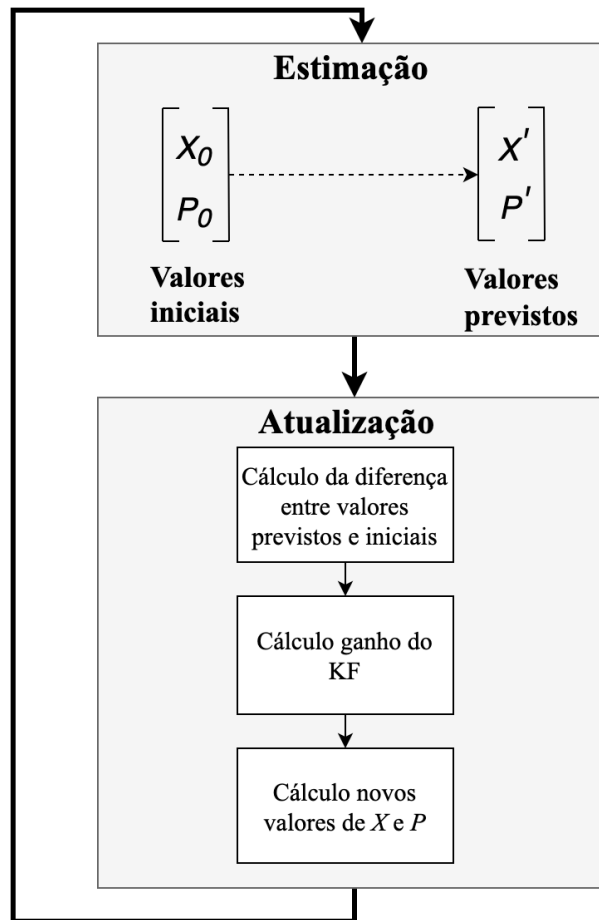


Figura 3.10: Fluxograma do funcionamento do KF

De salientar que o ganho do KF é o parâmetro que indica qual o peso a ser dado aos valores previstos e medidos, ou seja, indica o quão próximo ou afastado estes valores estão dos valores atuais [41].

Apesar das suas inúmeras vantagens, o KF possui alguns problemas entre os quais a sua aplicabilidade ser limitada a sistemas lineares. Como a maior parte

dos sistemas reais não verificam este último ponto, foi necessário estender o uso deste filtro para que pudesse ser utilizado com não linearidades, dando origem ao filtro de Kalman estendido.

Filtro de Kalman Estendido

Como foi referido, o KF pode ser utilizado para estimar o estado de um dado processo controlado em tempo discreto que é descrito com base numa equação linear (ver Equação 3.14). No entanto esta abordagem é limitada caso o processo e/ou as medições do sistema sejam regidas por equações não lineares. Caso seja passada a uma função Gaussiana uma não linearidade, esta irá reagir dando origem a uma não linearidade, tal como é demonstrado na Figura 3.11.

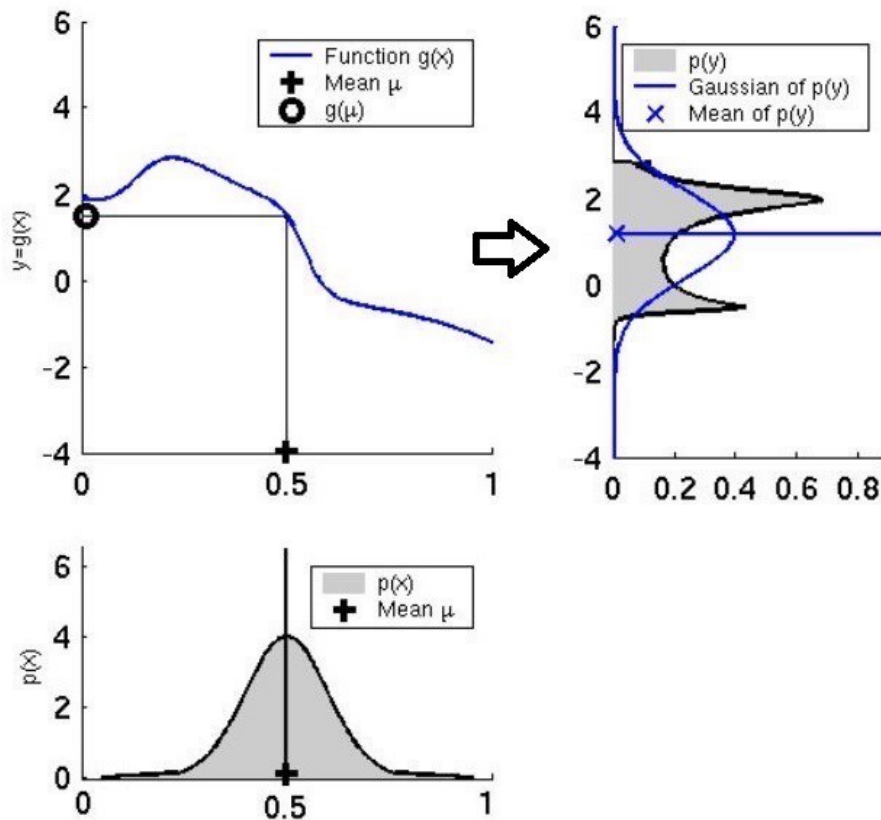


Figura 3.11: Efeitos de uma não linearidade na função Gaussiana [42]

Isto leva a que nestes casos um KF não possa ser utilizado. Sendo assim, surgiu uma nova abordagem do KF: o *extended Kalman filter* (EKF). Este é uma versão do KF utilizada em processos não lineares e que lineariza em torno dos valores atuais de média e variância. Por forma a obter esta aproximação, é usada a série de Taylor que é regida pela Equação 3.18 [41].

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x - a)^n \quad (3.18)$$

Neste caso utiliza-se a média da função Gaussiana da curva não linear e aproxima-se através da aplicação de um dado número de derivadas. Na verdade, como o objetivo é a linearização, para cada função não linear aplica-se uma tangente em torno da média e aproxima-se a função linearmente. A Figura 3.12 representa os efeitos da aplicação da série de Taylor por forma a linearizar a função Gaussiana [42].

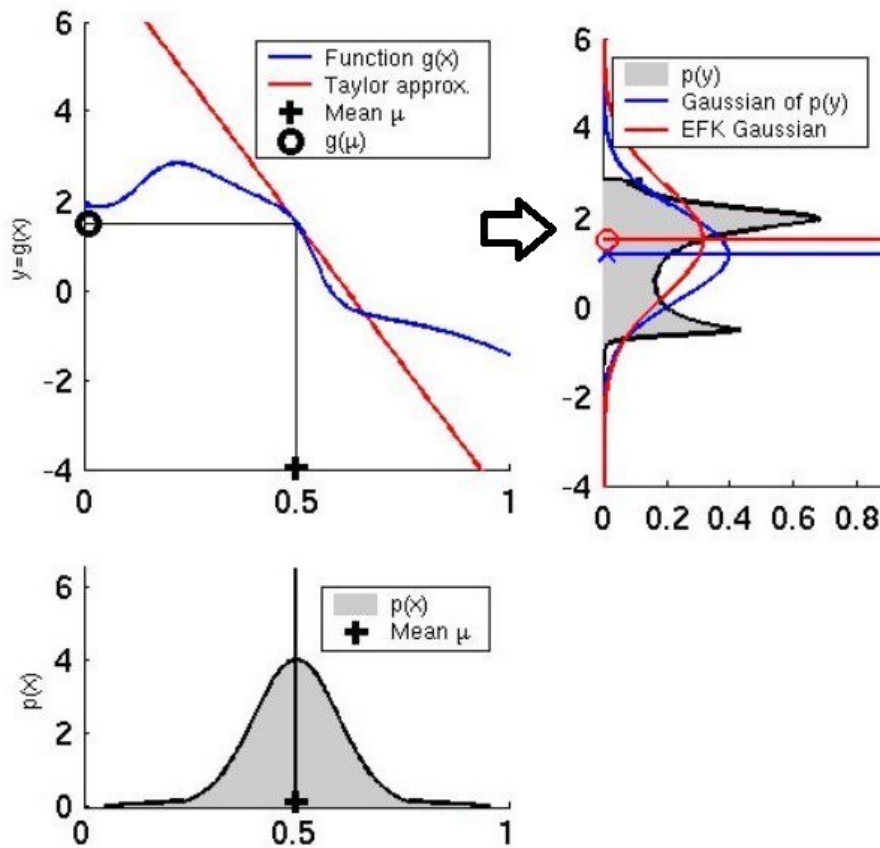


Figura 3.12: Efeitos da aplicação da série de Taylor na linearização de função Gaussiana [42]

À semelhança do que se sucedeu na Equação 3.14, aqui também o processo é regido por uma equação às diferenças, com a importante diferença de neste caso ser não linear, tal como é visível na Equação 3.19 [41].

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (3.19)$$

A mesma não linearidade é igualmente visível no caso das medições, tal como se encontra representado na Equação 3.20.

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (3.20)$$

Como, na prática, os valores do ruído w_k e v_k não são conhecidos, são feitas as aproximações (\tilde{x}_k e \tilde{z}_k) representadas na Equação 3.21 e Equação 3.22:

$$\tilde{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \quad (3.21)$$

$$\tilde{z}_k = h(\tilde{x}_k, 0) \quad (3.22)$$

Onde \hat{x}_k é uma estimativa futura do estado (dum instante de tempo anterior de k).

Por isso, por forma a ser utilizado um EKF, estas equações devem ser primeiro linearizadas como referido num momento anterior. A linearização das mesmas pode ser representada com recurso à Equação 3.23 e Equação 3.24 [41].

$$x_k \approx \tilde{x}_k + \mathbf{A}_k(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + \mathbf{W}_k w_k \quad (3.23)$$

$$z_k \approx \tilde{z}_k + \mathbf{H}_k(x_k - \tilde{x}_k) + \mathbf{V}_k v_k \quad (3.24)$$

Após concluído este passo, é efetuado o cálculo do ganho do filtro \mathbf{K} que será necessário para o cálculo de uma nova estimativa do processo. Esta será obtida com recurso à Equação 3.25.

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + \mathbf{K}_k(z_k - h(\tilde{x}_k, 0)) \quad (3.25)$$

Este processo é feito de forma contínua e cíclica, com um funcionamento em tudo semelhante ao descrito anteriormente do KF. É importante notar que o EKF, devido a ser implementado com base em aproximações, não é um filtro ótimo. Outros aspetos a ter em conta consistem em: ao contrário do que acontece no KF, o EKF pode divergir caso as linearizações consecutivas não sejam uma boa aproximação do modelo e se o mapa for de grandes dimensões pode causar uma lentidão no processamento. Devido a estes possíveis problemas, é importante garantir que todo o processo de aplicação é executado com o maior rigor e cuidado [41].

No caso dos AGV é possível que os sensores não forneçam dados lineares, obrigando à utilização de um EKF em detrimento de um KF. Por exemplo, um sonar

pode fornecer ângulos que são não lineares sendo necessária a sua linearização com recurso à série de Taylor.

A sua utilização é imperativa em aplicações deste tipo, devido ao simples uso da odometria do veículo causar acumulação de erro ao longo do tempo. Estes erros podem ser sistemáticos, causados pela cinemática do veículo, ou não sistemáticos, onde as falhas podem surgir de fatores como a irregularidade do piso ou derrapagem das rodas [43]. Na Figura 3.13, é visível um esquema ilustrativo da utilização exclusiva da odometria.

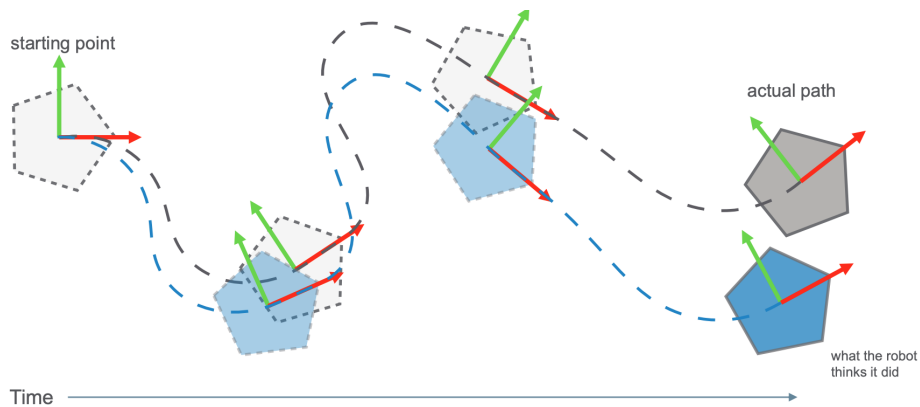


Figura 3.13: Posição do veículo ao longo do tempo - odometria [44]

Com a utilização de um EKF, juntamente com a odometria, são feitas medições ao longo do tempo contendo ruído (variações aleatórias) e outras imprecisões, produzindo valores que tendem a melhorar a estimativa de posição, como é demonstrado na Figura 3.14 [45].

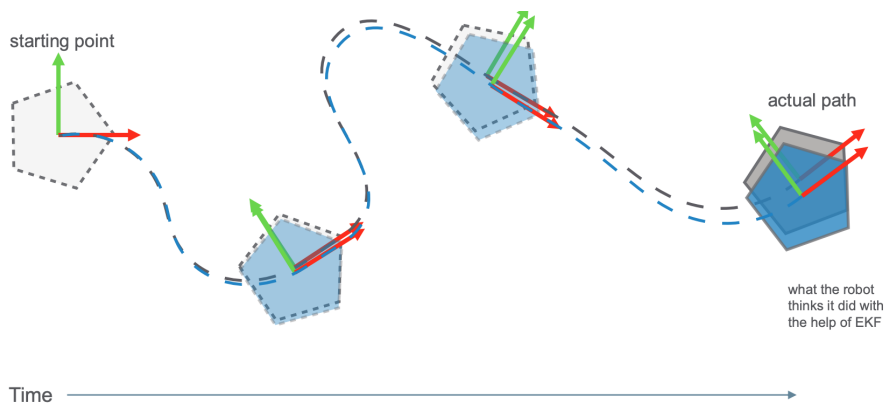


Figura 3.14: Posição do veículo ao longo do tempo - odometria com EKF [44]

3.5 Vantagens e Desvantagens

Com base no estudo realizado, é possível apontar algumas vantagens e desvantagens à utilização de um sistema com navegação natural. Estas encontram-se expostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens dos sistemas de navegação natural

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de instalação	Possíveis problemas em ambientes dinâmicos, devido à sua constante mudança
Não requerem qualquer tipo de infraestruturas externas	Implementação do veículo pode ser mais dispendiosa
Baixos custos de manutenção	
Capacidade de adaptação a novos ambientes	
Pode ser utilizado na maioria das aplicações	

Capítulo 4

Análise de Requisitos e Soluções

Neste capítulo são retratadas algumas das características pretendidas e, com base nestas, descritas as diversas soluções tidas em conta durante a fase inicial de projeto do AGV. Esta análise passa pelo estudo das soluções dos principais componentes a utilizar (sensores, controlador, baterias, motores, entre outros), por forma a justificar as opções tomadas.

4.1 Requisitos do Sistema

Previamente à análise das possíveis soluções, foi necessário definir os requisitos que o sistema deve conter para que cumpra os seus objetivos. Esta fase tem importância significativa pois permitiu um correto estudo de quais os componentes mais adequados ao seu funcionamento. Com o referido, a presente secção serve como exposição das principais características pretendidas e, como consequência destas, uma modelação que serviu de base para a escolha dos elementos participantes.

4.1.1 Características Pretendidas

A fase inicial de um projeto de um AGV pressupõe que sejam definidas as características pretendidas para o mesmo. Como seria de esperar, os valores inicialmente escolhidos são uma aproximação que ajudam na seleção dos componentes mais adequados e que contêm uma margem de segurança intrínseca. Uma avaliação mais precisa requer o conhecimento dos componentes a utilizar e até mesmo a sua implementação prática.

A Tabela 4.1¹ demonstra as características iniciais pretendidas para o veículo.

Tabela 4.1: Características pretendidas para o AGV

Características pretendidas para o AGV		Unidades
Massa (M) ²	2200	kg
Aceleração (a)	0,3	m/s ²
Velocidade máxima (v)	1,2	m/s
Coefficiente de resistência do rolamento (c_r)	0,007	-
Raio da roda (r_d)	100	mm
Número de rodas de tração	2	-
Inclinação máxima (α)	1	°

Importa referir que alguns dos dados apresentados apresentam designações para as variáveis que serão utilizadas em cálculos efetuados nas próximas secções.

Relativamente à sua estrutura, é apresentado na Figura 4.1 um esboço inicial do AGV. Este pressupõe uma configuração diferencial (a ser detalhada mais à frente), onde existem duas rodas responsáveis pelo movimento (rodas de tração) e quatro rodas omnidireccionais que servem para suportar o peso do veículo. As dimensões são de 2,0 x 1,1 m.

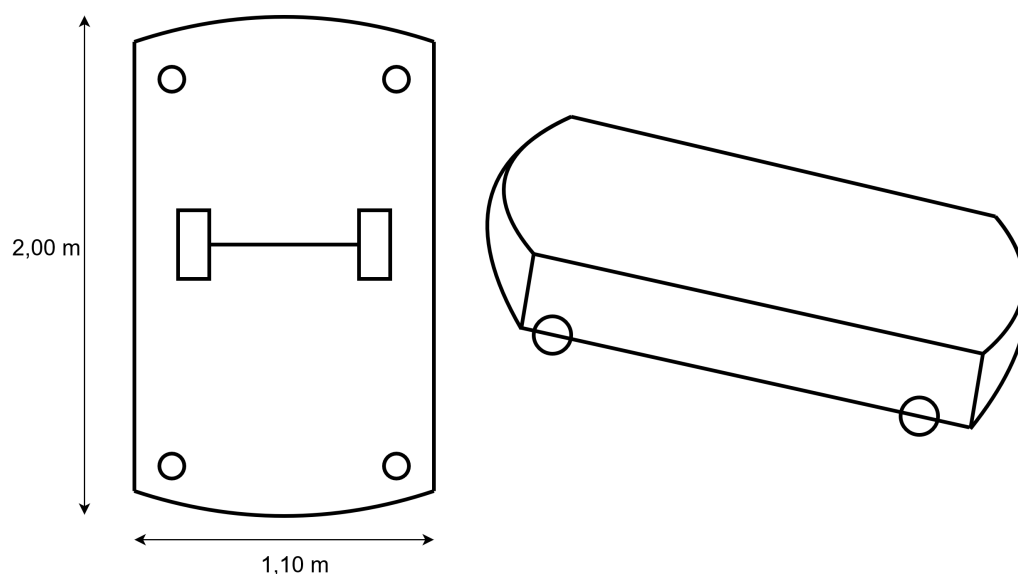


Figura 4.1: Esboço inicial do AGV

Este esboço possui um detalhe reduzido, daí servir apenas como referência para o modelo estrutural que se pretende para o AGV.

¹Coefficiente c_r fornecido pelo fornecedor das rodas utilizadas, para o típico pavimento fabril.

²Constituída pela massa do veículo + massa da carga desejada.

Nota importante vai para o facto da estrutura mecânica do protótipo conter unicamente duas rodas omnidireccionais, uma à frente e outra atrás, centradas.

4.1.2 Cinemática

Como demonstrado anteriormente através da Figura 4.1, a cinemática seleccionada para o veículo foi uma do tipo diferencial. Esta pressupõe duas rodas montadas num eixo comum, onde cada roda pode ser movida de forma independente para a frente ou para trás. Ao variar a velocidade das duas rodas consegue-se assim variar as trajetórias que o AGV toma.

Tendo em vista uma melhor compreensão deste assunto, é apresentada a Figura 4.2 que representa um veículo com cinemática diferencial, onde o *ICC* corresponde ao ponto sobre o qual o robô roda, ω a velocidade de rotação do veículo em torno do *ICC*, R a distância do *ICC* ao ponto médio entre rodas, l a distância entre o centro das duas rodas e v_d e v_e a velocidade da roda direita e esquerda, respetivamente.

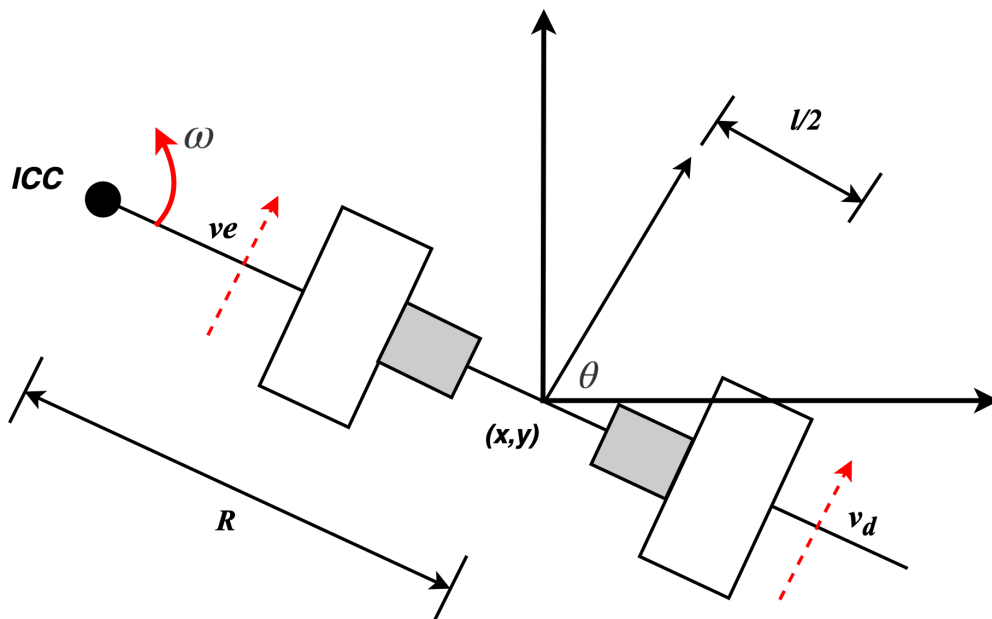


Figura 4.2: Cinemática diferencial

Analisando a Figura 4.2, é possível obter a Equação 4.1 e Equação 4.2, devido à velocidade de rotação do veículo em torno do *ICC* (ω) ser necessariamente a mesma para as duas rodas.

$$v_d = \omega(R + l/2) \quad (4.1)$$

$$v_e = \omega(R - l/2) \quad (4.2)$$

Também se deduz a Equação 4.3, representativa da distância R , e Equação 4.4 que permite o cálculo de ω .

$$R = \frac{l}{2} \frac{v_d + v_e}{v_d - v_e} \quad (4.3)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_e}{l} \quad (4.4)$$

As equações apresentadas permitem a análise de três principais casos distintos para uma cinemática deste tipo:

- $v_e = v_d \Rightarrow$ movimento linear em linha reta. R é infinito e como não há rotação, ω é zero;
- $v_e = -v_d \Rightarrow R = 0$, movimento em torno do ponto intermédio do eixo das rodas, ou seja, roda em torno de si próprio;
- $v_d = 0$ ou $v_e = 0 \Rightarrow$ rodam em torno da roda esquerda/direita ($R = l/2$).

Este tipo de cinemática tem a particularidade de não ter a possibilidade do movimento sobre o eixo que une as rodas (não se pode mover lateralmente). Também é muito sensível a variações de velocidade em cada uma das rodas, sendo que um erro nas respetivas velocidades pode levar a uma trajetória não pretendida do veículo.

4.1.3 Dimensionamento de Implementação Futura

No dimensionamento do veículo, o primeiro passo consistiu em considerar todo o tipo de forças a que este é sujeito (gravidade, atrito, entre outros), para depois ser possível a obtenção de parâmetros como a potência e o binário necessários. A Figura 4.3 representa as forças atuantes num veículo que se movimenta com uma dada inclinação α , velocidade (v) e onde F_r e F_w representam as forças de atrito e resistência aerodinâmica, respetivamente.

Um veículo tem que ter as características necessárias para:

- superar a resistência ao rolamento;
- superar a resistência aerodinâmica;
- superar o declive em que se movimenta;
- acelerar para atingir a velocidade desejada.

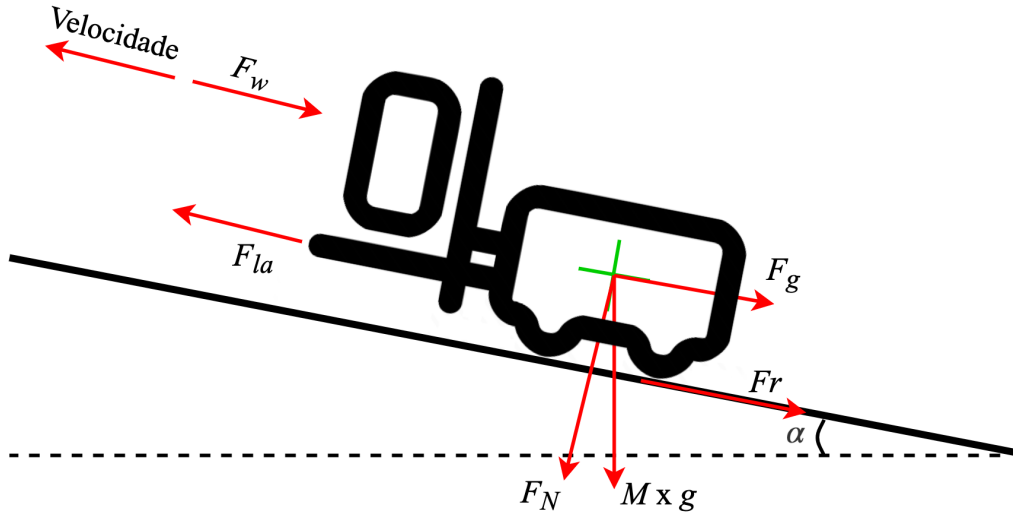


Figura 4.3: Diagrama de forças do veículo

A força de atrito (F_r) é a força que contraria o movimento do veículo, ou seja, que tem sentido contrário à velocidade do mesmo. Esta depende do tipo de solo, onde maior rugosidade implica maior atrito, e ainda da força normal à superfície de contacto. O cálculo desta componente pode ser conseguido com recurso à Equação 4.5, onde c_r ³ corresponde ao coeficiente de rolamento, g à aceleração da gravidade e F_N à força normal.

$$F_r = c_r F_N = c_r M g \cos(\alpha) \quad (4.5)$$

Relativamente à resistência aerodinâmica, esta é a força (F_w) que o veículo encontra no ar e que se opõe ao seu movimento, dependendo essencialmente de dois fatores: forma do veículo e resistência da pressão. O valor desta componente pode ser obtido com recurso à Equação 4.6.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_A A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (4.6)$$

, onde ρ_A corresponde à densidade do ar, A_f à área frontal do veículo, C_D ao coeficiente de resistência aerodinâmica e V_w à velocidade do ar.

Neste caso, e devido ao AGV operar maioritariamente num ambiente fechado, esta componente será desprezada.

Quando um veículo se encontra num plano inclinado existe sempre uma componente que se opõe ao movimento (veículo a subir) ou ajuda no mesmo (veículo

³Diversos valores para este coeficiente podem ser encontrados no Anexo A na Tabela A.1

a descer), sendo para efeitos práticos considerada apenas a primeira situação. Esta é a força originada pela inclinação (F_g), e pode ser representada através da Equação 4.7.

$$F_g = Mgsin(\alpha) \quad (4.7)$$

Para o veículo atingir a velocidade pretendida, é necessária a aplicação de uma força que cumpra este objetivo, a força de aceleração linear (F_{la}). Esta é dada pela segunda lei de Newton, como demonstrado através da Equação 4.8.

$$F_{la} = Ma \quad (4.8)$$

Com as principais forças que afetam o veículo descritas, pode-se obter a Equação 4.9 que representa a força necessária a aplicar para que o veículo se movimente de acordo com as especificações.

$$F_t = F_{la} + F_r + F_w + F_g \quad (4.9)$$

Daqui é possível obter o binário necessário (T_t), onde r_d representa o raio da roda, e ainda a potência (P_t). Estas grandezas são obtidas com recurso à Equação 4.10 e Equação 4.11, respetivamente.

$$T_t = r_d F \quad (4.10)$$

$$P_t = F_t v \quad (4.11)$$

Baseado em todas as componentes demonstradas, e nas características pretendidas apresentadas na Tabela 4.1, foi possível obter os valores da Tabela 4.2⁴. Os respetivos cálculos foram conseguidos com recurso a um documento Excel, como é demonstrado no Anexo B, que possibilitava o ajuste de parâmetros e consequente obtenção das características, tendo por base os mesmos.

Estes valores serviram como ponto de partida para a análise de soluções efetuada, salientando que não é necessário ao AGV possuir exatamente as características calculadas. Por exemplo, a rotação máxima do motor apresentada na Tabela 4.2, não considera a utilização de uma caixa redutora à saída do motor. Outras considerações devem ser tidas em conta, como por exemplo incluir um fator de segurança ou o rendimento do sistema, o que terá influência na escolha dos componentes apresentada no próximo capítulo.

⁴A força F_w , relativa à resistência aerodinâmica, foi desprezada devido a ter uma influência reduzida face às restantes componentes, simplificando assim os cálculos.

Tabela 4.2: Resultados da modelação efetuada

Componente	Valor	Unidade
Força de atrito (F_r)	151,05	N
Força da gravidade (F_g)	376,66	N
Força da aceleração (F_{la})	660,00	N
Força total (F_t)	1187,71	N
Binário total na roda (T_t)	118,77	N.m
Potência mecânica total (P_t)	1425,25	W
Rotação máxima na roda	114,59	rpm

4.1.4 Dimensionamento do Protótipo

Já foi referido, que a estrutura mecânica do protótipo difere da pretendida numa implementação futura, no sentido que possui menos duas rodas omnidirecionais. No entanto, algumas das outras características como a massa e o raio da roda também diferem, como é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Características do protótipo

Características do protótipo		Unidades
Massa (M)	200	kg
Aceleração (a)	0,3	m/s ²
Velocidade máxima (v)	1,2	m/s
Coefficiente de resistência do rolamento (c_r)	0,007	-
Raio da roda (r_d)	55	mm
Número de rodas de tração	2	-
Inclinação máxima (α)	1	°

Estas alterações, em particular a massa, levam a que as exigências em termos de forças, potências e binário sejam bastante reduzidas em comparação com o apresentado anteriormente na Tabela 4.2, e como é verificável através da Tabela 4.4.

Ressalvar que o dimensionamento dos componentes será realizado tendo sempre em vista a implementação futura, ou seja, será baseado nos dados da Tabela 4.2. Assim, salvo algumas exceções justificadas mais à frente, a grande maioria dos componentes selecionados encontram-se prontos para serem utilizados futuramente.

Tabela 4.4: Resultados da modelação efetuada - protótipo

Componente	Valor	Unidade
Força de atrito (F_r)	13,73	N
Força da gravidade (F_g)	34,24	N
Força da aceleração (F_{la})	60,00	N
Força total (F_t)	107,97	N
Binário total na roda (T_t)	5,94	N.m
Potência mecânica total (P_t)	129,57	W
Rotação máxima na roda	208,35	rpm

4.2 BlueBotics


A BlueBotics é uma empresa que oferece soluções, com o nome de *Autonomous Navigation Technology* (ANT), que permitem simplificar e encurtar o período de instalação dos AGV, que pretendem navegar naturalmente. Possui uma precisão de localização até ± 1 cm e $\pm 1^\circ$, conseguida através da informação proveniente dos *scanners* e dos restantes sensores do sistema. O ANT implementa um EKF, que juntamente com a odometria do veículo torna a estimativa de posição bastante precisa, mesmo em ambientes dinâmicos. Para efeitos de comparação com outras soluções do mercado, a BlueBotics disponibiliza os dados da Figura 4.4 [46].

	ANT®	Laser-guided	Magnets & Gyro	Wire-guided
Installation/modification	+	=	-	-
Precision	+	+	=	=
Speed	+	+	=	-
Manual/automatic	+	+	-	-
Cost of infrastructure	+	=	=	-
Cost of maintenance	+	+	=	=

+ Positive = Neutral - Negative

Figura 4.4: Comparação entre sistemas de navegação [46]

De maneira a existir uma maior flexibilidade no que toca à utilização de ANT, a BlueBotics oferece cinco soluções, representadas na Figura 4.5, adaptadas à necessidade de cada cliente. Cada uma destas contém características próprias que devem ser avaliadas para que seja realizada uma escolha apropriada à aplicação e bom funcionamento do AGV.



	ANT® lite+	ANT® lite	ANT® localization+	ANT® localization	ANT® navigation
Localization	✓	✓	✓	✓	✓
Control	✓	✓	✗	✗	✓
Embedded missioning management	✓	✗	✗	✗	✓
Emulation of line following	✗	✗	✓	✗	✗
Fleet management	✓	✗	✗	✗	✗

Figura 4.5: Soluções ANT da BlueBotics [46]

Foi decidido, em conformidade com a equipa de trabalho, que a implementação do veículo seria baseada em umas de duas das soluções oferecidas: ANT localization ou ANT lite+.

4.2.1 ANT localization

A primeira é uma solução mais limitada que requer que o controlo do AGV seja feito com recurso a um controlador, por exemplo um *Programmable Logic Controller* (PLC), e *software* externo. Esta simplesmente recebe os dados dos sensores e retorna as coordenadas da posição do veículo. Por isso, esta solução é considerada a indicada para clientes que tenham o seu próprio sistema de controlo. Um esquema simplificado, dos componentes que esta solução requer encontra-se apresentado na Figura 4.6

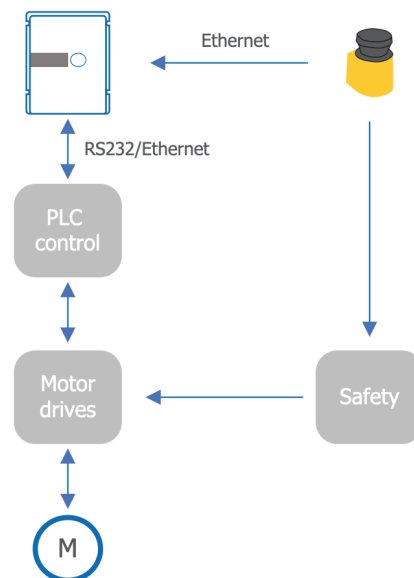


Figura 4.6: Componentes do veículo - ANT localization [46]

Os dados provenientes dos sensores são enviados para o sistema de segurança e também para o ANT localization. Este efetua a conversão dos dados recebidos nas coordenadas da posição do veículo, e envia estes valores para um PLC, que controla juntamente com os *drivers* os motores do veículo. Importante salientar que, em todas as soluções da BlueBotics, os *drivers* dos motores e sensores utilizados têm de estar em conformidade com o permitido pela marca.

4.2.2 ANT lite+

O ANT lite+ é uma solução que dispõe de um maior número de funcionalidades, efetuando o cálculo da posição, controlo, interface com os sensores de segurança, e gestão da missão do veículo (ou seja, começar aqui, dirigir até aquele ponto, abrir a porta, entre outros). Adicionalmente, fornece um conjunto de Entradas/Saídas (E/S) para serem utilizadas consoante a necessidade do cliente. À semelhança do caso anterior para o ANT localization, também se pode observar através da Figura 4.7 um esquema resumido dos componentes necessários.

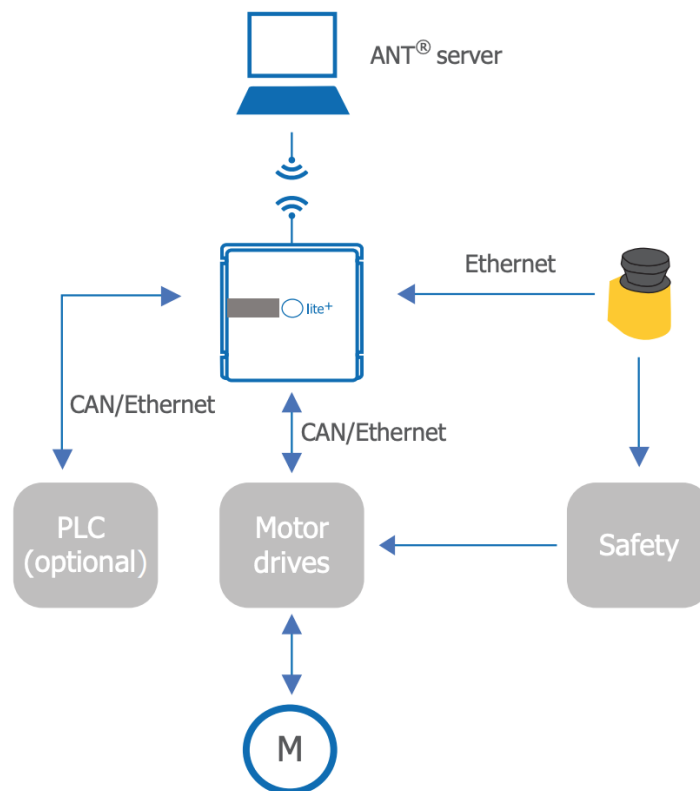


Figura 4.7: Componentes do veículo - ANT lite+ [46]

Aqui, de destacar que a principal diferença em relação à solução anterior, como referido, consiste na não obrigatoriedade da utilização de um PLC para

controle. O PLC pode ser reservado para efetuar outras tarefas, como o controle de tarefas inerentes à aplicação do AGV.

Esta solução requer que seja utilizado um *software* desenvolvido pela BlueBotics, com o nome de ANT lab, que serve para instalação e configuração do veículo. Também, de forma opcional, pode ser usado um outro *software*, com nome ANT server, que permite a gestão de uma frota de AGV e também a monitorização de certos parâmetros, como por exemplo o estado da bateria, tempo de execução do ciclo e estatísticas da navegação.

4.2.3 Solução Adotada

A solução ANT localization exigiu o contacto com empresas que fornecessem um *software* de navegação natural (referidos alguns exemplos na Secção 4.6), tendo sido requisitado um orçamento para uma solução em específico, apresentada mais à frente. Em conjunto com a equipa de trabalho, e após uma conferência com a BlueBotics onde foram apresentados os seus produtos, ficou decidido que a solução ANT lite+ seria a mais adequada, e ao mesmo tempo mais acessível, tendo em conta a aplicação pretendida.

4.3 Sensores de Mapeamento

Num AGV, os sensores, neste caso *scanners* laser, devem ser capazes de efetuar três funções:

- **localização** - o sensor fornece uma imagem do ambiente ao ANT lite+, para localização do AGV no mapa;
- **navegação** - o sensor é utilizado pelo algoritmo de navegação do ANT lite+ para abrandar em frente de objetos e parar antes que os sistemas de segurança sejam ativados. Isto permite uma operação suave do veículo em ambientes dinâmicos;
- **segurança** - se o sensor for classificado como de segurança, e estiver bem posicionado e configurado, pode ativar mecanismos de segurança do AGV (como uma travagem de emergência).

O ANT lite+ é compatível com sensores laser (LiDAR) classificados como contendo funções de segurança ou não, tal como é referenciado no seu *datasheet*. Normalmente, caso se opte pela utilização de um sensor laser sem segurança, é necessária a adição de um mecanismo que a forneça, podendo este ser um sensor de laser de segurança.

4.3.1 Sensor Laser

Como referido, a BlueBotics suporta sensores laser que não sejam classificados como segurança. As opções fornecidas pela BlueBotics, e algumas das suas características mais relevantes, podem ser encontradas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Sensores sem mecanismos de segurança compatíveis com ANT lite + [47]

Fornecedor	Referência	Características			
		Campo de visão	Alcance	Ar livre	Resumo
Pepperl & Fuchs	OMD30M-R2000-B23-V1V1D-HD-1L	360°	30 m	Não	Melhor qualidade dados, campo de visão 360°
	OMD30M-R2000-B23-V1V1D-1L	360°	100 m	Não	Grande alcance, campo de visão 360°
SICK	LMS10x	270°	25 m	Não	Boa qualidade dados
	LMS151	270°	50 m	Sim	Bom alcance e qualidade dados
	LMS141	270°	40 m (30 m no escuro)	Sim	Bom alcance no escuro
	TiM571	270°	25 m	Sim	Muito compacto, melhor na relação qualidade - preço
	LMS5xx	190°	80 m	Sim	Grande alcance, melhor qualidade de dados

Estes sensores são LiDAR, uma tecnologia amplamente utilizada nos AGV, e que foi falada na Subsecção 3.2.1. Importa referir que estes não são os únicos sensores compatíveis com o ANT lite+, sendo que caso o cliente pretenda utilizar um modelo específico, deve contactar a BlueBotics para verificar a sua compatibilidade.

4.3.2 Sensor Laser de Segurança

Outra alternativa consiste na utilização de sensores que contenham mecanismos que permitam a sua utilização como dispositivos de segurança. Estes podem ser unicamente utilizados como forma de proteção do veículo, ou adicionalmente fornecer uma opção de mapeamento. Sensores deste tipo possuem zonas de proteção/aviso (Figura 4.8), configuráveis através de interfaces próprias, e que devem ser ajustadas consoante a aplicação e operação atual.

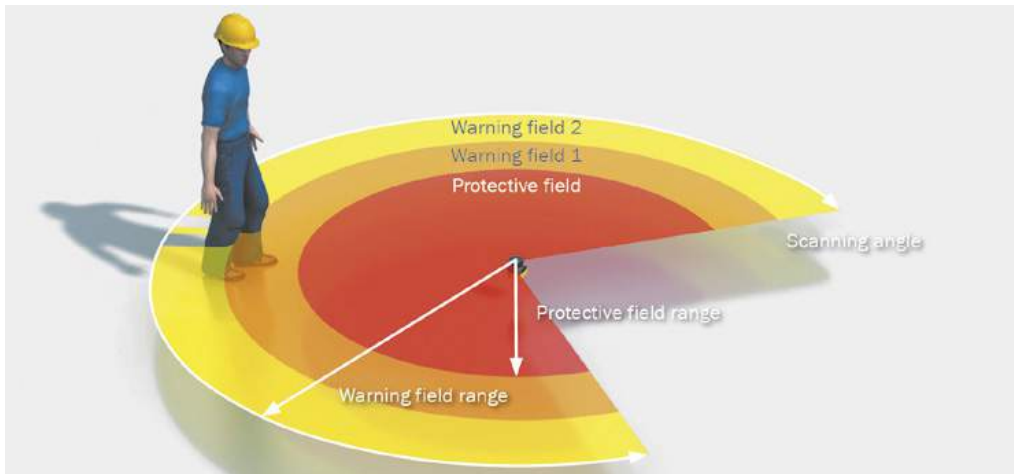


Figura 4.8: Campos de proteção de sensores de segurança [48]

Relativamente aos sensores de segurança suportados pela BlueBotics, estes são os apresentados na Tabela 4.6, salientando que caso se pretenda a utilização de um sensor não listado a sua compatibilidade deve ser verificada com a BlueBotics.

Tabela 4.6: Sensores de segurança compatíveis com ANT lite + [47]

Fornecedor	Referência	Características		
		Campo de visão	Alcance	Resumo
Hokuyo	UAM-05 LP	270°	40 m	Muito compacto e leve
OMRON	OSC32C-DM	270°	50 m	Compacto, bom alcance e dados com grande qualidade
Leuze	RSL4xx	270°	65 m	Melhor alcance e dados com melhor qualidade
SICK	S300 Expert	270°	30 m	Interface Flexi Soft (SICK), imune a poeira, alcance curto
	S3000 Expert	190°	49 m	Interface Flexi Soft (SICK), imune a poeira, baixo campo visão
	microScan3	275°	64 m	Mais robusto, interface Flexi Soft (SICK), imune a poeira, melhor alcance

4.4 Motores

Previamente à escolha de qual o tipo de motor mais adequado, foi necessário efetuar uma análise das diversas opções existentes no mercado, nomeadamente os motores de corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) e passo-a-passo.

Para facilitar a compreensão, é apresentado o diagrama da Figura 4.9 que representa as soluções analisadas.

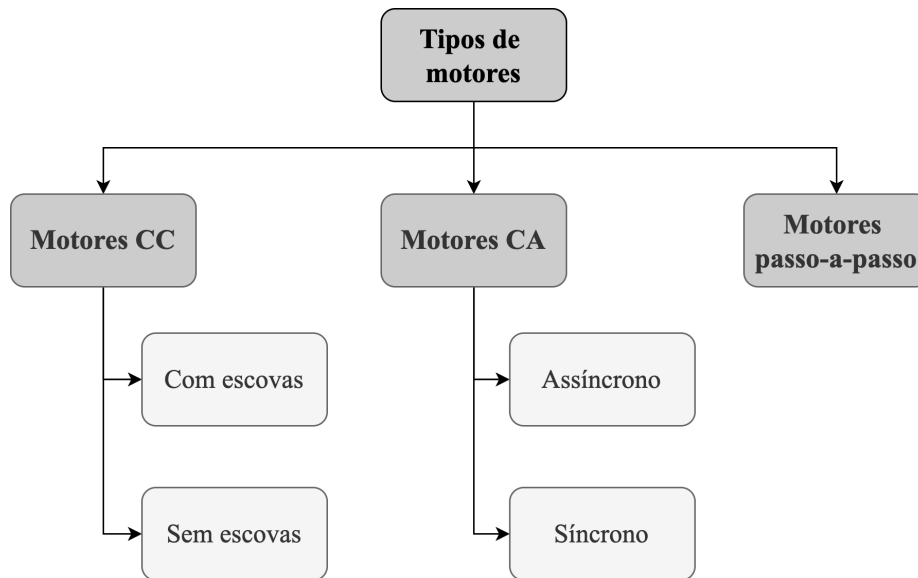


Figura 4.9: Tipos de motores elétricos

Cada um dos tipos de motores referidos tem as suas vantagens e desvantagens, que serão analisadas e colocadas em perspectiva, por forma a justificar a escolha efetuada. De salientar que, à semelhança do mencionado na análise dos sensores, existe a necessidade de verificar a compatibilidade dos *drivers* dos motores com o ANT lite+. No entanto, ao contrário do que acontece com os sensores, existe uma possibilidade de utilizar o PLC do veículo para troca de dados entre os motores e o ANT lite+. Isto permite uma maior flexibilidade na escolha destes componentes, não limitando o cliente a soluções que requeiram compatibilidade com o controlador.

4.4.1 Motores CC

Um motor CC é uma máquina elétrica que converte corrente elétrica contínua em movimento mecânico. Até ao final dos anos 80, estes eram a escolha predominante em aplicações que exigissem o controlo da velocidade ou binário do sistema, tendo desde então tido concorrência de outros tipos de motores, como os de CA. A sua área de aplicação vai desde pequenas aplicações robóticas até sistemas que necessitem de grandes potências, demonstrando a sua versatilidade [49].

Os motores de corrente contínua mais comuns são os com ou sem escovas, sendo estes o alvo de análise. Apesar do seu princípio físico ser semelhante, a sua construção, desempenho, características e tipo de controlo são bastante distintos.

Motores CC com Escovas

Inventados no século XIX, foram o primeiro tipo de motores utilizados em larga escala. A sua constituição básica é composta por uma armadura (rotor), comutador, escovas, eixo, campo magnético e fonte de energia.

A função do estator é gerar um campo magnético através de, por exemplo ímanes permanentes, que percorre o rotor. Por sua vez, o rotor é constituído por um ou mais enrolamentos que quando excitados produzem um campo magnético. Os pólos magnéticos deste serão atraídos aos pólos opostos gerados pelo estator - pólos norte e sul do rotor alinham-se com os pólos sul e norte do estator, respetivamente - fazendo com que o rotor gire. O sentido de rotação pode ser facilmente alterado invertendo a polaridade das escovas, ou seja, invertendo a alimentação [50].

Usualmente são motores de média potência, com custo reduzido e controlo simples. No entanto, como contrapartida, incluem componentes que se desgastam (escovas) o que requer uma manutenção que pode ser dispendiosa [50].

Motores CC sem Escovas

A diferença mais evidente entre este tipo de motor e o anterior é o facto de este não possuir escovas. No entanto as diferenças entre configurações são bastante mais profundas. Os motores sem escovas são um tipo de motor síncrono, ou seja, o rotor e o estator rodam à mesma frequência. Ao contrário do tipo de motor apresentado anteriormente, aqui o íman permanente é montado no rotor (número de par de pólos entre 2 e 8, colocados de forma alternada) e o estator contém os enrolamentos da bobina [50].

As suas vantagens vão desde a sua enorme eficiência, potência, componentes que não se desgastam, longo tempo de vida operacional, aplicações sem ruído, entre outras. Apesar disto, estes motores são bastante dispendiosos, não justificando sempre a sua utilização em detrimento de outros.

4.4.2 Motores CA

A principal característica que permite distinguir um motor CA dum de CC é o tipo de alimentação. No entanto as suas diferenças estendem-se para além do referido. Desde logo, uma diferença fundamental, é o facto do controlo do motor CA ser conseguido através da variação da frequência, tensão e número de pólos, ao contrário do motor de CC onde a tensão e a corrente são os parâmetros utilizados.

Existem dois tipos fundamentais de motores CA: motores assíncronos (ou de indução) e motores síncronos. A diferença entre estes prende-se essencialmente com a diferença entre a velocidade de sincronismo (velocidade do campo magnético) e a velocidade a que o rotor se move. No caso dos motores de indução, existe

uma diferença entre as duas que origina um fator denominado de “deslizamento”. Por sua vez, nos motores síncronos a diferença entre as duas velocidades é nula, ou seja, a velocidade do rotor do motor é a mesma que a do campo magnético.

Motores CA Assíncronos

O seu princípio de funcionamento baseia-se na alimentação do estator com um sistema de correntes alternadas, surgindo no entreferro um campo magnético girante com amplitude e velocidade constante. Este campo magnético vai, por sua vez, induzir um campo magnético no rotor que será responsável pela produção de binário. Tem-se assim uma velocidade associada ao campo magnético (velocidade de sincronismo) e outra associada ao deslocamento do rotor (velocidade do motor), sendo a diferença entre estas chamada de deslizamento. Importante referir que a velocidade do campo magnético (ou de sincronismo) é fixa, ao contrário da velocidade do motor que varia consoante a carga a que este é sujeito [51].

Atualmente, a grande parte dos motores utilizados na indústria são motores de indução, ressaltando algumas das suas vantagens: construção simples, robustos a operação em condições adversas, baixos custos de manutenção; no entanto, como todos os sistemas também apresentam algumas desvantagens como a dificuldade de controlo da velocidade [51].

Motores CA Síncronos

Neste tipo de motores, a alimentação do estator é conseguida através de correntes alternadas levando à origem de um campo magnético girante, ao contrário do rotor onde os enrolamentos são sujeitos a uma tensão contínua. A interação entre os campos magnéticos gerados levará a que estes se alinhem levando a que girem à mesma velocidade, ou seja em sincronismo com a frequência aplicada. Por isso, a velocidade de um motor síncrono depende da frequência aplicada e do número de par de pólos presentes [51].

Geralmente este tipo de motores é usado quando se necessita de velocidades estáveis, sob a ação de cargas variáveis, e ainda elevadas potências com binário constante. Como desvantagens aponta-se a necessidade de uma fonte de corrente contínua externa (para alimentar o rotor), maior custo e ainda a dificuldade de variação de velocidade (necessidade de um *driver* para ajuste de frequência) [51].

4.4.3 Motores Passo-a-Passo

Nos motores deste tipo, são fornecidos impulsos elétricos ao terminais, levando a que este rode com um determinado ângulo ou posição fixos. Se o ângulo por cada passo for menor, maior será o número de passos por rotação e, conseqüentemente, melhor a resolução do motor.

A direção da rotação do eixo depende da sequência dos impulsos aplicados ao estator. Já a velocidade é proporcional à frequência de impulsos aplicados, sendo

que quanto maior for esta última, mais rápido o motor se moverá entre passos [52].

As suas vantagens prendem-se com uma boa flexibilidade, baixo custo, excelente repetibilidade e ainda o ângulo de rotação ser proporcional ao número de impulsos (o que facilita o controlo do mesmo). Como desvantagens tem-se a sua baixa eficiência, resolução depende do número de passos, declínio rápido do binário com a velocidade e o facto de serem ruidosos [52].

Com tudo o referido, geralmente este tipo de motores são utilizados em aplicações que necessitem de um posicionamento preciso, controlo de velocidade e um binário satisfatório a baixas velocidades - como por exemplo, fotocopiadoras e impressoras [52].

4.4.4 Resumo de características

Baseado em toda a informação retirada da análise de soluções efetuada, tornou-se possível construir a Tabela 4.7, que representa as vantagens/desvantagens e diversas aplicações dos motores estudados.

Tabela 4.7: Resumo de características dos motores elétricos

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Motores CC sem escovas	<ul style="list-style-type: none"> - Maior potência - Maior eficiência - Não contém componentes que desgastam 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior custo 	<ul style="list-style-type: none"> - Operações com elevado peso e que requeiram grande eficiência - >2000 horas de vida operacionais
Motores CC com escovas	<ul style="list-style-type: none"> - Média potência - Menor custo - Controlo simples 	<ul style="list-style-type: none"> - Inclui componentes que se desgastam (escovas) - Maior custo de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicações simples e de baixo custo - <2000 horas de vida operacionais
Motores CA assíncronos	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de manutenção - Construção simples - Operação em condições adversas 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade no controlo de velocidade - Ocupam grande espaço 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicações para as quais peso e eficiência não são críticos - >2000 horas de vida operacionais
Motores CA síncronos	<ul style="list-style-type: none"> - Elevadas potências com binário constante - Estabilização da velocidade a variações de carga 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de fonte externa para alimentação do rotor - Maior custo - Dificuldade de variação da velocidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de velocidades estáveis, sobre condições de carga variáveis
Motores passo-a-passo	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidade - Baixo custo - Excelente repetibilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa eficiência - Resolução depende do número de passos - Por vezes ruidoso 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicações específicas de baixa potência e com posicionamento preciso

4.5 Sistemas de Carregamento

A definição do sistema de carregamento é parte fulcral no funcionamento de qualquer veículo. Este implica a escolha de três componentes principais: bateria,

método de carregamento e esquema de carregamento. Na presente secção serão analisadas as soluções para as duas primeiras referidas, sendo que o esquema de carregamento a utilizar será descrito numa fase mais adiantada onde o funcionamento do AGV será descrito com maior pormenor.

4.5.1 Baterias

Como foi apresentado na Secção 2.2, existem diversos tipos de AGV sendo que a grande maioria possui baterias, mas também existindo uns que utilizam *Diesel*. Sendo assim, e devido à sua predominância de utilização face a outras soluções, na presente secção são expostos alguns dos tipos de baterias existentes e respetivas características, tal como é apresentado na Tabela 4.8⁵.

Tabela 4.8: Resumo de características das baterias - baseado em [53] e [4]

Tipo de bateria	Chumbo-ácido	Níquel-cádmio	Níquel-hidreto-metálico	Iões-lítio
Energia específica (Wh/kg)	35-50	50-60	70-95	100-265
Densidade energética (Wh/L)	54-95	70-90	~150	250-290
Potência específica (W/kg)	150-400	80-150	200-300	300-1500
Custo por kWh (\$S)	120-150	250-350	200-350	300-1000
Número de ciclos	500-1000	800	750-1200	1000
Tempo de recarregamento	~8 horas	~1 hora	~1 hora	~2-3 horas
Efeito de memória	Não	Sim	Sim	Não

Bateria de Chumbo-ácido

Foram instaladas em quase todos os tipos de veículos fabricados no século passado, por provarem ser um método económico de armazenamento de energia para arranque de veículos [54]. As suas vantagens prendem-se com o seu baixo custo, boa potência específica e o facto de não serem sujeitas ao efeito de memória⁶. Relativamente às desvantagens, estas possuem uma baixa densidade energética, o seu funcionamento a temperaturas baixas é comprometido (a sua potência e energia específica são reduzidas nestas condições), o que limita a sua

⁵Importante referir que esta informação serve apenas para efeitos de comparação, não implicando que as características apresentadas sejam sempre verificadas em dado tipo de bateria, devido à constante evolução nesta área.

⁶O efeito de memória é verificado em certos tipos de baterias e leva a que estas armazenem cada vez menos carga. Esta situação ocorre quando as baterias são carregadas antes de estarem totalmente descarregadas, levando a que a bateria “memorize” uma capacidade menor

utilização em climas com baixas temperaturas, e ainda o facto de serem tóxicas para o ambiente devido ao chumbo [53].

Bateria de Níquel-cádmio

Possuem maior densidade energética e energia específica do que as baterias à base de chumbo-ácido, conforme apresentado na Tabela 4.8. Estas foram utilizadas em veículos elétricos até a década de 1990, oferecendo a tecnologia mais adequada na época, no entanto a um preço bastante elevado. Como possuem uma elevada quantidade de cádmio estas baterias são prejudiciais ao ambiente, sendo mesmo proibidas em certas aplicações [55].

Bateria de Níquel-hidreto-metálico

As baterias de níquel-hidreto-metálico são semelhantes às baterias de níquel-cádmio, exceto que um eléctrodo negativo de absorção de hidrogénio é usado em vez do eléctrodo à base de cádmio. Isso elimina o cádmio, um material tóxico, e aumenta a capacidade elétrica da bateria. Outro fator a considerar é o facto de este tipo de baterias sofrer do efeito de memória, o que em muitos casos é uma desvantagem considerável [53].

Bateria de Iões-lítio

As baterias de iões-lítio apresentam alta densidade de energia, alta potência específica e longa vida útil, tal como os dados da Tabela 4.8 corroboram. São baterias com baixo peso e boa duração, características que facilitaram um avanço notável na utilização de dispositivos portáteis, como por exemplo telemóveis. A sua aplicação emergente em veículos elétricos e sistemas de armazenamento em larga escala torna-as uma solução promissora para os desafios de preservação ambiental e conservação de recursos [56]. Apesar das suas vantagens evidentes, estas são consideravelmente mais dispendiosas que as outras soluções apresentadas, fator a considerar no projeto de um AGV [53].

4.5.2 Método de Carregamento

Após selecção da bateria, será necessário determinar a forma como se procede o seu carregamento, ou seja, o método utilizado. As diversas soluções existentes já foram apresentadas anteriormente na Subsecção 2.6.1, no entanto é importante detalhar um pouco mais as diferenças existentes.

A questão colocada foi a comparação entre a utilização de um método com contacto, ou um que efetue a transferência de energia sem contacto, descartando a utilização de um método híbrido. Uma comparação entre as duas alternativas analisadas pode ser encontrada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Comparação entre métodos de carregamento - baseado em [57]

Transferência de energia	Vantagens	Desvantagens
Com contacto	<ul style="list-style-type: none"> - Projeto simples - Custo inferior - Maior eficiência - Carregamento mais rápido 	<ul style="list-style-type: none"> - Gestão dos cabos - Menos seguros - Menor facilidade de integração - Processo de carregamento mais complexo
Sem contacto	<ul style="list-style-type: none"> - Não utiliza cabos - Melhor segurança - Facilidade de integração - Processo de carregamento amigável 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo superior - Menor eficiência - Velocidade inferior de carregamento

Não parece existir dúvida que a transferência de energia sem contacto é o futuro, no entanto é uma solução mais dispendiosa e que nem sempre se justifica. A sua eficiência e velocidade de carregamento são inferiores quando comparadas com um método com contacto, no entanto a sua diferença tende a ser cada vez mais desprezável ao longo do tempo. Isto, juntamente com fatores como a facilidade de integração e um processo de carregamento mais amigável podem no entanto justificar a sua utilização [57].

4.6 Soluções de Software

Existem diversas empresas que oferecem soluções de *software*, por forma a serem efetuadas as configurações e programação de um sistema de navegação natural. Na presente secção serão resumidamente apresentadas algumas das analisadas e as respetivas empresas que as fornecem.

4.6.1 SEW-Eurodrive

A SEW-Eurodrive é uma empresa familiar que tem a sua sede em Bruchsal, na Alemanha, e que ficou conhecida pelo fabrico de motores elétricos. No entanto, atualmente oferece uma vasta gama de serviços em diversos pontos do continente, dentro dos quais se destaca o seu trabalho com AGV.

Um dos seus serviços relacionados com estes veículos é o seu *software*, que permite a implementação de um sistema de navegação natural. Segundo a sua página web [58] este permite:

- planeamento abrangente de veículos e plantas fabris;
- simulação de fluxo materiais;

- inicialização virtual;
- controlo inteligente das máquinas.

Tudo isto permite a redução da complexidade, custos, distâncias percorridas e ainda uma fácil implementação de novos conceitos caso, por exemplo, existam alterações ao ambiente em que os veículos operam.

4.6.2 Navitec

A Navitec é uma empresa fundada em 1998 que se dedica ao desenvolvimento de sistemas com navegação natural. Esta afirma ser pioneira e líder mundial no que toca a este tipo de navegação, tendo os seus sistemas a operar em 30 diferentes tipos de veículos em todo o mundo. Garantem ainda que o tempo de instalação é curto devido aos avançados algoritmos de mapeamento altamente automatizados e ao *design* eficiente de rotas [59].

Segundo o seu *website* [59], o seu *software* oferece:

- navegação precisa dos AGV em ambientes em constante mudança;
- utilização em qualquer tipo de veículo;
- rápido e avançado sistema de mapeamento;
- controlo de frota de AGV;
- aplicável a qualquer área.

4.6.3 Kollmorgen

Uma empresa que se classifica como sendo especialista em movimento é a Kollmorgen. Esta fornece soluções relacionadas com a automação de infraestruturas, sendo uma destas o fornecimento de AGV e respetivo *software*. Através da sua página *web* [60] é possível verificar as seguintes funcionalidades oferecidas:

- gestão de tráfego e de frotas;
- Projeto de *layout* fabril;
- implementação de sistema de navegação;
- controlo de direção;
- gestão de carga.

4.6.4 Wewo Techmotion

Outra empresa que oferece uma solução de *software* para utilização com um AGV é a Wewo Techmotion. Esta identifica-se da seguinte forma: “WEWO Techmotion quer ser o seu fornecedor e parceiro inovador nas áreas de logística interna e automação. Estamos a inovar continuamente para atingir esse objetivo. Dessa forma, podemos acompanhar e permanecer à frente do mercado em rápida mudança com os nossos veículos guiados automaticamente, transporte elétrico e soluções especiais” [61].

Como referido, a Wewo oferece diversas soluções para AGV dentro das quais as suas relacionadas com *software* [61]:

- **gestão de frota** - o *software* de gestão de frota contém todas as ferramentas necessárias para a gestão de uma frota de AGV em armazéns, ambientes de produção, entre outros;
- **sistema de navegação** - este *software* de navegação é especialmente desenhado para veículos com sistemas de navegação natural, garantindo que todas as configurações possam ser instaladas e mantidas com facilidade e eficiência;
- **mapeamento do ambiente** - com este *software* é possível configurar os veículos e fazer um mapeamento do ambiente, permitindo ainda a criação de rotas.

Importante salientar que esta secção serve meramente como uma pequena introdução a algumas das diversas ferramentas disponíveis para a programação e configuração de AGV com navegação natural. Para efetuar uma comparação precisa, seria necessário adquirir os *softwares* e testá-los, apontando depois as vantagens/desvantagens de cada um destes.

4.7 Solução Alternativa - Fornecedor

Alternativamente à solução ANT lite+ oferecida pela BlueBotics, foi considerada uma proposta efetuada por um fornecedor alternativo. Esta era baseada na solução ANT localization (descrita na Secção 4.2.1), onde toda a parte de controlo e posicionamento do veículo seria efetuada com recursos a um sistema próprio da marca. O diagrama de blocos da Figura 4.10, que tem por base o diagrama da Figura 4.6, representa o esquemático da solução proposta.

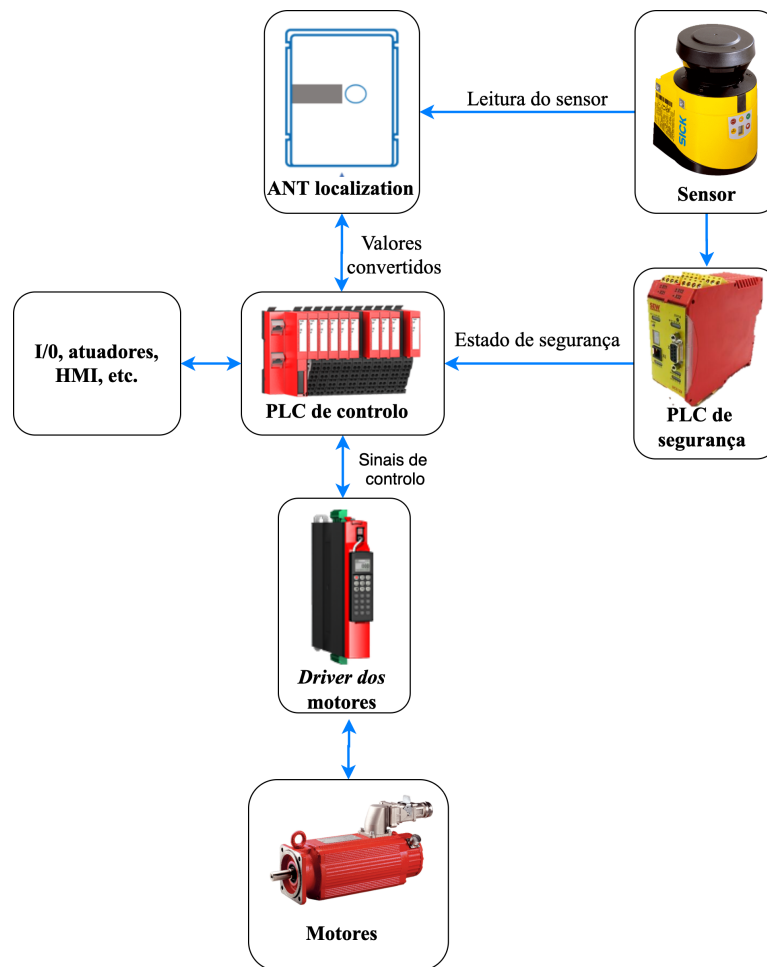


Figura 4.10: Diagrama de blocos da solução alternativa

Relativamente à parte de controlo é utilizado o ANT localization que, como mencionado anteriormente aquando da descrição do módulo, faz a conversão dos dados provenientes do sensor na posição do veículo. Neste caso, seriam utilizados dois sensores SICK S300 Expert colocados em cantos opostos do AGV por forma a conseguirem cobrir toda a área circundante.

Obtidas as coordenadas da posição do veículo, estas são enviadas para o PLC (MOVI-PLC System C) que, juntamente com o *software* da marca, faz todo o controlo do movimento, gestão de parâmetros e configurações necessárias. Adicionalmente existe um PLC de segurança que faz a gestão da segurança do sistema.

Os motores utilizados são dois servomotores do tipo síncrono (HK37-CMPZ71S), que possuem um *encoder* absoluto que fornece o *feedback* da velocidade ao PLC. Os *drivers* utilizados (modelo MDX61B) fazem a interligação entre o PLC e os servomotores.

Quanto ao sistema de carregamento, são utilizadas quatro baterias de lítio de

72 Ah e um método de carregamento por contacto. No AGV existe uma base que em contacto com o chão da estação de carregamento, carrega o veículo.

A proposta completa pode ser encontrada no Anexo C⁷ (Tabela C.1), onde estão presentes todos os componentes necessários à construção do AGV.

Uma das principais vantagens desta solução é o facto de toda a análise de equipamento necessário (motores, sensores, *drivers*, entre outros) ser feita pelo fornecedor, poupando tempo numa fase inicial do projeto. No entanto, esta solução era consideravelmente mais dispendiosa que a adotada e possuía uma flexibilidade menor no que toca à seleção dos componentes a utilizar, o que justificou o seu detrimento em função da solução ANT lite+ da BlueBotics.

⁷Os preços das partes integrantes do sistema foram omitidos por razões de confidencialidade com o fornecedor.

Capítulo 5

Arquitetura do Sistema

No atual capítulo é identificada e explicada a arquitetura geral do sistema, bem como as soluções adotadas em termos de equipamento a utilizar. Para uma melhor explicação de todo o funcionamento inerente, são apresentados diversos diagramas de blocos, ilustrativos da forma como os diversos componentes interagem entre si e explicando as suas funcionalidades no sistema.

5.1 Arquitetura Geral

A arquitetura do sistema visa descrever a organização do mesmo e respectivos módulos, demonstrando a forma como estes interagem entre si. No caso presente, importa a compreensão da interligação entre todos os componentes associados à utilização do ANT lite+ da BlueBotics, por forma a que exista um maior conhecimento aquando da implementação prática. Para isso, recorre-se ao diagrama de blocos da Figura 5.1, que visa demonstrar um exemplo da interligação entre os veículos e os módulos ANT lite+ e ANT server.

Os diversos veículos encontram-se interligados a uma rede *wireless*, que faz a interligação entre estes e o ANT server e ANT lab. Este último é o *software* utilizado para configuração e instalação do veículo, executando ainda tarefas como o mapeamento inicial da área. É apenas destinado para estabelecer/configurar AGV equipados com o ANT lite+, e não corre continuamente. Por sua vez, o ANT server, efetua toda a monitorização e gestão dos veículos associados. É composto por dois componentes adicionais - ANT monitor e ANT server API - que oferecem uma interface entre os operadores e os diversos *softwares* (sistema de gestão de fábrica, sistema de gestão de produção, entre outros).

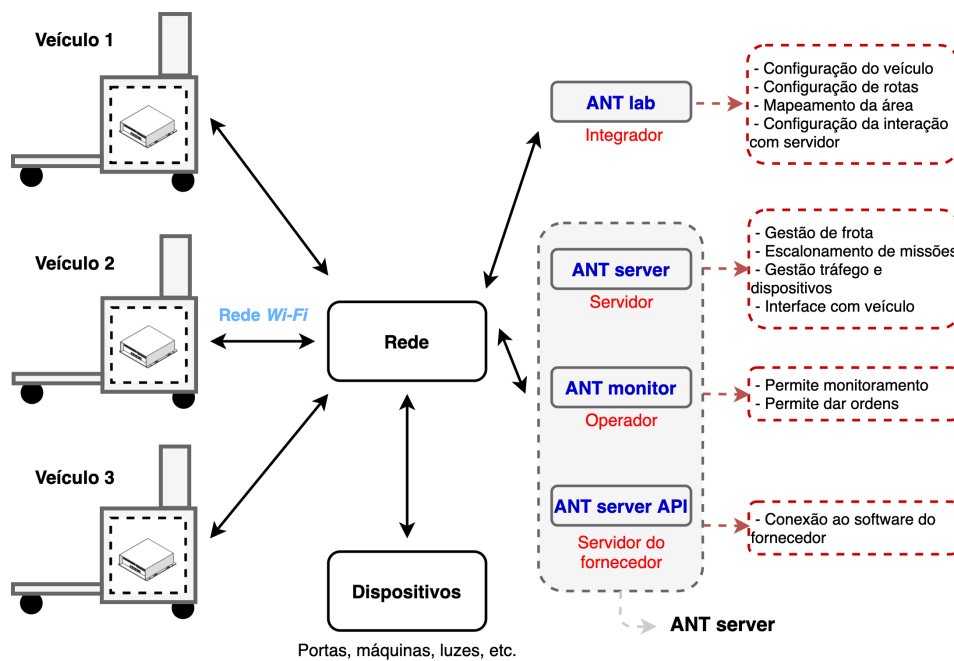


Figura 5.1: Diagrama da interligação entre módulos da BlueBotics

Como o tema do trabalho pressupõe a implementação de um único veículo, a sua arquitetura inerente será alvo de maior detalhe. Tendo em vista a simplificação da sua análise, foi desenvolvido o diagrama de blocos da Figura 5.2.

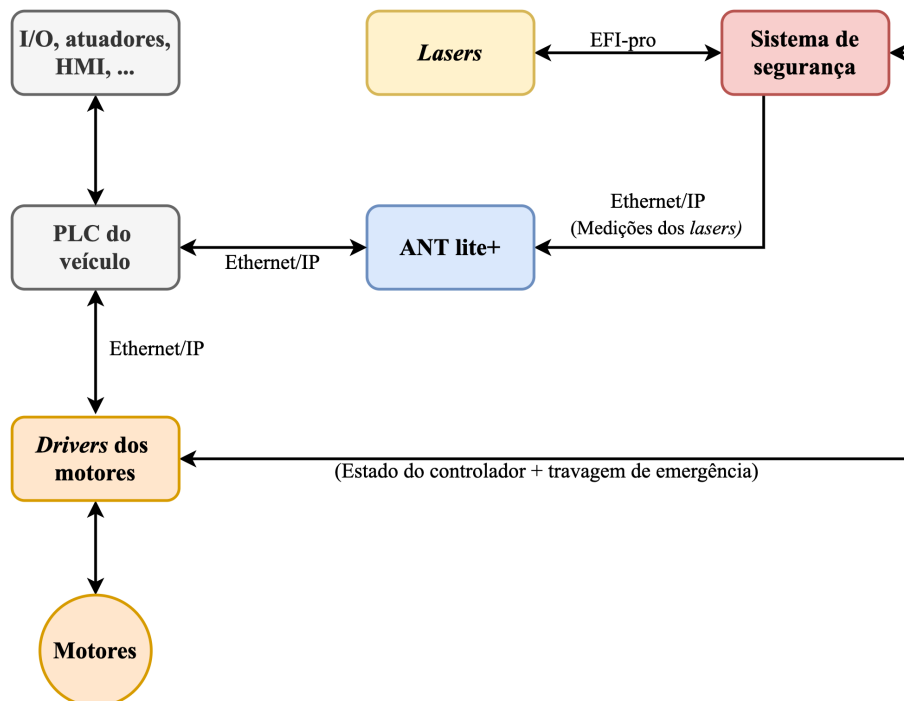


Figura 5.2: Diagrama de blocos da arquitetura geral do sistema

Este serve como referência para a descrição de cada um dos seus blocos realizada no decorrer do presente capítulo. A descrição das funcionalidades que se pretende de cada uma das componentes é parte essencial prévia à implementação prática do sistema, permitindo um estudo que pode (entre outras coisas) identificar possíveis erros e melhorias a efetuar.

De destacar que este diagrama foi construído com base na arquitetura proposta pela BlueBotics, como foi apresentado anteriormente no Capítulo 4 (Figura 4.7), no entanto apresenta algumas diferenças que serão justificadas mais à frente.

5.2 Interligação com Sensores

O ANT lite+ pode ser considerado como o “cérebro” do sistema, e por onde passa a grande maioria das ligações, tendo funções de localização, controlo, gestão de frotas e gestão da missão do veículo. Por isso, a sua correta configuração é parte fulcral para o bom funcionamento do mesmo.

Antes, baseado na Subsecção 4.3 , foi importante seleccionar os dois sensores a utilizar tendo em conta a aplicação. O modelo escolhido foi o microScan3 da SICK (Figura 5.3), devido a possuir um bom campo de visão, alcance e ser bastante robusto [47].



Figura 5.3: Sensor de segurança - SICK microScan3

Outro dos fatores fundamentais na escolha foi o facto de possuir mecanismos de segurança integrados, facilitando a integração com o sistema de segurança, e evitando a necessidade de adquirir componentes extra para o efeito¹.

Em particular, o modelo seleccionado tem como referência MICS3-CBAZ90ZA1P01, com as principais características apresentadas na Tabela 5.1.

¹É importante referir que o ANT lite+ não é um componente destinado à segurança, sendo que todos os aspetos relacionados com esta devem ser tratados por um sistema próprio.

Tabela 5.1: Principais características do sensor SICK microScan3 [62]

Característica	Valor
Alcance da área de proteção	9 m
Alcance da área de aviso	64 m
Campo do visão	275 °
Resolução	30 - 200 mm (configurável)
Resolução angular	0.1 °
Interface	Ethernet

O bom alcance tanto na área de proteção como de aviso, associados a valores de resolução bastante satisfatórios tornaram estes sensores a escolha ideal para cumprir as especificações desejadas. Para além disso, a sua robustez e imunidade a poeiras foram fatores acrescidos na adoção desta solução [47].

Com os sensores escolhidos, é possível um estudo de como estes se interligam ao ANT lite+, tal como é apresentado no diagrama da Figura 5.4.

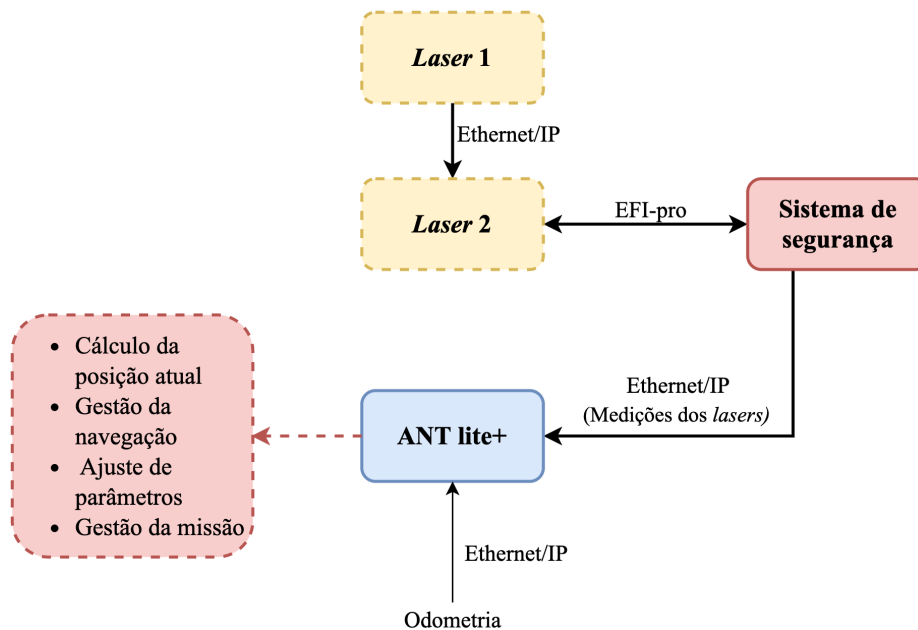


Figura 5.4: Interligação ANT lite+ com os sensores

De forma a processar o seu algoritmo de controlo, o ANT lite+ requer duas componentes fundamentais: informação da odometria e medições dos lasers. A primeira, é dada pelo *encoder* presente nos motores do sistema, através do protocolo Ethernet/IP. A segunda, por sua vez, é obtida através de uma interligação

entre o sistema de segurança (que contém um PLC), que funciona como meio de transmissão dos dados provenientes do sensor, e o ANT lite+.

A informação proveniente dos *scanners* podia ter sido fornecida diretamente ao ANT lite+, no entanto, optou-se por seguir o modelo descrito no manual da SICK [63]. Aqui, os dois sensores encontram-se interligados entre si, comunicando com recurso ao protocolo Ethernet/IP. Um dos sensores, no caso da Figura 5.4 o *Laser 2*, fica responsável por transmitir a informação de ambos ao sistema de segurança², através de um protocolo denominado de *Enhanced Function Interface pro* (EFI-pro). Este é baseado no protocolo Ethernet/IP e numa extensão do *Common Industrial Protocol* (CIP) para aplicações de segurança, e permite uma comunicação segura na rede entre dispositivos, estando uma descrição mais completa apresentada no Anexo D [63]. Posteriormente, o sistema de segurança efetua uma conversão para o protocolo Ethernet/IP, permitindo o envio da informação para o ANT lite+.

O ANT lite+, ao possuir os dados da odometria e dos sensores, executa o seu algoritmo que calcula a posição atual do veículo, ajusta os parâmetros necessários e continua a fazer a gestão da missão progressivamente.

5.3 Controlo de Movimento

O controlo de movimento pressupõe a interligação entre o controlador do sistema (ANT lite+) e os motores e respetivos *drivers*. Com o controlador já selecionado o passo seguinte baseou-se na escolha dum tipo de motor que conseguisse cumprir as especificações apresentadas no Capítulo 4 para uma implementação futura, tendo em conta as diversas soluções analisadas e que se encontram disponíveis no mercado.

5.3.1 Motor

Os dois motores a utilizar (configuração diferencial), necessitam de em conjunto ter potência suficiente para conseguir superar as condições propostas (ver Tabela 4.1), nomeadamente, como exposto na Tabela 4.2, uma potência total de 1425,25 W. De salientar, que este valor não pressupõe qualquer tipo de perda do sistema, nem considera o rendimento do motor.

²Este sistema é construído com recurso a componentes fornecidos pela SICK, como por exemplo um PLC de segurança próprio. Toda a sua arquitetura encontra-se descrita mais adiante no capítulo.

Caraterísticas

A solução adotada consistiu num servomotor³ CA (síncrono), fornecido pela JVL (referência MAC402-D5). Na Figura 5.5 pode ser encontrada uma representação da sua estrutura, onde são identificados alguns dos seus componentes.

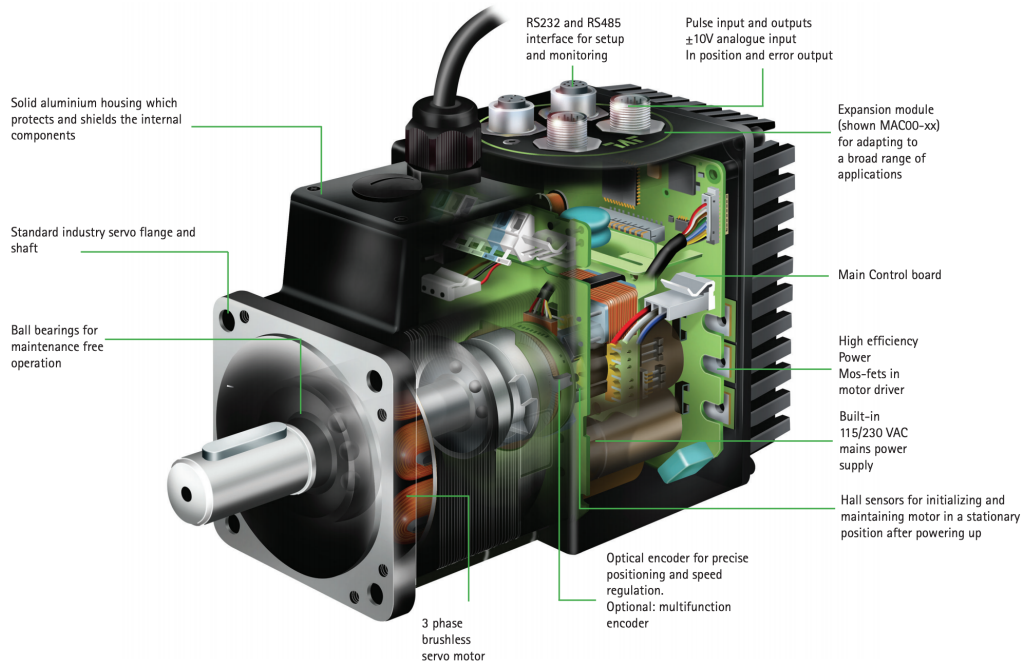


Figura 5.5: Estrutura do servomotor MAC402-D5 [64]

Resumidamente, o motor incorpora um *encoder* absoluto necessário para fornecer informação ao ANT lite+ que permite o controlo do movimento do veículo (variando a velocidade de cada um dos motores). Possui ainda embutido um conversor CC/CA, o que facilita a alimentação do mesmo, sendo apenas necessário alimentar os seus circuitos com 24 V CC. Caso este conversor não existisse, seria necessário adicionar um externamente por forma a alimentar o motor com uma CA. Quanto aos *drivers* (modelo MAC00-EI4-EI41), estes encontram-se contidos na sua estrutura e suportam uma comunicação através de Ethernet/IP.

As principais características do MAC402-D5 podem ser obtidas através da consulta do seu *datasheet* [65], e encontram-se expostas na Tabela 5.2.

³O termo “servo” significa que o motor opera num sistema de controlo em malha fechada, que usa o *feedback* fornecido pelo *encoder* para comparar a posição e velocidade do motor com o valor de referência.

Tabela 5.2: Características do MAC402-D5 - baseado em [65]

	Valor	Unidades
Tensão de alimentação	12 - 48 (CC)	V
Intervalo de velocidades (nominal)	0 - 3000	rpm
Potência nominal @3000 rpm	400	W
Binário em funcionamento contínuo	1,3	N.m
Binário de pico	3,8	N.m
Inércia do rotor	0,34	kgcm ²
Resolução do <i>encoder</i>	8192	CPR
Peso	2,8	kg
Travão embutido	Sim	-

Como se pode verificar, a potência nominal de um motor é de 400 W, logo ao utilizar-se dois destes em regime nominal obtém-se 800 W, o que não seria suficiente para mover o veículo sob as condições propostas (a potência necessária é de 1425,25 W e o binário 74,23 Nm). Com o objetivo de contornar este efeito, foi necessária uma análise à curva do binário em função da velocidade (Figura 5.6), para entender o comportamento do motor sob valores superiores aos nominais.

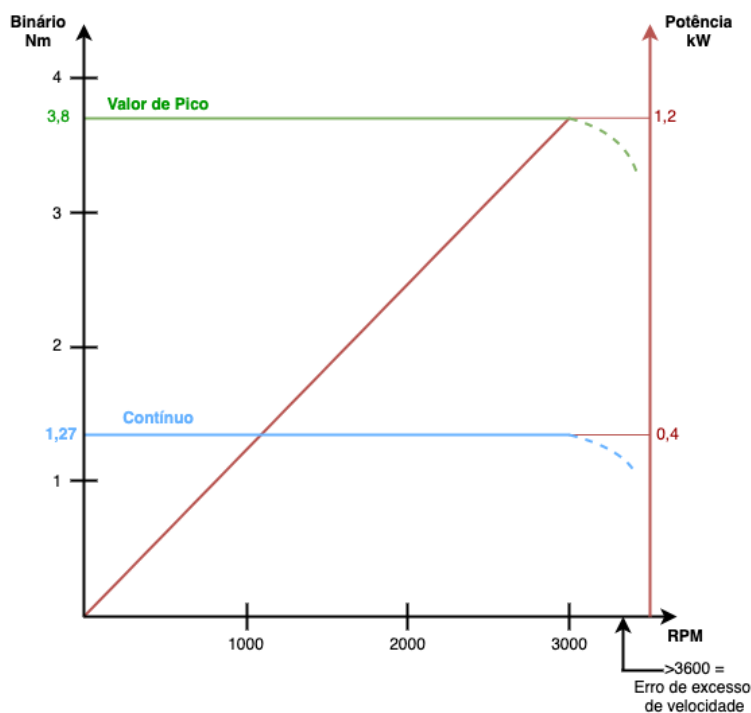


Figura 5.6: Binário em função da velocidade [66]

Aqui é visível que num valor de pico um único motor consegue atingir até 1,2 kW quando este se encontra próximo das 3000 rpm, o que leva à conclusão que, com dois motores, é possível atingir o valor de potência necessária de 1425,25 W. Também é necessário atender ao facto de o motor não funcionar corretamente acima das 3000 rpm, sendo que a partir das 3600 rpm existe mesmo um erro de excesso de velocidade. Como pode ser necessário que o motor funcione acima do seu valor contínuo, é importante aferir sobre o fator de serviço do motor, ou seja, quanto tempo o motor consegue aguentar acima do seu valor nominal sem que este se danifique. Esta questão foi colocada diretamente à JVL que indicou o seguinte:

- 200% binário \Rightarrow 10-30 segundos;
- 300% binário \Rightarrow 2-3 segundos.

A 200% de binário (e próximo das 3000 rpm) um único motor conseguiria fornecer 800 W (1,6 kW em conjunto), valor mais que satisfatório e que permite ainda alguma margem de segurança face à potência máxima prevista. Também não existe perigo de danos pois o veículo acelera a $0,3 \text{ m/s}^2$ (4 segundos para atingir $1,2 \text{ m/s}$), valor bastante inferior ao limite inferior de 10 segundos indicado pela marca. Baseado em toda a análise descrita, conclui-se que os motores propostos são passíveis de utilização, em particular conseguem em conjunto atingir o valor de potência máxima prevista de 1425,25 W, salvaguardando possíveis danos devido ao funcionamento acima do valor nominal.

Análise de Casos

Na realidade, o valor de 1425,5 W é apenas necessário quando o AGV se encontra a acelerar de forma a atingir a velocidade pretendida de $1,2 \text{ m/s}$, sendo que após o referido a necessidade de potência reduz consideravelmente. Por isso, à semelhança do que foi feito anteriormente na Tabela 4.2, foram calculados os valores de potência necessários posteriormente à aceleração do mesmo. As condições propostas e respetivos valores obtidos podem ser encontrados na Tabela 5.3⁴.

⁴Para efeitos de simplificação, valores como a massa do sistema, raio da roda e valores obtidos para as diversas forças, foram omitidos. No entanto, estes foram utilizados nos cálculos efetuados.

Tabela 5.3: Características e resultados posteriores ao arranque

	Valor	Unidade
Característica	Condições propostas	
Aceleração	0	m/s ²
Velocidade máxima	1,2	m/s
Inclinação máxima	1	°
Componente		
	Valores obtidos	
Binário total necessário na roda	52,77	Nm
Potência total necessária	633,25	W
Rotação máxima na roda	114,59	rpm

A potência necessária do sistema sob as condições referidas é de 633,25 W, o que é exequível pelos motores seleccionados que, em conjunto, conseguem fornecer 800 W em regime nominal. De salientar que devido à configuração ser diferencial, quando o veículo exige um movimento que não seja em linha reta, vai exigir velocidade superior numa roda que noutra, logo maior potência num motor que outro. Por exemplo, caso fosse necessário que o veículo se movesse sobre si próprio nas condições propostas, seria necessário para manter a velocidade de 1,2 m/s uma potência de 633,25 W em apenas um dos motores, o que ultrapassaria o regime nominal (mas seria possível de atingir, visto que o valor de pico de um motor é de 1,2 kW). No entanto apesar de ser um caso particular que apenas se verifica em determinadas aplicações, é necessário ter em conta para que o sistema seja mais “robusto” a todas as possíveis situações a que este se sujeita.

Para além da potência, outros parâmetros, como a velocidade e binário do motor, devem ser considerados. Relativamente ao primeiro, o valor máximo necessário nas situações pré e pós arranque (na roda) é igual, com o valor de 114,59 rpm, sendo exequível pelo motor. Por sua vez, o binário necessário, na roda, tanto no arranque (118,77 Nm), como após o mesmo (52,77 Nm), não consegue ser atingido, devido ao valor de pico fornecido ser de 3.8 Nm. Torna-se assim necessário incorporar uma caixa redutora, que irá trazer uma adaptação entre o binário e a velocidade, aumentando o primeiro e diminuindo o segundo.

5.3.2 Caixa Redutora

Até este ponto apenas foi considerada a potência dos motores, tendo a velocidade e o binário sido “ignoradas”. Todavia, para atingir as condições desejadas é necessário que o sistema possua um compromisso entre a velocidade do motor e respetivo binário por forma a atingir a potência desejada. Estas grandezas podem ser relacionadas com recurso à Equação 5.1, onde é visível que a potência do sistema P (em kW) é diretamente proporcional à velocidade n (em rpm) e ao binário T (em Nm).

$$P = \frac{2\pi \times n \times T}{60 \times 1000} \quad (5.1)$$

O critério adotado foi diminuir o binário do motor, tendo em conta os valores de pico (3,8 Nm) e nominais (1,27 Nm) e aumentar a velocidade para que esta se encontrasse o mais próximo possível das 3000 rpm. Isto garante que o motor consegue obter um maior valor de potência, e evita que este se encontre num ponto de funcionamento de binário superior, tal como é analisável na Figura 5.6, exposta anteriormente. Para isso, teria de ser utilizada uma caixa redutora, estando para efeitos de análise apresentados na Tabela 5.4 diversos valores para a razão de engrenagem.

Tabela 5.4: Possíveis valores para a razão de engrenagem

Razão de engrenagem	Binário necessário nos motores (N.m)	Velocidade no motor (rpm)	Potência (W)
1:1	118,77	114,59	1425,25
1:10	11,88	1145,92	1425,25
1:15	7,92	1718,87	1425,25
1:25	4,75	2864,78	1425,25

Com o objetivo de garantir a potência desejada, não ultrapassando o binário de pico do conjunto dos motores (7,2 Nm), a caixa redutora a utilizar no futuro será a de 1:25, pois é a que garante uma velocidade mais próxima das 3000 rpm, sem a ultrapassar. Nota importante vai para o facto de a caixa utilizada no protótipo ter uma razão de 1:10⁵, o que é suficiente tendo em conta que o binário e potências exigidas são bastante inferiores ao necessário para uma implementação futura, como foi demonstrado na Tabela 4.3, e ainda o raio da roda inferior.

Especial atenção vai para o facto do binário considerado na Tabela 5.4 ser o binário total requerido pelo sistema, e pode ser dividido pelos dois motores utilizados (na maioria dos casos). Assim, e tendo em conta a relação linear apresentada num momento anterior pela Figura 5.6, é visível que cada motor terá que fornecer um binário de $\frac{4,75}{2} = 2,38$ Nm, valor abaixo do limite de pico de 3,8 Nm.

No caso do veículo não se encontrar em aceleração o valor do binário necessário nas rodas reduz para 52,77 Nm, o que com a razão de engrenagem utilizada (1:25) perfaz um binário necessário nos motores de 2,11 Nm. Novamente, dividindo este valor de forma igual pelos dois motores obtém-se 1,06 Nm para cada um, também abaixo do limite do valor contínuo (1,27 Nm).

A Tabela 5.5, tem como objetivo resumir o descrito ao longo desta secção, sendo analisados os valores de binário necessários para o movimento do veículo com e sem aceleração.

⁵A empresa já possuía nos seus armazéns uma caixa compatível com os motores com a razão de 1:10, evitando assim a necessidade da compra de uma nova.

Tabela 5.5: Análise binário/velocidade/potência com e sem aceleração

	Binário necessário nos motores (N.m)	Velocidade no motor (rpm)	Potência necessária (W)
Com aceleração	4,75	2864,78	1425,25
Sem aceleração	2,11	2864,78	633,25

É relevante expor o facto de durante esta análise nenhum tipo de perda, como por exemplo o rendimento da caixa redutora, ter sido considerada. No entanto, para além desta, existem mais fatores como o sobreaquecimento e rendimento do motor que podem afetar o desempenho do sistema. Apesar disso, analisando as características do motor escolhido, existe uma margem de segurança considerada aceitável para lidar com os diversos casos apontados, tal como é demonstrado através da Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Fator de segurança binário/potência

	Binário necessário (N.m)	Binário máximo conjunto dos motores (N.m)	Fator de segurança do binário	Potência máxima conjunto dos motores (W)	Potência necessária (W)	Fator de segurança da potência
Com aceleração	4,75	7,6	1,60	2400	1425,25	1,69
Sem aceleração	2,11	2,54	1,20	800	633,25	1,26

Existem, no entanto, situações que nem sempre se verificam como a inclinação de 1° considerada em todos os casos (com ou sem aceleração), e que contribuem para um maior valor de potência e binário necessários. Assunções como a exposta, juntamente com os fatores de segurança mencionados, permitem eleger o motor da JVL como adequado para a aplicação em questão.

5.3.3 Interligação com o ANT lite+

Após a seleção do motor, foi necessário questionar a BlueBotics por forma a verificar a sua compatibilidade com o ANT lite+, tal como exposto num momento anterior. A resposta obtida mencionava que não seria possível comunicar diretamente entre o ANT lite+ e os *drivers* dos motores, sendo necessária a utilização do PLC do veículo para interligação entre os componentes. Para referência, o PLC utilizado foi o modelo 1769-L33ERM, da Rockwell. Esta interligação é efetuada com recurso a um modo denominado de PLC *mode*, e cuja arquitetura se encontra apresentada na Figura 5.7.

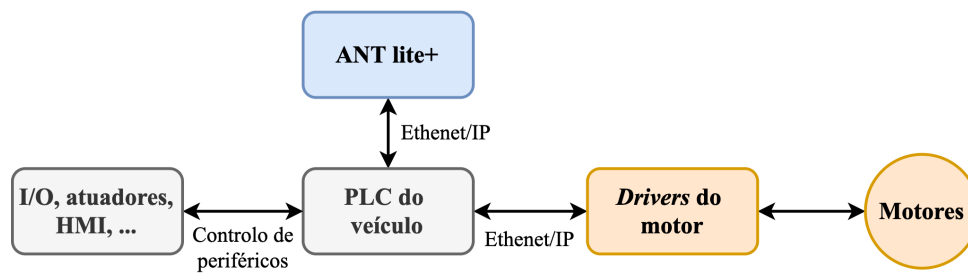


Figura 5.7: Interligação dos motores com o ANT lite+ - PLC *mode*

Essencialmente, o PLC do veículo é incorporado na comunicação entre o ANT lite+ e os *drivers*, servindo como meio de troca de dados (por exemplo, valor da velocidade através do *encoder*) entre estes. A comunicação entre o PLC e o ANT lite+ é, como já exposto anteriormente, feita com recurso ao protocolo Ethernet/IP ou CANopen, tendo neste caso optado-se pelo primeiro. Por sua vez, o protocolo de comunicação entre o PLC e os *drivers* pode ser escolhido pelo integrador, o que pode ser uma vantagem face à ligação direta entre o ANT lite+ e os *drivers* que força uma comunicação Ethernet/IP ou CANopen. Para este caso o protocolo escolhido foi novamente o Ethernet/IP, suportado pelos *drivers*.

Outra nota importante vai para o facto da BlueBotics ter fornecido a opção de desenvolver uma interface de comunicação própria, entre o ANT lite+ e os *drivers* dos motores da JVL. Este será o caminho a seguir numa fase pós-protótipo, pois libertará o PLC da tarefa de intermediário para troca de dados.

5.4 Sistema de Segurança

Parte integrante da maioria dos equipamentos industriais é o seu sistema de segurança. Este, tal como o nome indica, executa funções que permitem garantir que em caso de falha, o sistema reaja de acordo com as normas, e a tempo de reduzir ou eliminar possíveis danos, tanto a pessoas como à máquina. Neste caso em particular, a análise de normas relacionadas com a segurança de AGV e equipamentos industriais, é importante para uma definição do nível de segurança necessário, e conseqüentemente a escolha do equipamento. Posto isto, esta secção pretende demonstrar o estudo realizado às normas de segurança existentes, que levou à seleção dos equipamentos integrantes do sistema de segurança.

5.4.1 Normas de Segurança

Segundo a ISO 13849-1 [67], norma relativa à conceção de máquinas, é relevante calcular um fator que indique o nível necessário para a prestação das funções de segurança. Este tem o nome de *Performance Level* (PL), e é obtido tendo em conta o grau de falha máximo tolerado. Isto é visível através da Tabela 5.7, onde

a fiabilidade das partes relacionadas com o circuito de comando para executar uma função de segurança nas condições previsíveis é medida pela probabilidade média de falha/hora.

Tabela 5.7: Avaliação do PL - baseado em [67]

Performance Level (PL)	Grau de Falha Máximo Tolerado
a	1 caso perigoso por 10.000 horas
b	1 caso perigoso por 100.000 horas
c	1 caso perigoso por 333.000 horas
d	1 caso perigoso por 1.000.000 horas
e	1 caso perigoso por 10.000.000 horas

A determinação do PL é baseada na avaliação de três parâmetros: severidade da lesão, frequência e/ou duração da exposição ao perigo e possibilidade de evitar o perigo. O nível obtido no final é baseado numa tomada de decisão sequencial incluindo os parâmetros referidos anteriormente, conforme se pode verificar pela análise da Figura 5.8 [67].

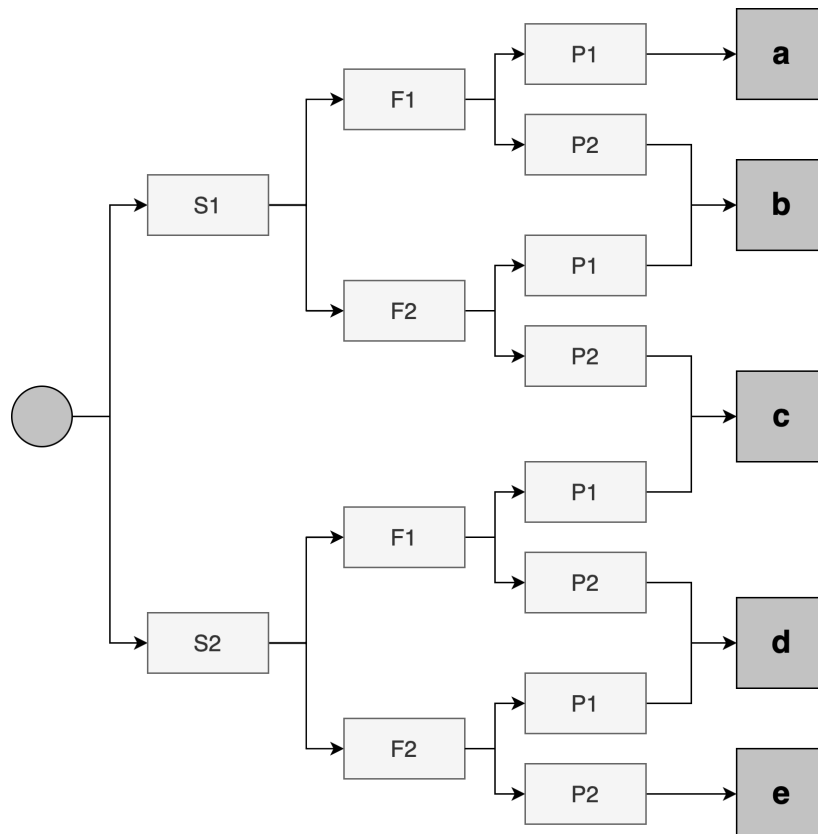


Figura 5.8: Determinação do fator PL - baseado em [67]

Relativamente à Figura 5.8, a legenda é a seguinte:

- **S - Severidade da lesão:**
 - S1 = lesão ligeira (normalmente reversível);
 - S2 = lesão grave (normalmente irreversível), inclusive morte;
- **F - Frequência e/ou duração da exposição ao perigo:**
 - F1 = raramente, ocasionalmente e/ou curta duração (1 intervalo/hora);
 - F2 = frequente, constantemente e/ou longa duração (> 1 intervalo/hora);
- **P - Possibilidades para evitar o perigo:**
 - P1 = possível sob determinadas condições;
 - P2 = quase impossível.

A norma dos AGV(EN ISO 1525 [21]) define os PL para algumas das funções de segurança, já para outras é necessário seguir o diagrama da Figura 5.8. Por exemplo, para um controlo de velocidade e paragem seguros, é necessário o PL d, tal como é assinalado na Tabela 5.8. Para além disso para manobras finas, onde por vezes é necessário desligar os sistemas de segurança (*scanners*), é necessário garantir uma velocidade inferior a 0,3 m/s, só atingível através do controlo seguro de velocidade que requer um PL d.

Tabela 5.8: Requisitos para componentes de segurança - baseado em [21]

Sistema de Controlo		Performance level (PL) Segundo ISO 13849
Controlo de velocidade	- Geral	b
	- Onde a estabilidade pode ser afetada	c
	- Onde a operação dos meios de deteção pessoais possa ser afetada	d
Gestão de carga	- Geral	b
	- Onde a estabilidade pode ser afetada	c
Mudança de direção	- Geral	b
	- Onde a estabilidade pode ser afetada	c
Avisos (luzes, buzzer, etc.)		a/b
Paragem de emergência		d
Meios de deteção pessoais		d
Proteção lateral		c
Bypass dos meios de deteção pessoais		c
Paragem do veículo do lado da carga		c

Para avaliar se é cumprido o PL especificado, deve ser analisada toda a cadeia de segurança dessa mesma função. Para referência, os sensores selecionados (microScan3) possuem funções de segurança intrínsecas que permitem fornecer meios de detecção pessoais, sendo esta uma das condições para atingir o PL d nos meios de detecção pessoais, apontado na Tabela 5.8.

5.4.2 SICK Flexisoft

De modo a garantir o controlo seguro da velocidade (e consequentemente atingir o PL d), é necessário um sistema que efetue a comutação entre áreas do *scanner* de forma segura. O selecionado foi o Flexisoft da SICK (FX3-CPU0), um controlador de segurança programável que permite uma adaptação modular (adicionar módulos extra) e que serve requisitos até ao PL e (superior ao d necessário). Tanto o controlador de segurança, como os respetivos módulos, são configuráveis através de um *software* próprio fornecido pela SICK, com o nome *Safety Designer* [68].

Este componente (FX3-CPU0) não possui, no entanto, todas as funções necessárias para um sistema de segurança adequado do AGV, sendo necessária a adição de módulos extra. Desde logo, é necessário um módulo que possua portas necessárias para a leitura dos dados provenientes dos *scanners*. O escolhido foi o FX3-GEPRO que possui portas para uma rede industrial Ethernet/IP, permitindo assim a leitura de informação proveniente dos sensores, e consequentemente a comutação segura das áreas de segurança, requisito do PL d [69].

Por último, é necessário um módulo de E/S que permita a comutação segura das mesmas. O selecionado foi o FX3-XTIO84002, que possui 8 entradas e 4 saídas seguras [70]. No protótipo, as saídas serão utilizadas para comutar dois contactores da Siemens (modelo 3RT2015-1BB42), necessários para cortar a energia aos motores, e consequentemente acionar os travões, que não são certificados de segurança. Numa fase pós-protótipo, este último deve ser superado com a inclusão de dois travões certificados.

Cumprida a análise e escolha de todos os componentes associados ao sistema de segurança, torna-se possível a conceção da arquitetura do mesmo, representada através da Figura 5.9. Todas as configurações são efetuadas através do controlador principal (FX3-CPU0), a informação requerida dos *scanners* recebida através do módulo FX3-GEPRO, e o sinal de travagem de emergência fornecido pelo módulo de E/S (FX3-XTIO84002). Este último fará uma ligação com os *drivers* dos motores que irá acionar, caso necessário, o travão do motor.

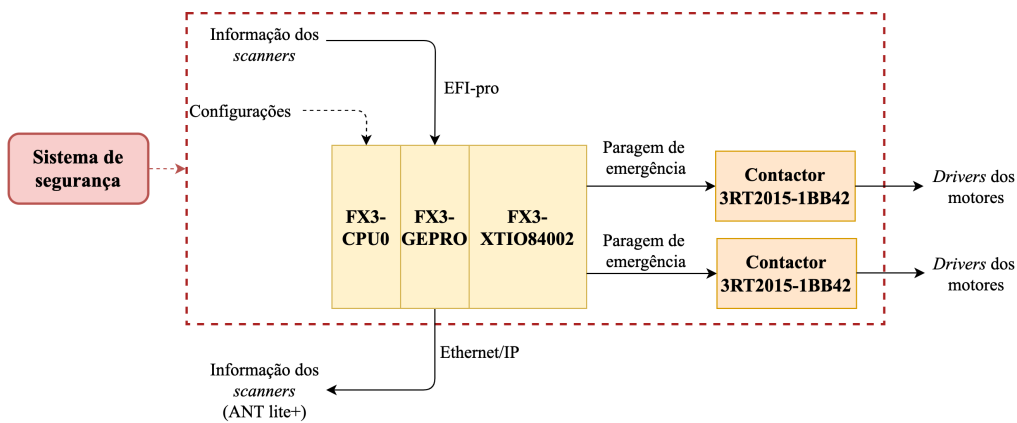


Figura 5.9: Arquitetura do sistema de segurança

5.4.3 Considerações Futuras

Relativamente ao PL, com o tipo de arquitetura da Figura 5.9, consegue-se que uma das três funções de segurança que requerem um nível d (ver Tabela 5.8) seja cumprida, os meios de deteção pessoal (fornecidos pelos *scanners*).

Para o controlo seguro da velocidade, onde a operação dos meios de deteção pessoais possa ser afetada, é necessária a adição de um *encoder* de segurança, por forma a que exista uma informação segura da velocidade dos motores. Estes *encoders* deverão ser inseridos no eixo dos motores e terão uma ligação com o sistema Flexisoft, que fará toda a gestão necessária para o controlo seguro da velocidade. Assim, por exemplo, caso uma pessoa/objeto se atravessasse no caminho do AGV durante um curto período de tempo, este fará uma gestão da comutação de áreas de forma segura, baseada na velocidade lida pelos *encoders* de segurança. Isto evita que o AGV efetue uma comutação de casos baseada em *encoders* não seguros, como os presentes nos motores escolhidos.

Por sua vez, para a travagem de emergência, é necessária a inclusão de travões certificados, o que não é o caso dos incorporados nos motores.

Para efeitos do protótipo estes componentes não são partes integrantes do sistema, evitando a necessidade de um custo acrescido. Isto não terá implicações diretas na segurança de operação do protótipo de AGV, que para além de ir operar num ambiente de testes, não necessita de características como as apontadas em cima. Fica, no entanto, o estudo realizado para numa implementação futura estes componentes ser incorporados, com o objetivo de cumprir o PL das respetivas funções.

5.5 Integração com Periféricos

Ainda que o projeto seja apenas um protótipo, onde o número de periféricos é reduzido em comparação com um que esteja inserido numa aplicação específica, existem alguns que são comuns a ambas as aplicações. Esta secção descreve alguns dos periféricos utilizados e a forma como estes interagem com o sistema, nomeadamente a *Human Machine Interface* (HMI), um sinalizador de luz e um *buzzer*. A Figura 5.10 demonstra a forma como estes se encontram interligados ao PLC da Rockwell.

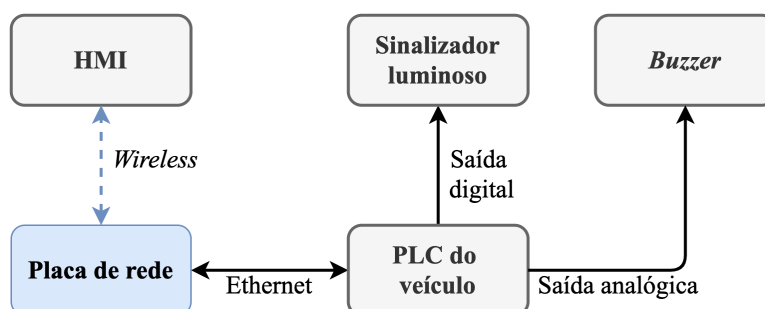


Figura 5.10: Interligação do PLC com periféricos

Relativamente à HMI, esta estará disponível através de um computador que comunicará com o PLC via *wireless*. Para isso, é necessária a integração de uma placa de rede na arquitetura. A troca de informação será feita de forma bidirecional, ou seja, o PLC enviará informações como o estado dos motores e velocidade atual, e a HMI ordens como a paragem do veículo. A integração de uma consola própria no veículo foi considerada, no entanto acreditou-se que uma interação *wireless* seria mais benéfica, permitindo monitorizar o veículo de qualquer local que tenha disponível uma ligação à rede.

Quanto ao sinalizador luminoso e ao *buzzer* estes são periféricos que, devido ao modelo escolhido do PLC (Rockwell 1769-L33ERM) não conter nenhum tipo de E/S analógicas ou digitais, requer uma carta externa. A utilizada foi, igualmente, fornecida pela Rockwell e tem como referência 1734-Point I/O.

Adicionalmente, segundo a norma EN ISO 1525 [21], estes periféricos são tidos como necessários, sendo isto comprovado pelos seguintes excertos:

- “com a exceção de veículos que não excedam os 0,3 m/s (1,08 km/h), deve ser ativado um dispositivo de aviso facilmente visível, quando o veículo se encontra pronto para iniciar o seu movimento ou durante o decorrer deste”;
- “um sinal acústico distinto deve ser gerado em qualquer situação que o veículo se mova numa direção não protegida pelos meios de deteção pessoais”.

O primeiro ponto é cumprido com recurso a um sinalizador luminoso, fornecida pela Rockwell, semelhante ao da Figura 5.11. Quando o veículo se encontra em movimento é acesa a sinalização verde (modelo 855T-B24TL3), quando se encontra parado a vermelha (modelo 855T-B24TL4), e quando está numa situação de espera a amarela (modelo 855T-B24TL5). O *buzzer* (Figura 5.12) (modelo 855T-B24SA1), que pode ser integrado no sinalizador, serve para cumprir o segundo ponto, sinalizando zonas não protegidas pelos meios de deteção pessoais do AGV.



Figura 5.11: Sinalizador luminoso [71]



Figura 5.12: *Buzzer* 855T-B24SA1 [72]

Por último, considerar que quando o veículo for inserido numa aplicação específica, este irá, provavelmente, requerer uma maior exigência em termos de periféricos. Isto é um fator importante e que deve ser considerado aquando do projeto do mesmo.

5.6 Dimensionamento, Método e Esquema de Carregamento das Baterias

Com as diversas soluções estudadas na Secção 4.5.1, o primeiro passo foi efetuar o dimensionamento das baterias, de modo a que estas tenham capacidade suficiente para cumprir as especificações desejadas. Como o veículo a implementar, numa fase inicial, se trata de um protótipo, a necessidade de recorrer a baterias com grande capacidade e que fossem soluções a longo prazo não se justifica. Alternativas mais baratas, que servissem apenas para testes foi a opção tomada pela empresa.

No entanto, esta secção trata o dimensionamento, método e esquema de carregamento das baterias tanto para o protótipo, como para uma possível futura

implementação do veículo. Assim, pretende-se facilitar uma implementação pós-protótipo, eliminando a necessidade de novos dimensionamentos e análises de soluções relativamente ao tratado na presente secção.

5.6.1 Protótipo

Dimensionamento da Bateria

A primeira fase foi definir parâmetros fundamentais à obtenção das características da bateria, relativamente ao protótipo. Os indicadores selecionados foram os seguintes:

- potência necessária (P_n) - 150 W;
- tempo de duração (t_d) - superior a 1 hora;
- tensão de alimentação (V_a) - 24 V;
- bateria remanescente em % (B_r) - 25%.

A potência definida como necessária para o sistema foi de aproximadamente 150 W (com fator de segurança associado), valor este baseado na potência mecânica total que o protótipo necessita de 129,57 W sobre os requisitos expostos anteriormente na Tabela 4.4. Utilizando este valor, juntamente com a tensão de alimentação pretendida, consegue-se obter com recurso à Equação 5.2 a corrente que o sistema necessita I_n .

$$I_n = \frac{P_n}{V_a} = \frac{150}{24} = 6,25A \quad (5.2)$$

Assim, é possível obter a capacidade bateria C_b (em Ah), tendo em mente que se pretende uma duração de 1 hora e uma bateria remanescente de 25%. Este cálculo é efetuado com recurso à Equação 5.3.

$$C_b = I_n t_d B_r = 6,25 \times 1 \times \frac{100}{100 - 25} \approx 8,34Ah \quad (5.3)$$

Todos os valores obtidos excluem fatores adicionais que podem afetar o desempenho da bateria, como por exemplo o seu rendimento. No entanto, numa situação de funcionamento normal esta também não necessitará de fornecer 150 W por hora, mas sim um valor inferior (quando o veículo não se encontra a acelerar requer menos potência). Isto leva a que o dimensionamento tenha alguma margem para lidar com fatores que possam influenciar o rendimento e duração da bateria.

Conhecidas as especificações, o próximo passo foi a escolha da bateria. A empresa tinha disponíveis baterias relacionadas com outras funções, que caso pudessem ser utilizadas no AGV eliminariam a necessidade de compra, e consequentemente diminuindo o custo total do protótipo. As baterias em questão foram fornecidas pela Trojan, com modelo 27-GEL, e com as principais características apresentadas na Tabela 5.9 [73].

Tabela 5.9: Bateria Gel Trojan 27-GEL [73]

Característica	Valor
Tecnologia	Gel
Energia	1,2 kWh
Tensão	12 V
Peso	29 kg

Quanto à tecnologia, esta bateria é do tipo Gel, uma variação das baterias de chumbo-ácido em que o eletrólito está imobilizado como gel, levando a que possuam uma vida útil e capacidade cíclica melhoradas. Possuem uma energia de 1,2 kWh, o que conjugando com a sua tensão de 12 V, leva a que tenham uma capacidade de 100 Ah. Este valor é muito superior ao calculado anteriormente (8,34 Ah), através da Equação 5.3, o que torna esta bateria indicada para a aplicação em questão, tendo uma margem bastante considerável. De salientar a necessidade da utilização de duas baterias, ligadas em série, para atingir os 24 V pretendidos.

Método e Esquema de Carregamento

Referidas anteriormente as diversas soluções para métodos e esquemas de carregamento, torna-se agora possível a escolha dos mesmos. No caso do protótipo, o método de carregamento será um por contacto, ou seja carregamento através do contacto com uma fonte de energia. Já o esquema será uma troca manual de bateria, onde quando o nível desta for inferior a um dado valor, ou se esgotar, será levada para um local apropriado, onde será feito o seu carregamento.

A razão para estas escolhas baseou-se essencialmente na redução de custos do projeto, em que a compra de equipamento adicional para carregamento das baterias, como estações e bases de carregamento, levaria a um custo acrescido.

5.6.2 Implementação Futura

Dimensionamento da Bateria

Analizadas as exigências por parte do protótipo, o próximo passo foi dimensionar a bateria para uma implementação futura, ficando o estudo já realizado. Após discussão com a empresa, as características em que o dimensionamento foi baseado foram as seguintes:

- potência necessária (P_n) - 1500 W;
- tempo de duração (t_d) - superior a 2 horas;
- tensão de alimentação (V_a) - 24 V;
- bateria remanescente em % (B_r) - 25%.

Essencialmente pretende-se, em relação ao protótipo, que a bateria tenha o dobro da duração, tendo ainda em conta a exigência superior em termos de potência. De salientar, novamente, que este valor pressupõe um consumo de 1500 Wh, o que em situações normais não irá acontecer, e portanto a bateria previsivelmente terá uma duração superior à indicada. Para uma melhor estimativa da duração seria necessário testar a bateria nas condições em que esta irá operar.

Baseado na Equação 5.2 e Equação 5.3, consegue-se obter a Equação 5.4, representativa da capacidade da bateria pretendida (em Ah).

$$C_b = I_n t_d B_r = 62,5 \times 2 \times \frac{100}{100 - 25} \approx 156Ah \quad (5.4)$$

Com a capacidade e especificações da bateria definidas, o próximo passo foi a escolha de qual a tecnologia a utilizar. Aqui, ao contrário do que acontece no protótipo, a escolha passou por uma bateria mais robusta, que fornecesse mais garantias de durabilidade, e portanto mais dispendiosa. A tecnologia que se propõe é baseada no estudo feito anteriormente, na Subsecção 4.5.1, recaindo sobre uma bateria de íões-lítio, semelhante às oferecidas pela ZENIT (Figura 5.13), consideradas para implementação futura.



Figura 5.13: Baterias de lítio - ZENIT [74]

Como referido, esta tecnologia possui uma alta densidade energética, alta potência específica e longa vida útil, sendo por isso o caminho a seguir (mesmo tendo em conta o facto de serem consideravelmente mais dispendiosas).

Método e Esquema de Carregamento

Quanto ao método e esquema de carregamento aqui, à semelhança da bateria, pretendia-se uma melhor solução face ao protótipo. O método selecionado foi um com contacto, pelo facto de possuir um *design* mais simples, custo inferior e (geralmente) uma maior eficiência. A utilização de um método sem contacto seria mais dispendioso e não compensaria tendo em conta as aplicações em que a empresa pretende integrar o AGV.

Para referência futura, o AGV deverá possuir uma base que permitirá efetuar um contacto com a estação de carregamento, e conseqüentemente carregar a sua bateria. Um exemplo de um sistema de carregamento analisado foi o fornecido pela VAHLE, representado na Figura 5.14 [75].

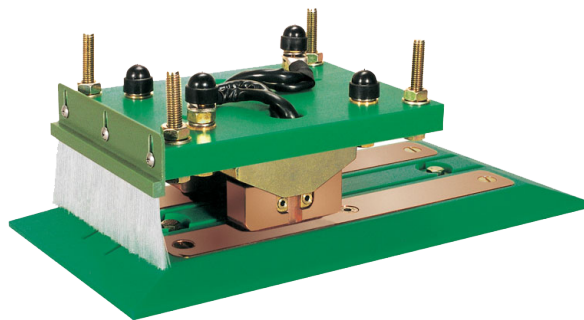


Figura 5.14: Sistema de carregamento VAHLE [75]

Já o esquema de carregamento poderá variar consoante a aplicação em que este se insere, no entanto a ideia será adotar na grande maioria um carregamento alternado. Pretende-se assim que o AGV se dirija a uma dada estação quando surgir uma oportunidade durante o seu funcionamento, permanecendo lá durante um determinado período de tempo ou até a bateria atingir determinado nível.

5.7 Lista de Componentes

Apesar de boa parte dos componentes utilizados terem sido referidos e analisados na presente secção, existem alguns que foram discriminados para efeitos de simplificação, como por exemplo, botões de emergência, disjuntores, entre outros. Por isso, no Anexo E encontra-se uma lista completa dos materiais/componentes utilizados na projeto do protótipo tendo, por razões de confidencialidade, sido omitidos os respetivos preços.

Capítulo 6

Implementação Prática

O capítulo inicia com a apresentação da estrutura elétrica do veículo e ainda com a demonstração de como foram montados os componentes. De seguida, são focadas as configurações efetuadas e, caso se justifique, apresentada a lógica de funcionamento de determinada operação. Também é demonstrado todo o processo de integração dos componentes, incluindo o mapeamento do ambiente e definição de rotas, com recurso às ferramentas fornecidas pela Bluebotics.

6.1 Estrutura Elétrica

Tendo por base a arquitetura do sistema, apresentada no capítulo anterior, a primeira fase da implementação prática consistiu na definição da estrutura elétrica. Sendo assim, esta secção pretende fornecer informação relevante acerca da mesma, começando por apresentar um diagrama elucidativo da sua estrutura geral e, posteriormente, a definição da alimentação e aparelhagem de proteção.

6.1.1 Estrutura Geral

Baseado na arquitetura desenvolvida, apresentada na Figura 5.2, e tendo como objetivo facilitar a compreensão da interligação entre componentes, foi elaborado o esquemático da Figura 6.1, representativo da estrutura geral do sistema. Este não contém qualquer referência à alimentação (baterias) e aparelhagem de proteção utilizadas, estando estas partes explicadas mais à frente na secção.

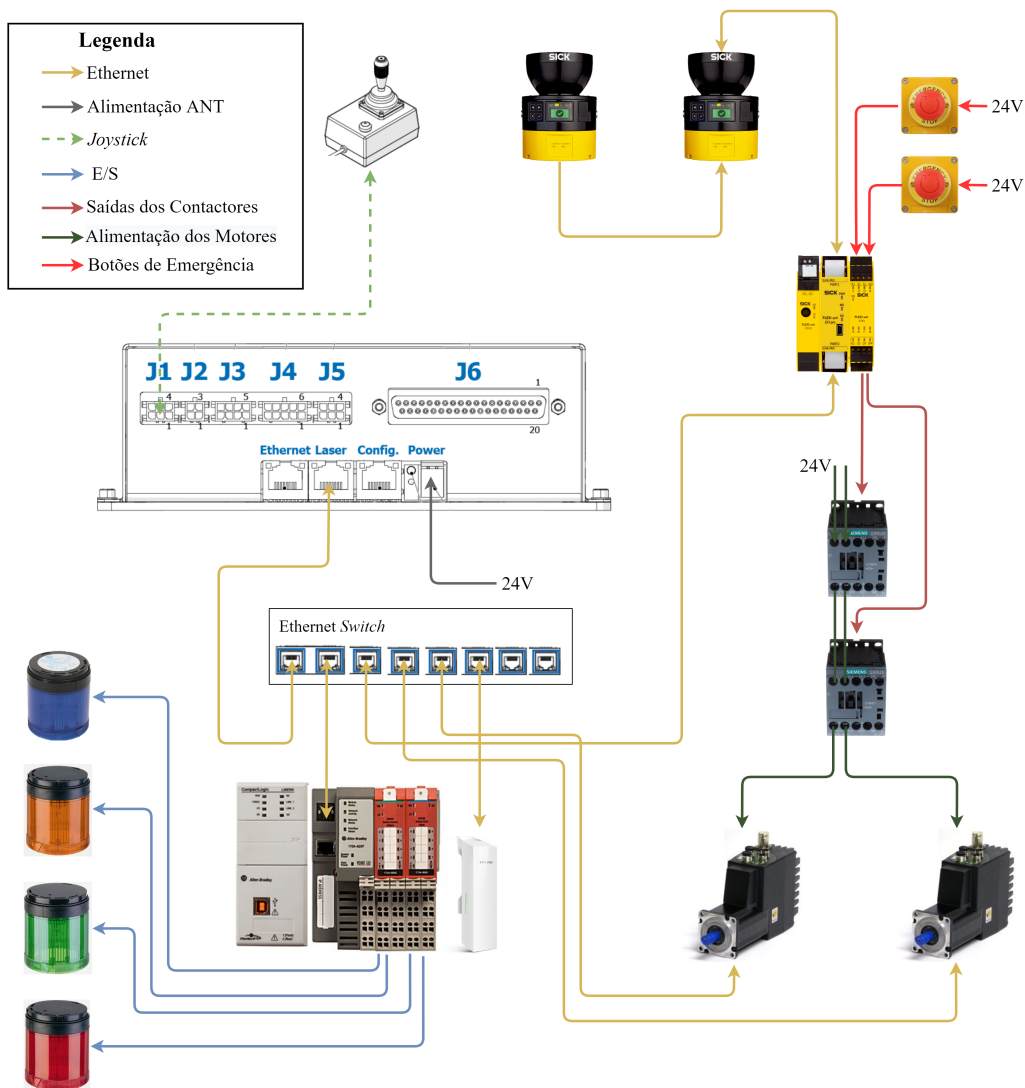


Figura 6.1: Esquemático da estrutura geral do sistema

O foco principal vai para o ANT lite+, onde toda a informação proveniente dos sensores e motores será processada internamente, com recurso ao seu algoritmo de navegação natural, dando origem a comandos que permitam que o AGV se mova de acordo com o pretendido. Toda esta troca de informação é conseguida através de protocolos de comunicação (Ethernet/IP e EFI-pro), que circulam através de cabos Ethernet. Notar a necessidade de utilização de um Ethernet *switch*, que se prende com a necessidade de disponibilização de mais portas Ethernet.

Relativamente aos restantes componentes, são utilizadas quatro saídas digitais do PLC para ativar os sinalizadores luminosos e o *buzzer*, e duas saídas do módulo de E/S do sistema de segurança para cortar a energia aos motores (através dos contactores) e acionar a paragem de emergência. Tem-se ainda o *joystick* que

será ligado diretamente ao ANT lite+.

De referir que o esquemático da Figura 6.1 é meramente elucidativo. Por isso, foi desenvolvido o esquema elétrico do veículo, através do *software* EPLAN, podendo este ser consultado através do Anexo F.

6.1.2 Alimentação e Aparelhagem de Proteção

Apresentada a estrutura geral na subsecção anterior, encara-se agora a questão de como é feita a alimentação e proteção do sistema, fatores que foram excluídos do esquemático da Figura 6.1.

Alimentação

A explicação da alimentação segue a página do esquema elétrico, apresentada na Figura 6.2.

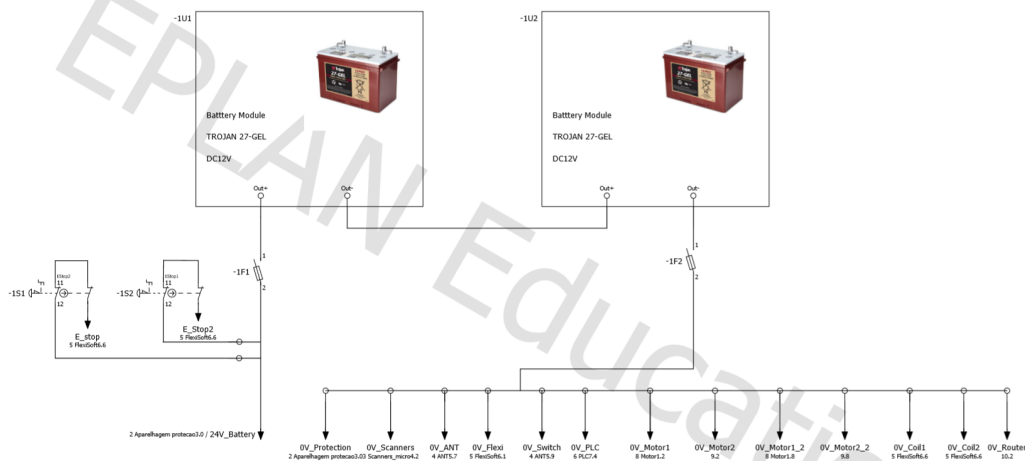


Figura 6.2: Esquema elétrico - alimentação

À semelhança do apresentado na arquitetura do sistema, são utilizadas duas baterias de 12 V ligadas em série, por forma a satisfazerem o requisito de alimentação de 24 V. Existem também dois fusíveis para efeitos de proteção. A partir da alimentação, são utilizados vários pontos de conexão da massa, que serão conectados ao respetivo elemento do sistema. Os botões de emergência, com contactos normalmente fechados (NF), são utilizados como entradas do sistema de segurança (FlexiSoft), fornecendo 24 V numa situação de normal funcionamento. Também é visível, na Figura 6.2, a utilização do ponto de 24 V que segue para a página referente à aparelhagem de proteção, onde esta tensão é utilizada para alimentar os disjuntores utilizados.

Aparelhagem de Proteção

Seguindo a última explicação da subsecção anterior, é verificável através da Figura 6.3 a ligação dos 24 V da bateria a cada um dos disjuntores utilizados.

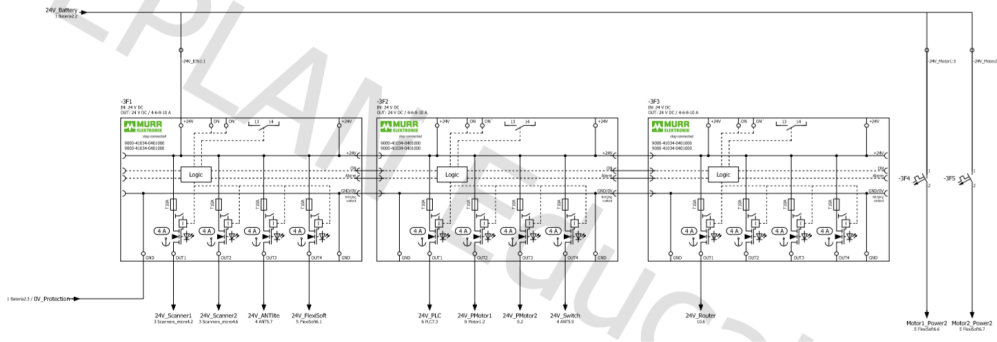


Figura 6.3: Esquema elétrico - aparelhagem de proteção

Para alimentar a eletrónica a 24 V são utilizados disjuntores eletrónicos, com modelo MICO 4.1. A corrente de corte pode ser ajustada entre 4, 6, 8 e 10 A, tendo para o presente caso sido selecionado o valor mínimo para todos os componentes, devido a nenhum destes admitir correntes superiores a 4 A. Relativamente aos motores, que necessitam de uma corrente de corte mais elevada, foram selecionados dois disjuntores unipolares (um para cada motor), com uma corrente de corte de 16 A¹.

6.2 Montagem dos Componentes

Conhecida a estrutura elétrica, e tendo definida a alimentação e aparelhagem de proteção correspondente, é possível passar para a fase de montagem dos componentes. Estes são colocados sobre uma estrutura mecânica (2,0 x 1,1 m), desenvolvida em específico para o protótipo, com o desenho CAD apresentado na Figura 6.4, que vai de encontro ao esboço apresentado anteriormente na Figura 4.1. Atenção especial para o facto da estrutura utilizada conter apenas duas rodas omnidirecionais (centradas), e não quatro como o desenho indica. Isto deve-se ao facto do desenho CAD ter em mente a possibilidade de utilização de duas rodas. Mais perspetivas podem ser encontrados no Anexo G .

¹Para uma implementação futura, com uma maior exigência de corrente por parte dos motores, pode ser necessário utilizar uma corrente de corte superior.

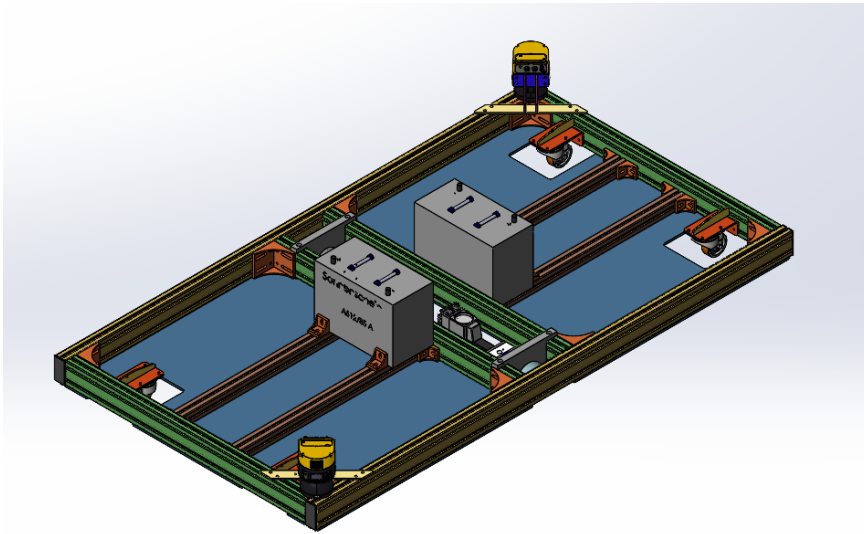
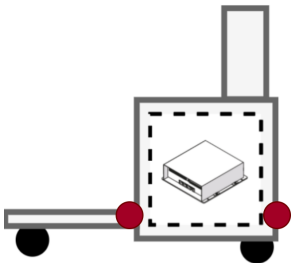
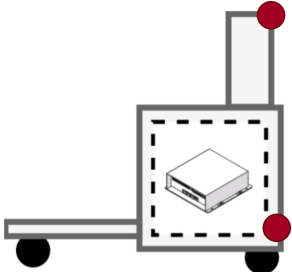
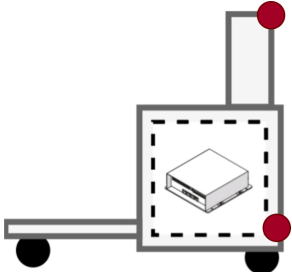


Figura 6.4: Estrutura mecânica - desenho CAD

6.2.1 Posicionamento dos Sensores

Relativamente ao posicionamento dos sensores, consideraram-se duas configurações que podem ser analisadas através da Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Possíveis configurações dos sensores

Configuração	Localização	Navegação	Segurança
	✓	✓	✓
	✓	✗	✗
	✗	✓	✓

A primeira configuração tem a vantagem evidente de ambos os sensores conseguirem executar as funções de localização, navegação e segurança, ao contrário

do que acontece na segunda configuração. A segunda pode ser útil em casos em que se pretenda um sensor exclusivo para localização, libertando este das tarefas de navegação/segurança que são atribuídas ao sensor colocado na parte inferior. Analisadas as opções, optou-se pela primeira configuração, por se considerar que assim se tira partido de todas as capacidades do microScan3, não limitando as suas funções.

Com a configuração selecionada, torna-se importante definir o seu posicionamento no AGV. Aqui é importante considerar zonas não visíveis, a cobertura e a localização de perigos que possam surgir durante o funcionamento de veículo. Para isso, e com o objetivo de cobrir a maior área possível, o indicado foi posicionar os dois *scanners* de forma adjacente, em cantos opostos do veículo, e com um ângulo de 45° (Figura 6.5).

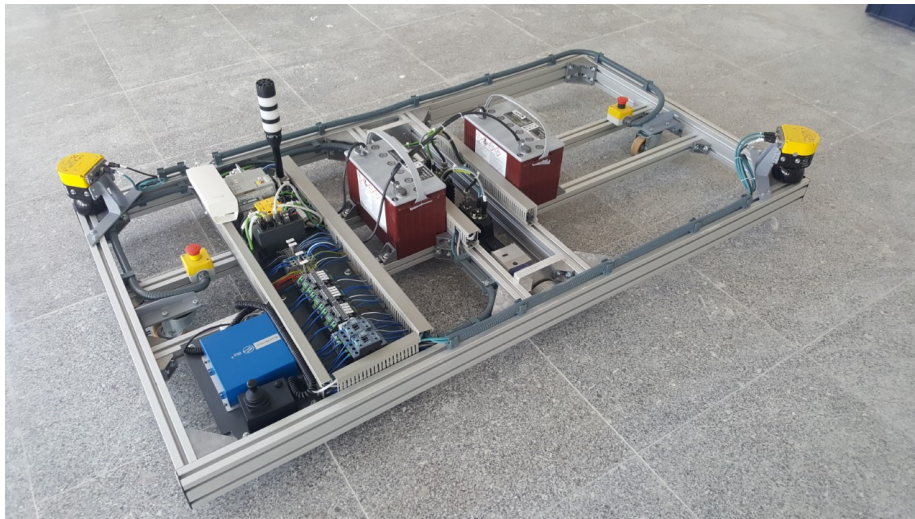


Figura 6.5: Posicionamento dos *scanners*

Isto, juntamente com o campo de visão de 275° do microScan3, garante que toda a área circundante ao veículo seja monitorizada. Por fim, de salientar que a Bluebotics recomenda que os sensores estejam aproximadamente com a mesma altura e ângulo, dando uma margem de erro de ± 2 cm e $\pm 1^\circ$, respetivamente, fatores considerados no desenvolvimento do projeto mecânico.

6.2.2 Montagem dos Motores

A estrutura mecânica desenvolvida para suporte dos motores contém o acoplamento de uma caixa de redução com razão de 1:10, juntamente com um suporte para as rodas responsáveis pelo movimento do veículo. A Figura 6.6 oferece uma perspetiva de topo do referido.



Figura 6.6: Estrutura mecânica dos motores

6.2.3 Suporte para a Eletrônica

Seguindo as ligações apresentadas no esquema elétrico (Anexo F), foi desenvolvido um suporte para toda a eletrônica, tal como é apresentado na Figura 6.7.

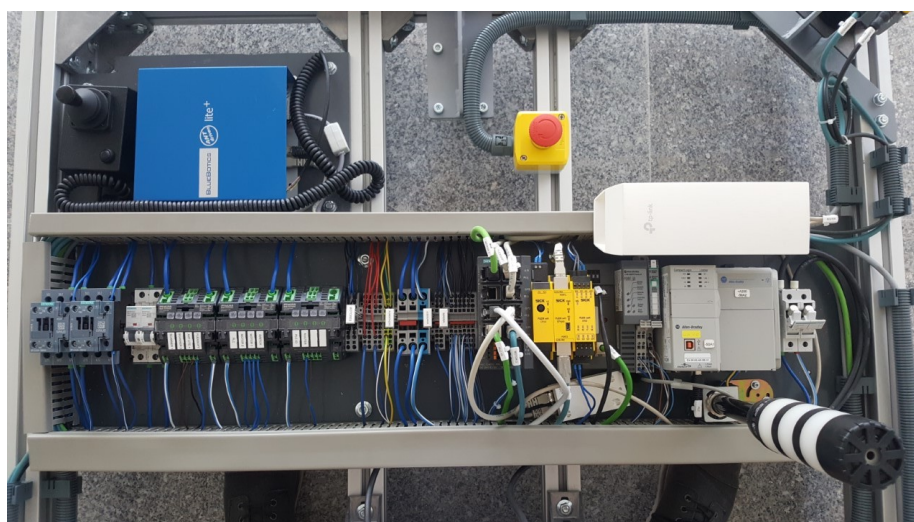


Figura 6.7: Suporte para a eletrônica

Esta estrutura contém também o sinalizador luminoso e *buzzer* colocados verticalmente no canto do suporte. Tanto este posicionamento, como o dos restantes componentes, não é ideal para aplicação futura, onde um melhor isolamento e proteção serão necessários.

6.3 Configuração dos Sensores

Após montagem das partes integrantes, a etapa seguinte visou efetuar os diversos processos de configuração, iniciando a sua descrição nesta secção para os sensores

microScan3. Neste caso, começou-se por efetuar o cálculo da área de proteção padrão, seguindo-se a demonstração das configurações efetuadas no *software* próprio, denominado Safety Designer.

6.3.1 Cálculo da Área de Proteção

Previamente às configurações dos sensores, é necessário o cálculo do comprimento e largura da área de proteção do veículo, para que este se movimente de forma segura, segundo as normas de segurança. A área de proteção obtida tem por base as premissas de que o veículo se encontra com uma massa de 200 kg (valor com fator de segurança associado) e a mover-se à velocidade de 1,2 m/s, sendo esta a situação mais crítica em termos de travagem para o protótipo.

Cálculo do Comprimento da Área de Proteção

A área de proteção é projetada para detetar uma pessoa/objeto a uma dada distância considerada de risco, evitando a colisão entre as partes. Segundo o manual de operações do microScan3 [76], esta área tem duas componentes - comprimento e largura - que são calculadas separadamente.

Para o caso do comprimento (S_L), o cálculo é dado pela fórmula da Equação 6.1.

$$S_L = S_A + T_Z + Z_R + Z_F \quad (6.1)$$

, onde S_A representa a distância de travagem + reação, T_Z a tolerância, Z_R um suplemento para erros causados pela reflexão e Z_F um suplemento para falta de distância ao solo.

Os três últimos parâmetros referidos podem ser obtidos através do manual de operações [76], e têm como valores: $T_Z = 65$ mm, $Z_R = 100$ mm e $Z_F = 135$ mm.

A componente S_A requer o valor de duas distâncias: reação e travagem. A primeira refere-se ao tempo que o AGV demora a accionar os mecanismos de segurança, ou seja, a reagir a uma interferência na área de proteção. Aqui foi considerado um valor, com alguma margem de segurança de 450 ms. Por sua vez, a distância de travagem deve ser calculada com base no binário do travão embutido no motor, que será utilizado aquando do acionamento dos mecanismos de segurança. Referir novamente que o travão não é certificado de segurança, o que foi tido em conta na implementação do protótipo. Sendo o binário do travão de 1,29 Nm [65], multiplicando este valor pela razão de transmissão de 1:10 da caixa redutora, obtém-se um valor de binário de travagem (T_b) de 12,9 Nm. Através deste consegue-se encontrar a força de travagem (F_b) gerada pelo sistema, tendo em conta a utilização dos dois motores para o efeito, tal como é representado na Equação 6.2.

$$F_b = \frac{T_b}{r_d} \times 2 = \frac{12,9}{55 \times 10^{-3}} \times 2 \approx 458,2 \text{ N} \quad (6.2)$$

, onde r_d representa o raio da roda.

Com a força de travagem F_b calculada, é possível obter o valor da desaceleração (a_b) e respetivo tempo de travagem (t_b) (tendo em conta a velocidade v de 1,2 m/s e a massa M de 200 kg), com recurso à Equação 6.3 e Equação 6.4, respetivamente.

$$a_b = \frac{F_b}{M} = \frac{458,2}{200} \approx 2,29 \text{ m/s}^2 \quad (6.3)$$

$$t_t = \frac{v}{a_b} = \frac{1,2}{2,29} \approx 0,53 \text{ s} \quad (6.4)$$

Calculados os valores do tempo de reação e travagem, encontram-se reunidas as condições para encontrar o valor do parâmetro S_A . Com o objetivo de facilitar a compreensão do cálculo do mesmo, é apresentado o gráfico da Figura 6.8.

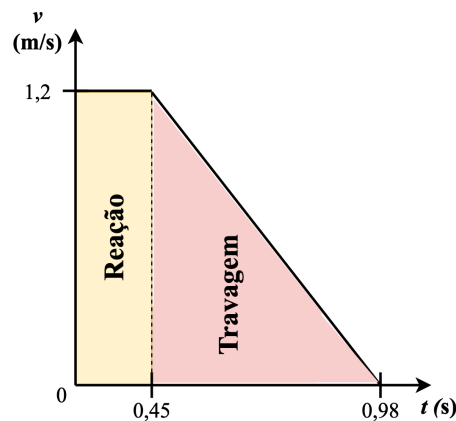


Figura 6.8: Distância de reação e travagem

Até aos 0,45 s o sistema não aciona os mecanismos de segurança, sendo por isso esta parcela relativa à distância de reação. Depois da reação, é accionado o travão de ambos os motores, levando a uma desaceleração linear. Com isto, calculando a área do gráfico através da Equação 6.5, obtém-se a parcela S_A .

$$S_A = 1,2 \times 0,45 + \frac{0,53 \times 1,2}{2} \approx 0,86 \text{ m} \quad (6.5)$$

Tendo o valor de todas as parcelas, basta apenas somá-las para se obter a distância de segurança S_L , como é calculado na Equação 6.6.

$$S_L = 0,86 + 0,065 + 0,100 + 0,140 \approx 1,17 \text{ m} \quad (6.6)$$

Cálculo da Largura da Área de Proteção

Relativamente à largura da área de proteção S_W , esta depende dos parâmetros T_Z , Z_R e Z_F referidos anteriormente, e também da largura do veículo V_W . Todas estas componentes já foram referidas, e definidos os seus valores anteriormente. Estão reunidas as condições para o cálculo de S_W , através da Equação 6.7.

$$S_W = V_W + 2 \times (T_Z + Z_R + Z_F) = 1,1 + 2 \times (0,065 + 0,1 + 0,140) = 1,70 \text{ m} \quad (6.7)$$

O comprimento S_L e largura S_W calculados, permitem definir uma área de proteção de 1,17 x 1,70 m, adequada para evitar danos ao veículo e objetos/pessoas em caso de uma situação inesperada durante o seu funcionamento.

Importante referir que os cálculos efetuados são para a área de proteção padrão. Normalmente, estas devem ser ajustadas durante o seu movimento e consoante a finalidade da operação que este pretende. Por exemplo, aquando da aproximação de uma determinada região onde o veículo pretende realizar uma operação, a área de proteção deve ser ajustada por forma a que não sejam acionados, de forma incorreta, os mecanismos de segurança.

6.3.2 Configurações Iniciais

Todo o processo de configuração dos sensores é efetuado com recurso ao Safety Designer, da SICK. Inicialmente define-se o seu protocolo de comunicação (EFI-pro), endereço IP e *Safety Network Number* (SNN). Este último parâmetro deve ser igual para todos os equipamentos que façam parte do sistema de segurança. Selecionou-se o tipo de operação como móvel, e configuraram-se as definições dos plano de monitorização e do dispositivo (Figura 6.9).

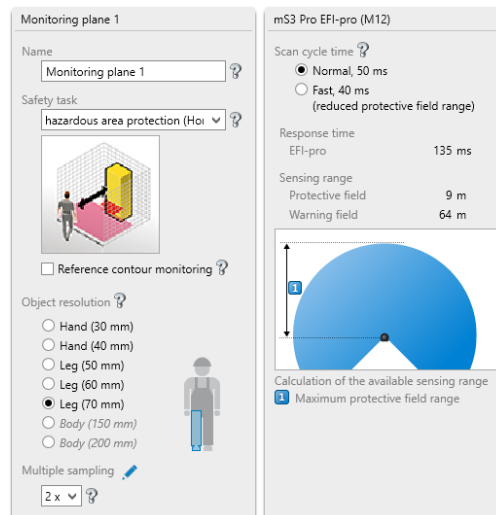


Figura 6.9: Configurações microScan3

A resolução definida na Figura 6.9, de 70 mm é indicada pela SICK como adequada para a detecção de uma perna humana. Uma resolução inferior poderia ter sido selecionada, caso a aplicação assim o exigisse, no entanto isto levaria a um maior atraso na transmissão de informação.

6.3.3 Definição dos Casos de Monitorização

O processo de definição dos casos de monitorização baseou-se nos cálculos descritos para a área de proteção, com o veículo a mover-se a 1,2 m/s. Foram definidos quatro casos de monitorização - onde cada um deles compreende uma área de proteção (área vermelha) e aviso (área amarela) - com a transição entre casos a ser efetuada consoante a velocidade do veículo. Para todos os casos, a área de aviso tem um comprimento e largura 20 % superiores aos da área de proteção. Os cálculos que permitiram obter os valores de comprimento e largura² das diversas áreas foram semelhantes ao descrito na Subsecção 6.3.1, alterando o valor da velocidade máxima para o caso específico. Os valores das quatro áreas definidas, bem como respetivos intervalos em que se encontram ativas, podem ser encontrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Áreas de proteção e aviso

Intervalo de velocidades	Área de proteção		Área de aviso	
	Comprimento	Largura	Comprimento	Largura
1 ($\leq 0,3$ m/s)	0,42 m	1,70 m	0,51 m	2,04 m
2 ($> 0,3$ m/s e $\leq 0,6$ m/s)	0,61 m	1,70 m	0,74 m	2,04 m
3 ($> 0,6$ m/s e $\leq 0,9$ m/s)	0,85 m	1,70 m	1,02 m	2,04 m
4 ($> 0,9$ m/s)	1,17 m	1,70 m	1,41 m	2,04 m

Definidos os valores das áreas para os diversos casos de monitorização, o próximo passo foi construir cada uma destas no Safety Designer. Os sensores encontram-se posicionados com um ângulo de 45° e de forma invertida, de acordo com o definido no projeto mecânico. De realçar que, para além de cobrirem a parte frontal, cada sensor protege uma das laterais do AGV. O resultado final encontra-se apresentado na Figura 6.10, com a escala em mm.

²Como a largura da área de proteção depende sempre de parâmetros fixos, esta assume sempre o mesmo valor.

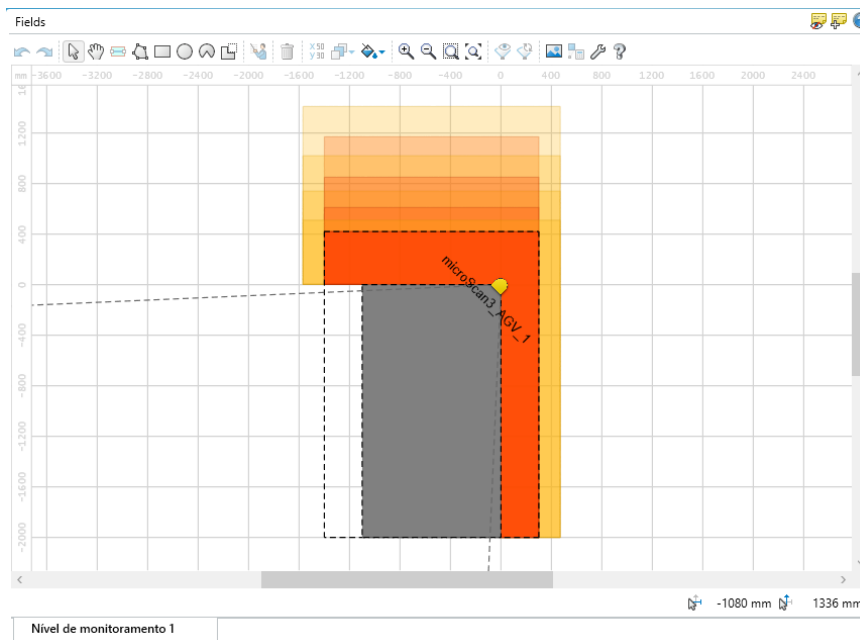


Figura 6.10: Criação das áreas de proteção e aviso

A área assinalada a cinzento, representa a estrutura do AGV, e indica que não se pretende uma monitorização das áreas de proteção/aviso nesta. Isto evita paragens desnecessárias devido a, por exemplo, a deteção de um objeto fixo na estrutura. Após a criação das áreas, encontram-se reunidas as condições para a definição dos casos de monitorização, apresentados na Tabela 6.3, e definidos no Safety Designer.

Tabela 6.3: Casos de monitorização definidos

Caso de Monitorização	Scanner 1 (frontal)	Scanner 2 (retaguarda)
1 <i>Fast Forward</i>	Campo 1,2	Campo 0,3
2 <i>Medium Forward</i>	Campo 0,9	Campo 0,3
3 <i>Slow Forward</i>	Campo 0,6	Campo 0,3
4 <i>Standstill</i>	Campo 0,3	Campo 0,3
5 <i>Fast Backwards</i>	Campo 0,3	Campo 1,2
6 <i>Medium Backwards</i>	Campo 0,3	Campo 0,9
7 <i>Slow Backwards</i>	Campo 0,3	Campo 0,6

6.3.4 Comutação entre Casos de Monitorização

Na tabela dos casos de monitorização (Tabela 6.3) é também necessária a definição de uma condição que indique ao sensor o caso de monitorização pretendido. A lógica baseia-se na ativação de determinado bit (A1, A2, B1, B2, C1, C2 ou D2), consoante a escolha pretendida. A troca de informação³ que leva a esta decisão é feita entre o PLC de segurança (FX3-CPU0), o PLC da Rockwell e o microScan3, como é ilustrado na Figura 6.11.

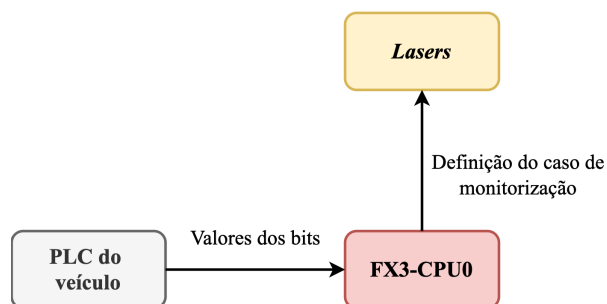


Figura 6.11: Troca de informação para seleção do caso de monitorização

O PLC verifica qual a velocidade e direção de movimento do veículo e, consoante o valor obtido, comuta o valor dos bits 0, 1 e 2. Esta informação é passada ao FX3-CPU0 que, consoante a análise feita, seleciona o caso de monitorização através das entradas definidas. Para cumprir o PL d, e garantir uma comutação segura de velocidades, teriam de ser utilizados *encoders* de segurança, e a avaliação era apenas feita no PLC de segurança. A combinação entre parâmetros pode ser analisada através da Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Lógica de decisão entre casos de monitorização

Casos de monitorização	PLC			PLC de Segurança						
	Bit 2	Bit 1	Bit 0	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

O parâmetro que determina o caso de monitorização é a velocidade atual do veículo, sendo que quanto mais rápido este for, maior serão as áreas de proteção/aviso.

³Para facilitar a comunicação entre o PLC e o FX3-CPU0, foi utilizado um ficheiro do tipo .eds (*Electronic Data Sheet*), fornecido pela SICK, e que contém a definição dos registos.

Outra nota vai para o facto do microScan3 colocado no sentido oposto ao movimento do veículo possuir sempre a área mais pequena, correspondente aos 0,3 m/s. Não se considera, para este caso, boa prática detetar interferências contrárias ao sentido de movimento, visto que estas poderiam originar reduções de velocidade e paragens desnecessárias. Assim, tem-se uma área reduzida que apenas garante que aproximações desnecessárias ao veículo são reconhecidas.

6.4 Configuração do PLC de Segurança (FlexiSoft)

A presente secção explica as configurações e funcionamento do sistema de segurança FlexiSoft. Inicia com a demonstração da integração dos módulos, seguindo-se a explicação da lógica implementada em caso de paragem de emergência e da comutação entre casos de monitorização.

6.4.1 Integração dos Módulos

O sistema FlexiSoft pressupõe a utilização de um módulo principal (FX3-CPU0), com a opção de serem adicionados módulos adicionais. Na arquitetura do sistema, foi definida a utilização de um módulo para a comunicação através do protocolo Ethernet/IP (FX3-GEPRO) e ainda um de E/S (FX3-XTIO84002). O Safety Designer possibilita a configuração destes, incorporando-os no sistema FlexiSoft, como demonstra a Figura 6.12.



Figura 6.12: Integração dos módulos do FlexiSoft

No módulo de E/S deve-se selecionar quais as entradas e saídas a utilizar, indicando que tipo de componentes se encontram ligados a estas. Para o presente caso, foram utilizadas duas entradas para os botões de emergência, e duas saídas para os contactores que accionam os motores. Quanto aos restantes módulos foi apenas necessário adicioná-los, por forma a que o sistema os reconheça, possibilitando a sua utilização.

6.4.2 Paragem de Emergência

Os mecanismos de emergência são acionados pelo AGV em duas situações: acionamento do botão de emergência ou invasão da zona de proteção. A lógica de funcionamento, implementada no Safety Designer, segue o apresentado no fluxograma da Figura 6.13.

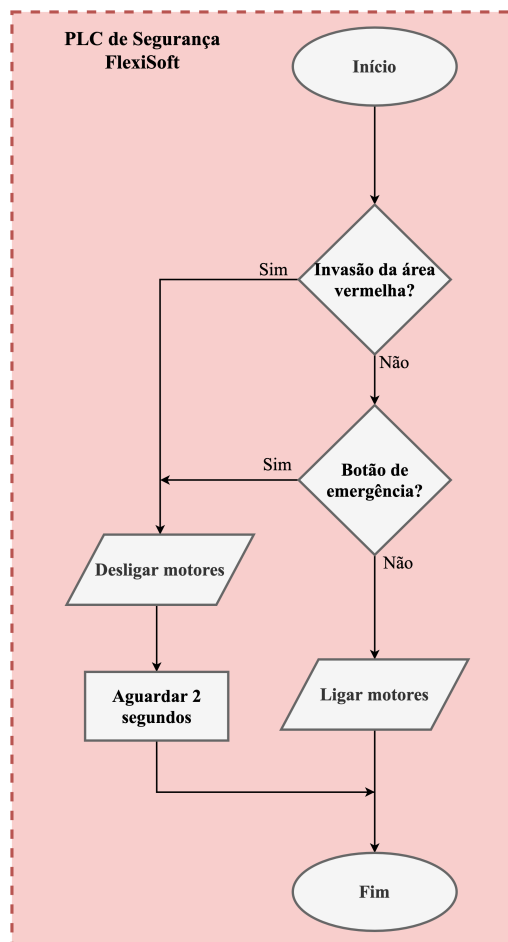


Figura 6.13: Fluxograma da paragem de emergência

Após realizadas as configurações iniciais, é verificado se pelo menos uma das condições de emergência se encontra ativa. Em caso positivo acionam-se os con-

tactores, cortando a energia a ambos motores, e como consequência desligando-os. O tempo de espera de 2 segundos prende-se com uma regra presente na norma ISO 1525 [21]: “quando uma pessoa se desloca no caminho do veículo, a operação deve ser reinicializada automaticamente com um atraso de pelo menos 2 segundos, seguida dos avisos próprios”. Por sua vez, no caso de nenhuma das situações de emergência se verificar, os motores encontram-se em normal funcionamento.

6.4.3 Lógica de Comutação de Casos - Modo Aviso

Em funcionamento sem deteção de qualquer interferência, nas áreas de proteção ou aviso, a lógica de comutação entre casos dá-se através do valor da velocidade. Os intervalos definidos, apresentados anteriormente na Tabela 6.2, levam a que quanto maior a velocidade, maior será a área dos campos de proteção e aviso.

No entanto, existe um caso específico apenas verificado quando é utilizado o modo manual do AGV (controlo da velocidade dos motores de forma independente e sem recurso ao ANT lite+) e que ocorre em caso de invasão da área de aviso (área amarela). Este é denominado de Modo de Aviso, e tem como objetivo efetuar uma redução gradual da velocidade, consoante é invadida a área de aviso, verificando continuamente se o veículo pode retomar a sua normal operação. Essencialmente, o Modo de Aviso foi desenvolvido para garantir uma segurança extra em certos testes efetuados no modo manual, como a avaliação das paragens de emergência, garantindo com a redução da velocidade um controlo mais seguro.

Este algoritmo de redução da velocidade podia ser aplicado em detrimento do utilizado pelo ANT lite+ para o mesmo efeito, no entanto optou-se por não o fazer por se considerar que o segundo é mais fiável e desenvolvido. Uma descrição mais completa do seu funcionamento pode ser encontrada no Anexo I.

Importa salientar que todo este procedimento necessita de um *encoder* de segurança para ser considerada uma comutação segura, como foi referido anteriormente na Subsecção 5.4.3. O plano é incorporar este dispositivo no futuro, para se garantir o PL d.

6.5 Integração Motores - ANT lite+

Estabelecidas as configurações do sistema de segurança e dos sensores, seguiram-se os motores em que, para além da sua parametrização, é necessária a sua integração com o ANT lite+. Tal como foi descrito anteriormente na apresentação da arquitetura do sistema, esta passa pela utilização do PLC como meio de transmissão, levando à utilização do denominado PLC *mode*.

6.5.1 Configuração dos Motores

Os motores utilizados, MAC402-D5, possuem um *software* de configuração próprio denominado de MacTalk. Este pode ainda ser utilizado para efeitos de monitorização e diagnóstico, servindo como suporte à garantia de operação do motor de acordo com o previsto. Na Figura 6.14 é visível a página principal de configurações e monitorização do *software*.

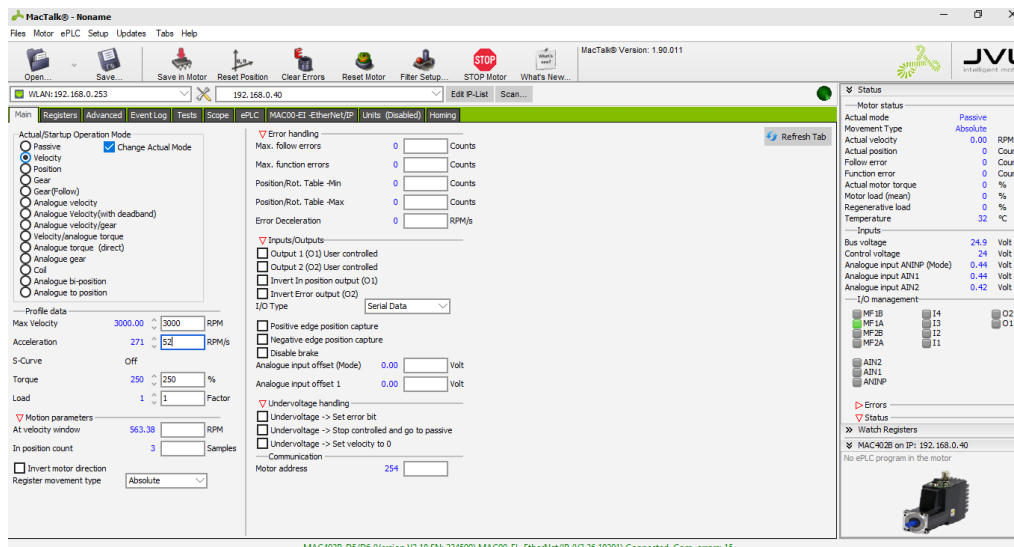


Figura 6.14: MacTalk - configurações e monitorização

A parametrização do motor foi de acordo com o especificado anteriormente onde, a título de exemplo, a velocidade máxima permitida é de 3000 rpm e o binário limitado a 250%.

Para além das configurações, tem-se ainda a secção de monitorização (lado direito da Figura 6.14), permitindo aferir sobre dados como, por exemplo, temperatura do motor, tensão de alimentação, velocidade atual e possíveis erros.

Nota importante vai para uma aspeto ainda não referido, o modo de operação, e que também é seleccionável através do MacTalk. Existem 13 modos de operação, podendo ser encontrado o resumo de cada um no Anexo H. Para o caso do protótipo de AGV foram utilizados 3 modos: *passive*, *position* e *velocity*. O primeiro encontra-se ativo quando o motor se encontra num estado passivo, ou seja, sem qualquer tipo de instrução de movimento. O segundo é utilizado quando se pretende que o motor se movimente para determinada posição. Por último, o modo mais utilizado (*velocity*), que recolhe informação sobre a velocidade pretendida e atua o motor nesse sentido, permitindo também a inversão do movimento.

6.5.2 Instruções de Comunicação

Antes de realizada a integração entre os motores e o ANT lite+, é necessária a adição de instruções no PLC, como é visível na Figura 6.15, que permitam a realização de configurações extra e o envio de comandos para o motor. No caso do PLC da Rockwell, estas têm o nome de *Add On Instruction* (AOI), e foram disponibilizadas pela JVL.

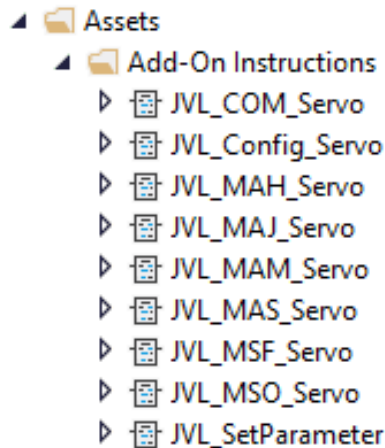


Figura 6.15: AOI disponíveis no PLC

Ao longo da presente subsecção são apenas descritas as AOI utilizadas, estando uma lista completa e um pequeno resumo das suas funcionalidades disponível através do Anexo J [77].

As AOI utilizadas foram as seguintes: JVL_COM_Servo, JVL_Config_Servo⁴, JVL_MAJ_Servo, JVL_MSO_Servo e JVL_MSF_Servo. A JVL_COM_Servo, gere a comunicação entre o PLC e o motor, garantindo uma troca de dados cíclica. A JVL_Config_Servo serve para parametrizar o motor, definindo determinados parâmetros, como o valor da caixa redutora e/ou as unidades utilizadas (rpm, m/s, entre outros). Não possui tantas opções como o MacTalk, mas possibilita a alteração de alguns parâmetros sem se recorrer a este. A terceira AOI apresentada, JVL_MAJ_Servo, coloca o motor no modo *velocity*, permitindo a alteração da sua velocidade, aceleração e sentido de rotação. Por último, a JVL_MSO_Servo e JVL_MSF_Servo, são utilizadas para ligar e desligar (modo *passive*) o motor, respetivamente.

⁴Esta AOI deve ser utilizada para definir alguns parâmetros necessários ao bom funcionamento de outras. Por exemplo, para a JVL_COM_Servo funcionar adequadamente, devemos indicar aqui o tipo de motor que estamos a utilizar (MAC402-D5).

6.5.3 Integração com o ANT lite+

Como já foi apontado anteriormente, a interação entre os motores e o ANT lite+ terá como intermediário o PLC, levando ao denominado PLC *mode*. Através da consulta do *datasheet* do produto da Bluebotics [47], verificou-se que são exigidos dois tipos de blocos de dados: genérico e controlo dos motores. O primeiro exige uma velocidade de transmissão bastante mais reduzida (100 ms) que o segundo (10 ms), e é relativo a informação genérica (posição atual, velocidade lateral e rotacional, aceleração máxima, entre outros), com transmissão bidirecional. O bloco de dados de controlo dos motores requer uma taxa de transmissão mais elevada (10 ms) (para garantir uma rápida atuação e um movimento mais preciso), e é também transmitido de forma bidirecional.

Em particular, e devido ao ANT lite+ suportar mais que um tipo de configuração, no bloco de dados dos motores foi selecionada a configuração diferencial. A informação trocada entre o ANT e o PLC, relativamente a este bloco de dados, é a apresentada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Bloco de dados para controlo dos motores

Valor	Tipo	Unidades	Observação
ANT → PLC			
<i>leftTargetSpeed</i>	INT16	rpm	Velocidade alvo para o motor esquerdo
<i>rightTargetSpeed</i>	INT16	rpm	Velocidade alvo para o motor direito
<i>controlBits</i>	BYTE	-	Bit 0: ativar motor esquerdo Bit 1: ativar motor direito
PLC → ANT			
<i>leftActualSpeed</i>	INT16	rpm	Velocidade atual do motor esquerdo
<i>rightActualSpeed</i>	INT16	rpm	Velocidade atual do motor direito
<i>statusBits</i>	BYTE	-	Bit 0: motor esquerdo pronto Bit 1: motor direito pronto

O ANT lite+ envia a informação relativa à velocidade desejada para os motores esquerdo e direito, e também os *bits* de controlo dos mesmos. Por sua vez, recorrendo ao *encoder* incorporado em cada um dos motores, são fornecidos os valores de velocidade atuais ao ANT lite+. Esta informação é bastante importante e deve ser o mais precisa possível, para que o algoritmo de navegação natural funcione de acordo com o pretendido. De acordo com o apresentado na Secção 3.3, e caso o referido não se verifique, a estimativa da posição do veículo ao longo do tempo pode ser imprecisa, originando erros futuros e conseqüentemente uma navegação não ótima.

6.5.4 Processo de Funcionamento

A implementação do funcionamento dos motores baseou-se nas AOI fornecidas pela JVL, com a sua lógica representada através do fluxograma da Figura 6.16.

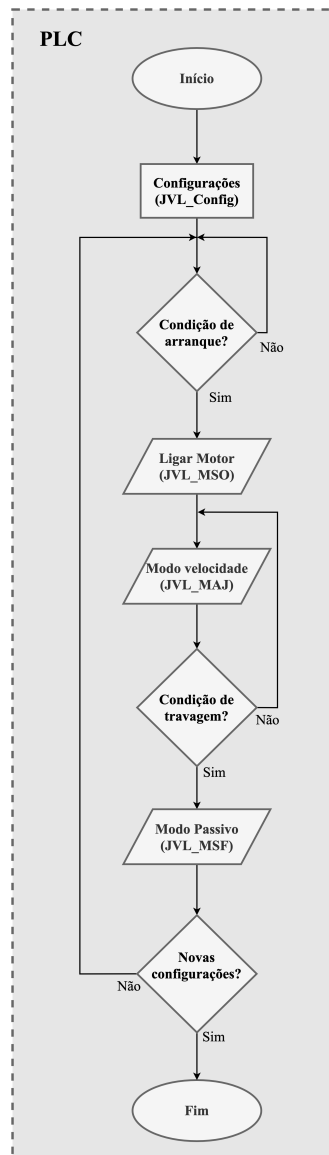


Figura 6.16: Fluxograma do funcionamento dos motores

Numa fase inicial, o motor executa a *JVL_Config_Servo* para efeitos de configuração do motor. Após isto, verifica se a condição de arranque já se encontra cumprida e, em caso afirmativo, energiza o motor através da *JVL_MSO_Servo*. Com o motor ativo e pronto para funcionar, é usada a *JVL_MAJ_Servo* para acionar o motor com a velocidade pretendida. Esta será fornecida pelo ANT lite+ ou pelo operador, no caso do modo manual (discutido mais à frente) se encontrar

selecionado. Por fim, caso seja acionado um mecanismo de travagem, o motor entra em modo passivo através da JVL_MSF_Servo, e verifica se é dada ordem para novas configurações do sistema. Em caso afirmativo é novamente executada a JVL_Config_Servo, caso contrário aguarda-se até nova ordem de arranque.

6.6 Configuração de Periféricos

Nesta secção demonstra-se a configuração dos periféricos utilizados - sinalizador luminoso, *buzzer* e HMI. Para os dois primeiros é representada a sua lógica de funcionamento, ressaltando alguns aspetos relativos a exigências por parte da norma de segurança de AGV. Em relação à HMI, são descritas as suas funcionalidades e modo de operação.

6.6.1 Sinalizador Luminoso e Buzzer

A utilização destes periféricos prende-se essencialmente, como apontado na Secção 5.5, com determinadas exigências por parte da norma de segurança dos AGV. As Figuras 6.17, 6.18 e 6.19 são ilustrativas do funcionamento do sinalizador luminoso. A Figura 6.20, por sua vez, refere-se ao funcionamento do *buzzer*.

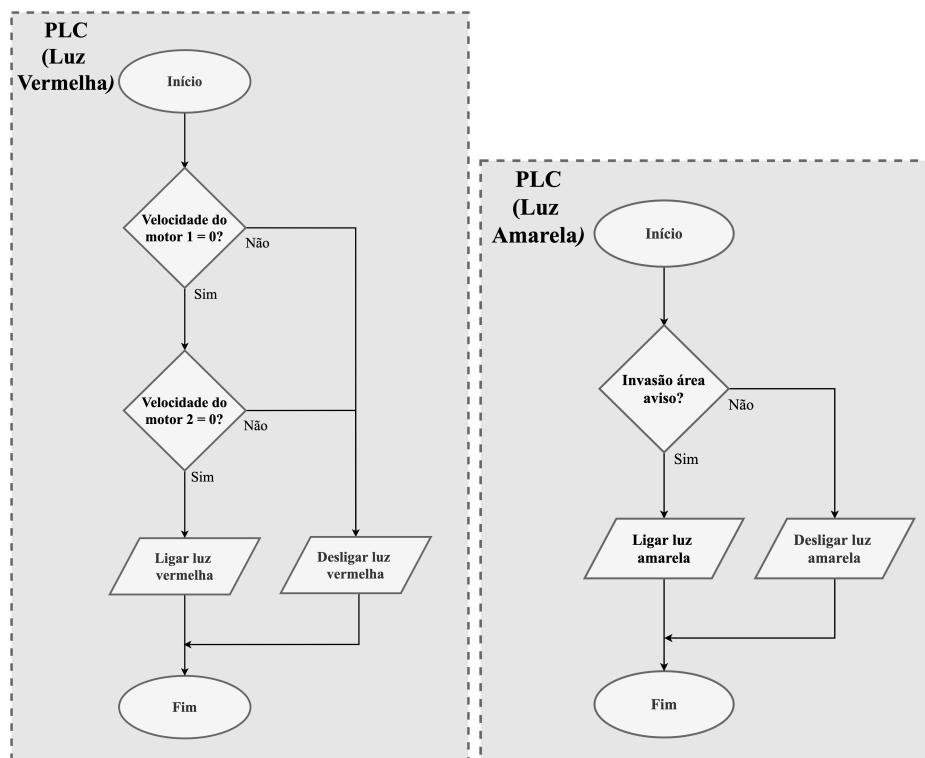


Figura 6.17: Fluxograma - luz ver- Figura 6.18: Fluxograma - luz ama-
melha rela

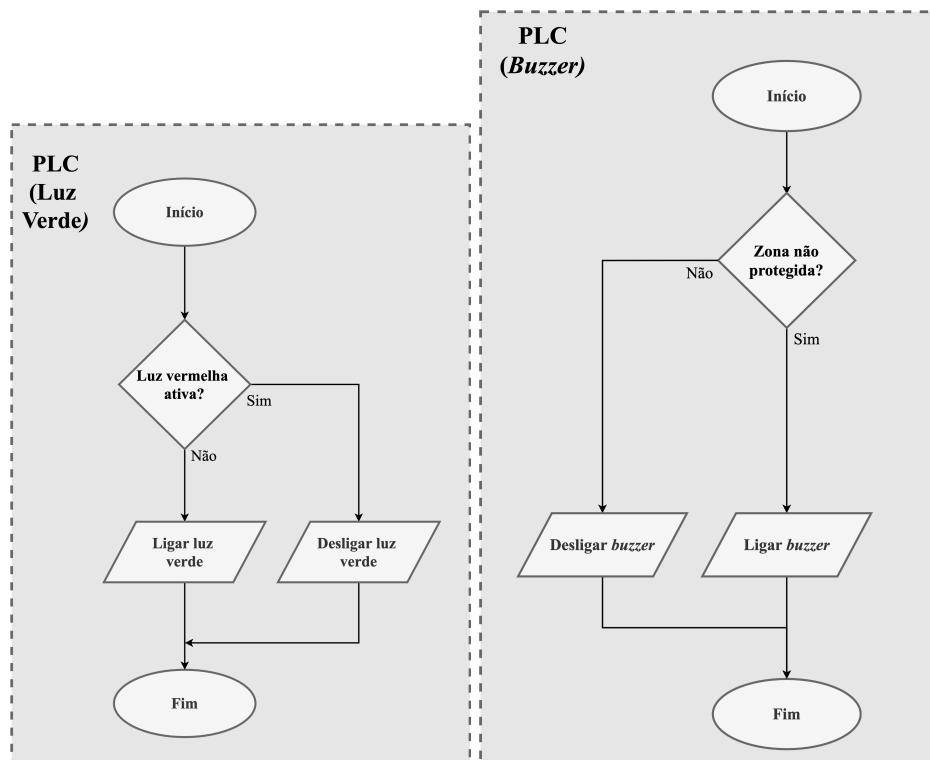


Figura 6.19: Fluxograma - luz verde Figura 6.20: Fluxograma - buzzer

Relativamente ao funcionamento do sinalizador, a luz vermelha encontra-se ativa quando a velocidade de ambos os motores é nula (veículo parado), a luz amarela no caso de invasão da área de aviso e a luz verde sempre que a velocidade, de pelo menos, um dos motores é não nula. Por sua vez, o *buzzer* sinaliza o movimento do AGV quando este se move numa direção não protegida pelos meios de deteção pessoais. Esta condição deve ser definida consoante o local onde o AGV opera.

6.6.2 HMI

Antes de apresentada a HMI e as suas funcionalidades, importa referir que o AGV pode operar em quatro modos distintos:

- **Manual** - permite alterar a velocidade de cada motor, tendo o limite máximo de 3000 rpm. Essencialmente utilizado para testes ao veículo;
- **ANT Automático** - navegação do veículo através do algoritmo de navegação natural do ANT lite+;
- **ANT Joystick** - movimento do veículo através do *joystick* conectado ao ANT lite+;

- **Passivo** - nenhum dos modos anteriores selecionados, veículo encontra-se em estado passivo.

Todos estes podem ser selecionados através da HMI desenvolvida, estando uma representação desta na Figura 6.21.

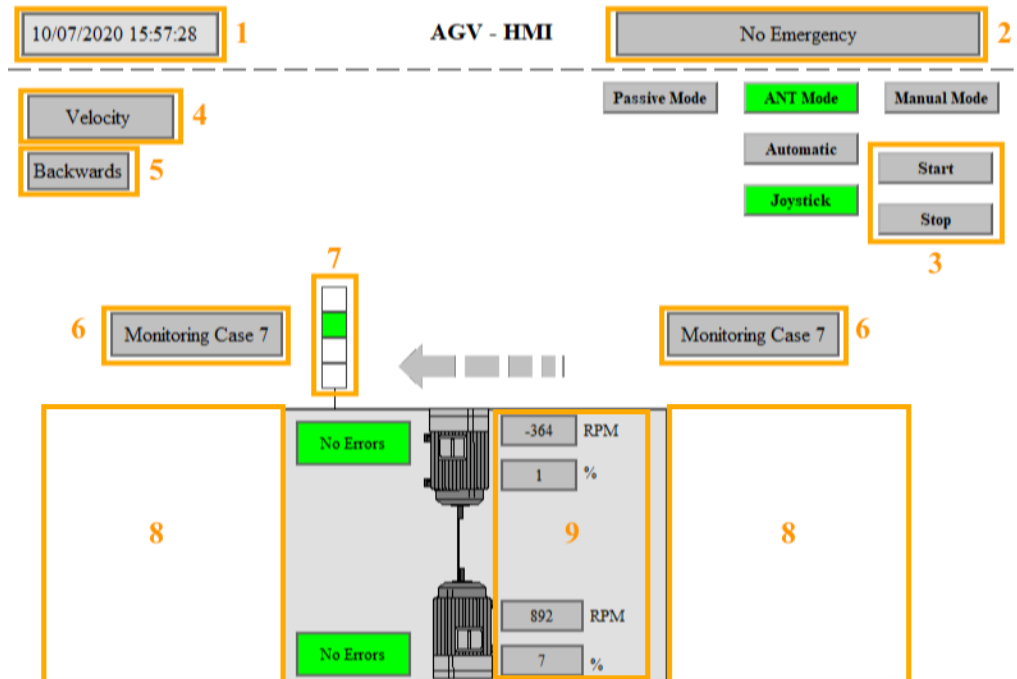


Figura 6.21: HMI do AGV

Relativamente à legenda Figura 6.21, em termos de funcionalidades gerais e comuns a todos os modos de operação, encontram-se disponíveis as seguintes:

- **1** - hora e data atual;
- **2** - sinalização caso uma das condições de emergência seja cumprida;
- **3** - arranque/paragem do sistema, com recurso aos botões *start* e *stop*;
- **4** - monitorização do modo de operação dos motores - *passive*, *position* ou *velocity*;
- **5** - avaliação do sentido do movimento do veículo - em frente ou para trás;
- **6** - informação do caso de monitorização atual, para ambos os sensores;
- **7** - estado do sinalizador luminoso e *buzzer* (a azul);

- **8** - informação caso a área de proteção (vermelha) ou aviso (amarela) sejam invadidas. Adicionalmente, o tamanho de cada uma aumenta/diminui consoante o caso de monitorização;
- **9** - monitorização da velocidade e binário atual de ambos os motores, bem como o seu estado de operação.

Quando selecionado o modo manual, são visíveis algumas opções extra relacionadas com este, como é demonstrado na Figura 6.22.

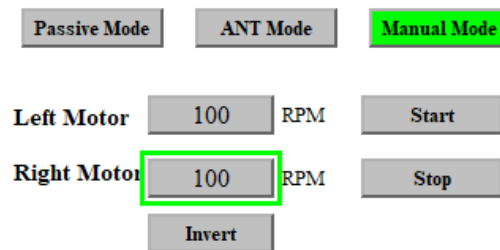


Figura 6.22: HMI - modo manual

Existe a possibilidade de modificar a velocidade alvo de ambos os motores e inverter o respetivo movimento, para além da habilitar e desabilitar o movimento.

Por sua vez, o modo ANT permite alternar entre o movimento automático e com *joystick* sendo que, caso selecionado o primeiro, é habilitada a opção de seleção da missão pretendida (Figura 6.23).

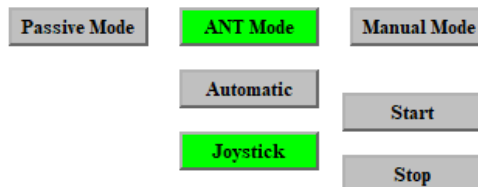


Figura 6.23: HMI - modo ANT

6.7 Configuração ANT lite+

Esta secção tem como objetivo descrever todas as configurações efetuadas ao produto da Bluebotics - ANT lite+. A sua integração é dividida em duas fases, pré-integração e integração avançada, que são apresentadas no decorrer da secção e que são a base para o correto funcionamento do sistema. No final é demonstrado o mapeamento do ambiente e definição de rotas.

6.7.1 Considerações Iniciais

A grande maioria do processo de configuração do ANT lite+ passa pela utilização do *software* de configuração próprio, ANT lab. No entanto, e como já foi referido na Subsecção 6.5.3, a utilização do PLC *mode* requer que toda a comunicação passe através do PLC, com recurso ao protocolo Ethernet/IP e utilizando os blocos de dados genéricos e de controlo dos motores. Sem esta integração ser bem sucedida não é possível utilizar o ANT lite+ e, como consequência, não é executado o seu algoritmo de navegação natural.

De salientar a importância referida pela Bluebotics [47] em existir um projeto mecânico bem definido, com os sensores cumprindo as exigências impostas, e com a estabilidade do veículo garantida. O não cumprimento do referido leva a que dados não ideais sejam utilizados pelo algoritmo de navegação, originando defeitos e diminuindo a sua qualidade.

6.7.2 Pré-Integração

Segundo a Bluebotics [47], a correta integração do veículo encontra-se dividida em duas partes: pré-integração e integração avançada. A primeira, tratada no decorrer da presente subsecção, tem como objetivo habilitar as funcionalidades básicas do veículo. No fim deste passo o veículo deve ser capaz de se mover manualmente (com recurso ao *joystick*) e fornecer a informação correta ao ANT lite+. As etapas da pré-integração são as seguintes:

- instalação e configurações iniciais do ANT lab;
- definição do endereço IP do ANT lite+;
- definição da odometria;
- configuração e verificação dos sensores (microScan3);
- validação da configuração.

Definição da Odometria

Os parâmetros da odometria são utilizados, em conjunto com o EKF, no algoritmo de estimação do movimento do veículo. Por isso, é bastante importante defini-los adequadamente no ANT lab. A Figura 6.24 ilustra os valores apontados.

Properties		
Name	Value	Unit
Left wheel radius	0,055	m
Right wheel radius	0,055	m
Wheel distance	0,9236	m
Lateral k	0	-
Left k	0,0004	-
Right k	0,0004	-
Left wheel gear	10	-
Right wheel gear	10	-
Latency	0	ms
Left wheel pulses	1	-
Right wheel pulses	1	-
Speed threshold	0,0001	m/s
Turn on the spot threshold	0,05	m
Turn radius threshold	2	m
Turn speed threshold	0,00572958	deg/s

Figura 6.24: Parâmetros da odometria do veículo

De destacar o raio da roda e a caixa de redução, de acordo com as especificações estabelecidas anteriormente, e ainda a distância entre rodas, obtida através da análise do projeto mecânico.

Configuração e Verificação dos Sensores (microScan3)

O primeiro passo, no procedimento desta configuração, foi indicar no ANT lab qual o sensor a utilizar - microScan3 (ver Tabela 4.6 para as diferentes soluções suportadas pela Bluebotics). Depois, através do Safety Designer, habilitou-se o envio de dados para o ANT lite+, para que este último tenha acesso à informação necessária. Com estes passos cumpridos, obteve-se a representação dos dados dos sensores, visível na Figura 6.25, no *software* da Bluebotics.

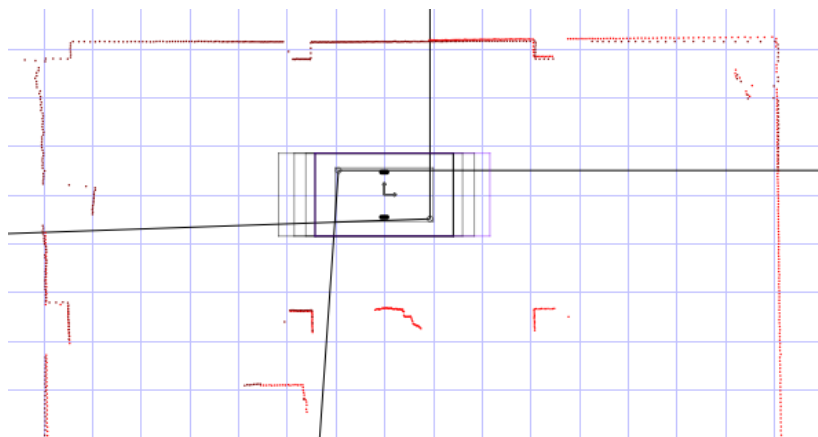


Figura 6.25: Representação dos dados dos sensores

São visíveis algumas das estruturas do espaço, desde logo as paredes, pilares (aproximadamente no centro) e também uma caixa, colocada por detrás do pilar do lado esquerdo. Nota importante para o facto de ter sido necessário redefinir

o ângulo de leitura de ambos os sensores, limitando-o para que este não mapeie nada no interior do AGV.

Validação da Configuração

Com as etapas da pré-integração apresentadas cumpridas, a última consiste na validação da configuração. Esta é efetuada com recurso ao movimento manual do veículo, através do *joystick*, e pretende verificar que os comandos corretos são seguidos pelo veículo e que a informação correta é transmitida ao ANT lite+. Para isso, a Bluebotics [47] define os seguintes passos:

1. anotar a posição do veículo no chão e executar um movimento retilíneo entre 3 m a 5 m;
2. verificar no ANT lab que a posição é atualizada corretamente com um erro máximo de 10%;
3. rodar o veículo 360° e verificar que a posição é atualizada corretamente com um erro máximo de 10%;

Os resultados obtidos, e que validam a pré-integração, são os apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Validação da configuração do veículo

Posição inicial	Posição final	Erro
x = 1,561 m	x = 6,564 m	0,04 %
y = -0,28 m	y = 0,034 m	6,28 %
$\theta = 176,1^\circ$	$\theta = 179,8^\circ$	2,1 %

Importante referir que, neste caso, o veículo atualiza a sua posição unicamente com recurso à sua odometria, não existindo qualquer tipo de mapa para melhorar a estimativa de posição. É esperado que após o mapeamento do ambiente este último fator seja melhorado.

6.7.3 Integração Avançada

Tendo a primeira parte cumprida, a pré-integração, encontram-se reunidas as condições para avançar para a integração avançada. Esta tem como objetivo ter todas as funcionalidades do AGV operacionais e a interagir corretamente com o ANT lite+. As etapas são as seguintes:

- configuração da forma do veículo;
- definição das *hull areas*;

- definição de parâmetros do movimento;
- calibração do veículo.

Configuração da Forma do Veículo

A configuração da forma do veículo é utilizada para interpretação no ANT lab, e é útil para uma melhor planificação de rotas. A representação no *software* é visível na Figura 6.26.

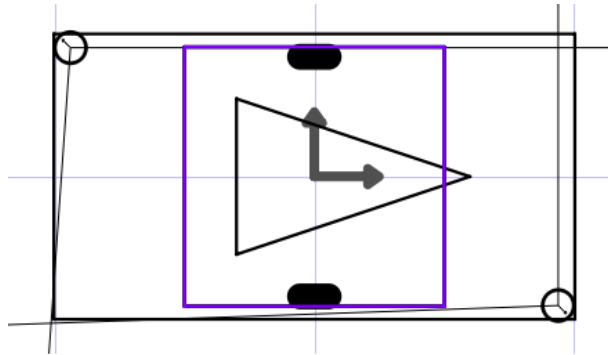


Figura 6.26: Forma do veículo no ANT lab

Definição das *Hull Areas*

As *Hull areas* correspondem às áreas de proteção do veículo e são utilizadas para determinada situação:

- ***fast forward*** (1) - movimento rápido, no sentido dianteiro;
- ***medium forward*** (2) - movimento a média velocidade, no sentido dianteiro;
- ***slow forward*** (3) - movimento lento, no sentido dianteiro;
- ***standstill*** (4) - quando o veículo se encontra parado ou a movimentar-se com velocidades muito reduzidas;
- ***fast backwards*** (5) - movimento rápido, no sentido traseiro;
- ***medium backwards*** (6) - movimento a média velocidade, no sentido traseiro;
- ***slow backwards*** (7) - movimento lento, no sentido traseiro;

O objetivo principal destas áreas é funcionar como um mecanismo que evita a colisão, reduzindo a velocidade (e eventualmente parando o veículo), antes que

qualquer emergência seja acionada. Novamente referir que a comutação entre áreas não é efetuada pelo ANT lite+, mas sim pelo PLC de segurança (FlexiSoft).

A representação das *hull areas* no ANT lab é visível na Figura 6.27.

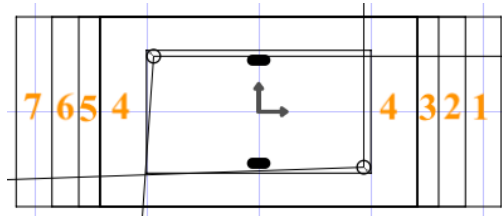


Figura 6.27: Representação das *Hull areas*

Definição de Parâmetros do Movimento

Para que o AGV se movimente de acordo com as especificações desejadas, é necessária a definição dos parâmetros que o possibilitem. Este passo é, à semelhança dos anteriores, efetuado no ANT lab, tal como é visível na Figura 6.28.

Properties	
Name	Value
Avoider const speed time	3
Distance controller gains	0.5 0.5 1.0 0.5
Free distance around hull	0,05
Heading controller gains	0.5 7.0 1.0 7.0
Ignore points in hull	FALSE
Longitudinal tolerance	0,005
Max back velocity	-1
Max centrifugal acceleration	0,2
Max. acceleration	0,3
Max. deceleration	0,3
Max. distance error	0,3
Max. heading error	30,023
Max. output of distance controller	0,349
Max. output of heading controller	10
Max. velocity	1,2
Min. curve radius	0
Min. dist to obstacle in path	0,05
Min. output of distance controller	-0,349
Min. output of heading controller	-10
On arrival tolerance	0,3
Reflex delay collision avoider	0,2
Rotation tolerance	2,00535
Stop deceleration	0,5
Turn acceleration	22,5172
Turn deceleration	22,5172
Turn stop deceleration	90,0117
Turn velocity	44,9772

Figura 6.28: Definição de parâmetros do movimento

Os parâmetros alterados foram essencialmente a velocidade, aceleração e desaceleração máxima, definindo-os para os valores estabelecidos previamente. De

referir que a qualquer momento, e consoante as exigências da aplicação em questão, estes parâmetros podem ser modificados.

Calibração do Veículo

A tolerância mecânica na produção pode levar a diferenças ligeiras em parâmetros como o posicionamento dos *scanners* ou das rodas. O processo de calibração visa estimar com precisão o valor de parâmetros críticos, como os referidos, para cada veículo. É um processo muito importante, que deve ser feito com muito cuidado, pois somente uma boa calibração pode garantir uma boa precisão no movimento.

Para o caso do ANT lite+, o procedimento de calibração é efetuado com o *joystick* e seguindo os movimentos apresentados na Figura 6.29, durante aproximadamente 2 minutos.

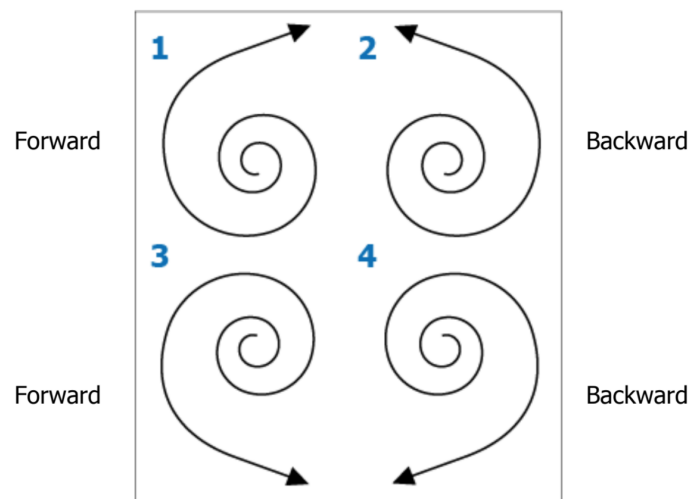


Figura 6.29: Procedimento de calibração [47]

Com o procedimento concluído, parâmetros como os referidos anteriormente foram ajustados para valores mais próximos da realidade. Para validar a calibração verificaram-se os valores kl e kr - valores que correspondem ao nível de confiança que o ANT tem na odometria do veículo. Os valores padrão são 0,004, sendo que valores mais baixos significam que o veículo pode percorrer distâncias mais longas baseando-se apenas na sua odometria (sem informação dos *scanners*) e um valor mais alto implica a necessidade de mais referências no ambiente.

Os valores kl e kr pré e pós-calibração, que validam o procedimento são os seguintes:

- **pré-calibração** - $kl = 0,007$ e $kr = 0,007$;
- **pós-calibração** - $kl = 0,053 \times 10^{-5}$ e $kr = 0,053 \times 10^{-5}$;

6.7.4 Construção do Mapa

A finalização da integração, onde foi validada a odometria do veículo e o seu movimento com recurso ao *joystick*, possibilitou avançar para a fase seguinte - o mapeamento do ambiente. Durante esta fase o ANT lite+ consegue extrair dois tipos de elementos que servem como referências [47]:

- **segmentos** - representam um objeto que foi visto pelo(s) laser(es) e extraído durante o processo de mapeamento. Tipicamente são paredes, caixas ou máquinas;
- **refletores** - em certos casos particulares, se não houver recursos de segmentos suficientes, os refletores podem ser usados como referências para a localização. Estes representam um local de alta refletividade. Para o caso atual, não houve a necessidade de utilizar este tipo de elementos.

O processo de mapeamento funciona com recurso ao SLAM, significando que o veículo necessita de ter referências constantes para a construção do mapa. É também importante movimentar o veículo várias vezes pelo mesmo local, devido ao algoritmo de mapeamento tirar partido deste ponto [47]. Seguindo as recomendações, foi efetuado o processo de mapeamento, do qual se obteve o resultado da Figura 6.30.

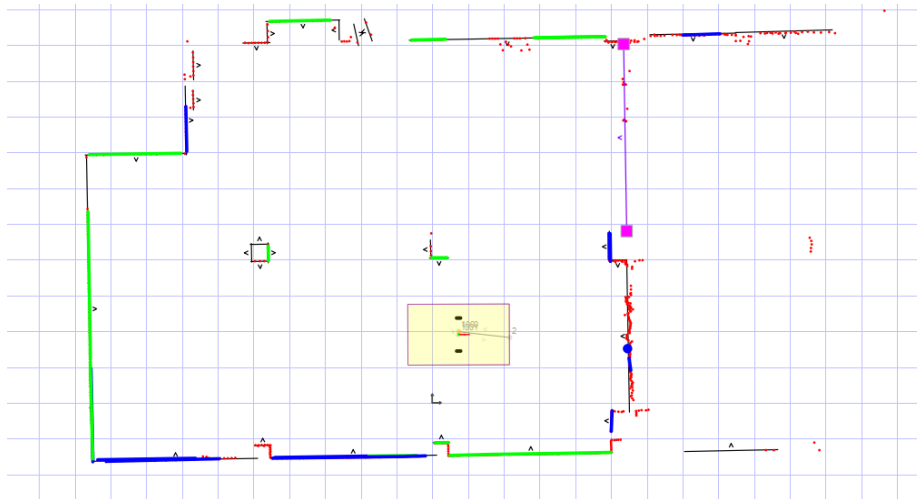


Figura 6.30: Mapeamento inicial do ambiente

Relativamente à Figura 6.30, é necessário efetuar uma “limpeza” do mapa, mantendo elementos como paredes, pilares e máquinas ou mobílias fixas e eliminando objetos móveis, portas que podem ser movimentadas e superfícies curvas extraídas como elementos retos [47]. O resultado final, pós-tratamento, é apresentado na Figura 6.31.

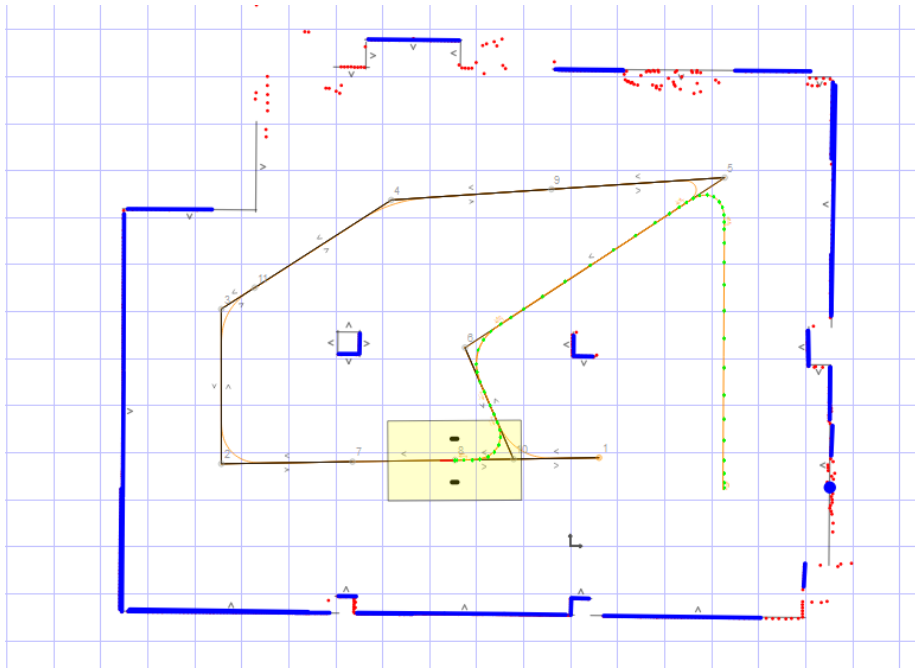


Figura 6.31: Mapa utilizado pós-tratamento

Esta fase, e mais concretamente o mapa obtido é, citando a Bluebotics [47], “o elemento mais importante do ANT lite+ para a sua localização”. Por isso, esta fase deve ser realizada com o maior cuidado e precisão, garantindo assim um melhor funcionamento do algoritmo de navegação natural.

6.7.5 Definição de Rotas

Tendo agora o mapa, juntamente com a odometria do veículo validada, encontram-se reunidas as condições para a definição das rotas do veículo. Estas são definidas através de:

- **nós** - representam os pontos de passagem do veículo. Os nós podem ser colocados em qualquer lugar do mapa e podem ser movidos a qualquer momento, conforme necessário. São representados por um número (identificação), uma seta (orientação do veículo no nó) e um raio (quão acentuada é a curvatura da trajetória);
- **ligações** - segmentos que conectam dois nós. Podem ser definidos como uni ou bidirecionais. As setas define(m) em que direção(ões) o veículo se pode mover.

As rotas definidas, apresentadas na Figura 6.32 a laranja, possuem 11 nós, com ligações uni e bidirecionais entre eles.

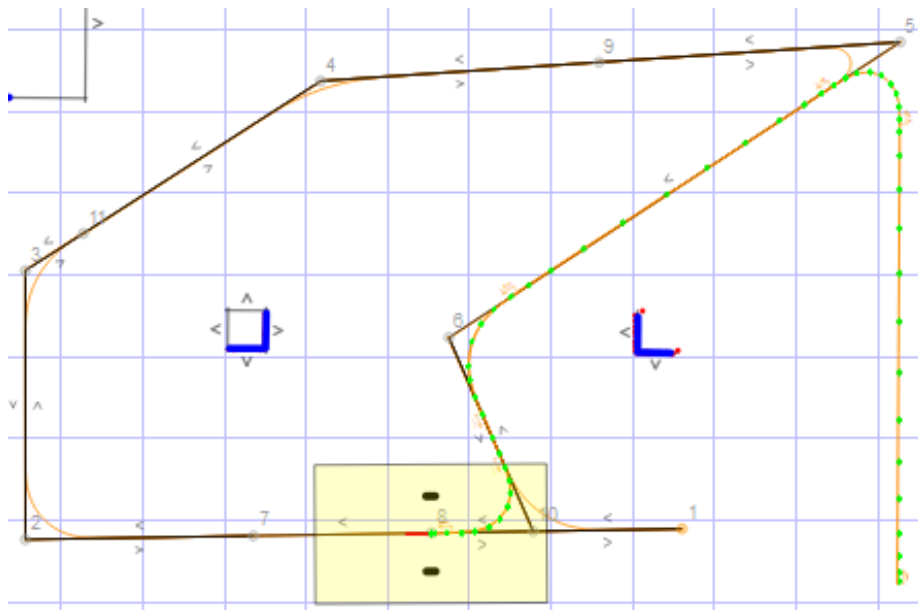


Figura 6.32: Definição das rotas

Por exemplo, a ligação entre o ponto 4 e 5 é bidirecional, face à ligação unidirecional entre o ponto 5 e 6. De salientar ainda as linhas a verde, que representam os locais pelas quais o veículo se tinha movimentado, na altura.

Sendo assim, encontram-se reunidas todas as condições para testar e validar os diversos aspetos do veículo, desde a sua segurança até ao algoritmo de navegação natural.

Capítulo 7

Testes ao Protótipo

O presente capítulo expõe a avaliação e validação efetuada ao protótipo. Isto foi possível através de diversos testes, e respetivos resultados, que são apresentados e ponderados, por forma a justificar os valores obtidos.

7.1 Testes Propostos

A presente secção tem como objetivo contextualizar o leitor sobre a estrutura adotada no decorrer do capítulo. Para uma avaliação clara das diferentes partes envolventes do AGV, optou-se por dividir a sua fase de testes nas seguintes etapas:

- **segurança** - testar e validar todos os conceitos inerentes à segurança do AGV (paragens de emergência, validação das áreas de proteção, entre outros);
- **movimento** - verificar se o veículo se movimenta de acordo com o esperado, avaliando a veracidade dos cálculos efetuados no Capítulo 4;
- **HMI** - testar as diversas funcionalidades da HMI;
- **Bluebotics** - validar a solução do sistema de navegação o natural da Bluebotics.

Cada uma das etapas referidas corresponde a uma secção, onde são detalhados os diferentes parâmetros a avaliar e o procedimento adotado.

Para facilitar o processo de testes, e para estimar com maior precisão alguns dos parâmetros a avaliar (potência, binário, aceleração, entre outros), foi medida a massa do veículo, para a qual se obteve um valor de 175 kg, face aos 200 kg estimados anteriormente (Tabela 4.3).

A inclinação utilizada foi de 0.5° , um valor estimado, que se deve ao facto do piso apresentar desníveis em alguns dos seus pontos.

7.2 Segurança

A validação de todos os aspetos referentes à segurança do veículo foi o primeiro passo, em termos de testes. Ao garantir um sistema seguro, com os devidos mecanismos habilitados, é possível avançar com testes mais exigentes e com maior risco de danos (por exemplo, colocar o veículo com uma velocidade elevada).

7.2.1 Validação das Áreas de Proteção

Procedimento: atuar o veículo com o limite superior de velocidade dos casos de monitorização definidos, e verificar se este para em segurança quando encontra um objeto, medindo a distância entre o ponto de paragem e este. Foram efetuadas três medições para cada uma das áreas de proteção.

Resultados: os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Teste às áreas de proteção do AGV

Área de proteção	Teste 1	Teste 2	Teste 3
1 - 0,3 m/s	28 cm	30 cm	28 cm
2 - 0,6 m/s	40 cm	39 cm	40 cm
3 - 0,9 m/s	58 cm	57 cm	57 cm
4 - 1,2 m/s	44 cm	45 cm	40 cm

Avaliação: em todos os casos avaliados o veículo parou com uma distância considerada segura, possuindo ainda uma margem para possíveis imprevistos, como a possibilidade de derrapagem. Esta margem considerável deve-se aos cálculos das áreas terem em conta uma massa do veículo de 200 kg, o que inclui um fator de segurança associado, face aos 175 kg de massa real. Nota adicional para o facto de ser cumprida a norma de segurança que indica que o movimento do veículo só pode ser retomado após 2 segundos livres de qualquer emergência.

7.2.2 Acionamento dos Botões de Emergência

Procedimento: como foi referido, existem dois botões de emergência localizados em cantos opostos do AGV. O objetivo passa não só por validar o seu funcionamento, mas também por avaliar se o seu posicionamento é adequado. Para isso, foi colocado o veículo em movimento (em ambos os sentidos), e acionados os botões.

Resultados e Avaliação: em termos da paragem do veículo, este para de forma segura e rápida, o que valida neste aspeto ambos os botões de emergência. No entanto, a sua acessibilidade não é a melhor. Colocar os botões de forma mais centrada, próximos das bordas da estrutura, se possível inclinados, seria uma solução que garantiria um melhor acesso a estes. Outro fator importante, já referido na subsecção anterior, é que o rearme dos motores apenas é efetuado passado os 2 segundos estabelecidos no FlexiSoft.

7.2.3 Redução da Velocidade - Modo de Aviso

Procedimento: para validação do Modo de Aviso, o procedimento adotado consistiu em efetuar um movimento retilíneo, com a máxima velocidade (1,2 m/s), até que fosse detetada uma caixa na área de aviso (área amarela). A monitorização da velocidade é efetuada com recurso ao *software* dos motores, o MacTalk.

Resultados: o primeiro teste foi efetuado com as áreas definidas na Tabela 6.2, onde a área de aviso é 20% superior à de proteção. O resultado obtido encontra-se apresentado na Figura 7.1.

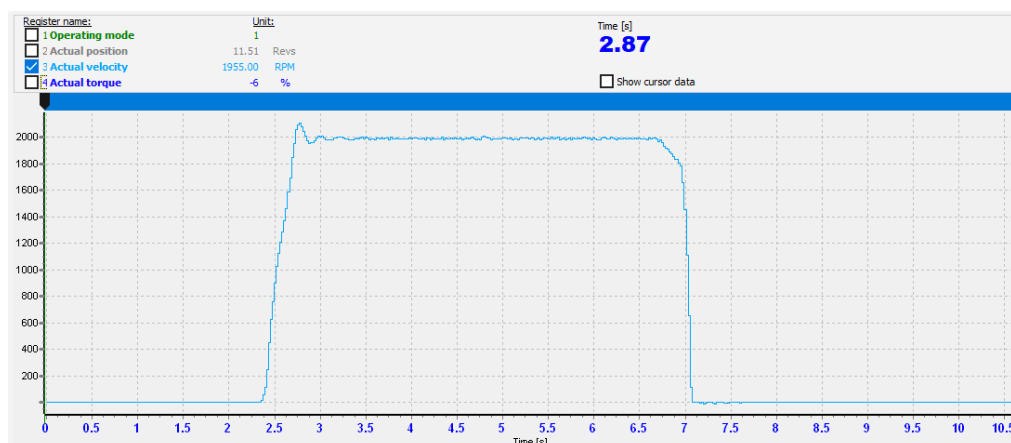


Figura 7.1: Primeiro teste ao Modo de Aviso

Relativamente à Figura 7.1, é visível que existiu uma única redução de velocidade, muito próxima do ponto de travagem, aproximadamente aos 6,5 s. Devido a este fator, foi necessário ajustar as áreas de aviso dos *scanners*, aumentando-as em 50%, face aos valores previamente estabelecidos. Esta alteração levou ao resultado da Figura 7.2.

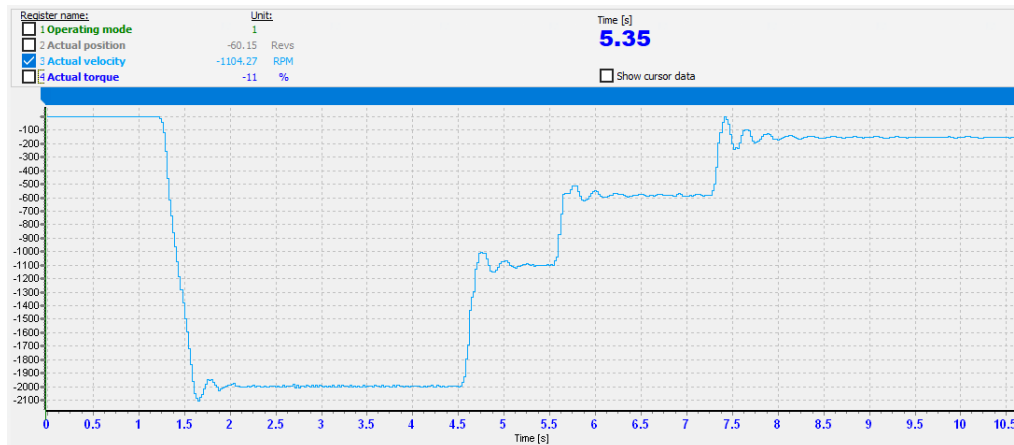


Figura 7.2: Segundo teste ao Modo de Aviso

Avaliação: como referido anteriormente, o primeiro teste não foi bem sucedido, não sendo a redução da velocidade feita de forma gradual e suave. Por sua vez, analisando os resultados do segundo teste, com áreas de aviso superiores, são visíveis as melhorias. Inicialmente começa-se no caso de monitorização 1 (1,5 s e 4,5 s) e quando é invadida a área amarela deste, efetua-se a redução de velocidade para o caso de monitorização 2 (4,5 s e 5,5 s). A redução continua a ser feita enquanto o objeto é detetado, passando depois para o terceiro caso de monitorização (5,5 s e 7,25 s), terminando com o caso com as áreas mais reduzidas.

Já foi ressaltado, num momento anterior, que este processo não é efetuado de forma segura, sendo para isso necessária a incorporação no projeto de um *encoder* de segurança. Outra nota vai para o facto deste algoritmo ser apenas utilizado no modo manual do veículo, devido ao ANT lite+ incorporar um mecanismo de redução de velocidade bastante mais robusto (e testado) que o desenvolvido.

7.2.4 Sinalizador Luminoso e Buzzer

Procedimento: verificar que as três luzes do sinalizador luminoso e o *buzzer* são acionadas nas situações estabelecidas.

Resultados e Avaliação: relativamente à luz verde, esta encontra-se ativa sempre que o veículo se encontra em movimento normal, cumprindo a exigência da norma EN ISO 1525 [21], que indica que deve existir um dispositivo visível quando o veículo se encontra pronto para iniciar o movimento ou durante o decorrer deste. No entanto, como melhoria futura, esta luz poderia ser rotativa, em vez de estática, facilitando a visualização. As restantes luzes (vermelha e amarela) e o *buzzer* funcionam de acordo com o previsto, não sendo apontada qualquer melhoria.

7.3 Movimento

Validada a implementação da segurança do veículo, encontram-se reunidas as condições para estudar o seu movimento. Este estudo foi baseado numa avaliação do comportamento dos motores, onde são comparados valores teóricos com experimentais, e também na estabilidade do veículo.

7.3.1 Comportamento dos Motores

Procedimento: mover o veículo em linha reta, durante o tempo necessário para avaliar os valores de velocidade e binário. A partir dos gráficos destes parâmetros, conseguidos com recurso ao MacTalk (*software* dos motores), obter outras variáveis, como a potência mecânica e a aceleração, comparando no final todos os resultados com os valores teóricos. Em relação a este último ponto, referir que os cálculos do protótipo (Tabela 4.4) tinham por base valores (como a massa ou o coeficiente de atrito) distintos dos apresentados na realidade, mas que na altura da análise são impossíveis de se estimar com precisão.

Por isso, nos resultados teóricos apresentados mais à frente é utilizada a massa real do veículo (175 kg) e dois coeficientes de resistência ao rolamento distintos ($c_r = 0,007$ e $c_r = 0,013$). O primeiro refere-se ao coeficiente indicado pelo fabricante das rodas para um chão de fábrica tradicional, e o segundo foi selecionado com um valor superior ao primeiro, para transparecer o maior atrito do pavimento de testes.

Outra nota vai para os gráficos traçados serem de apenas um dos motores, assumindo-se que os valores obtidos são semelhantes para o outro motor. Isto deve-se essencialmente à limitação do *software* de traçar em simultâneo o gráfico de dois motores.

Resultados: após definido o procedimento de testes, é possível visualizar os resultados obtidos através das Tabelas 7.2, Tabela 7.3, 7.4 e 7.5. Para efeitos de comparação com os valores teóricos, os resultados assumem um rendimento de 100%, caixa de redução de 1:10 e são avaliados em %Binário (12,7 Nm corresponde a 100%). Todos os gráficos traçados, que originaram os resultados obtidos, podem ser consultados no Anexo K.

Tabela 7.2: Teste ao movimento - 1,2 m/s

Teste 1,2 m/s	Teste1	Teste2	Teste3	Teórico ($c_r = 0,007$)	Teórico ($c_r = 0,013$)
Binário (em aceleração)	41,00 %	38,28 %	40,94 %	34,65 %	38,6 %
Binário (sem aceleração)	19,28 %	20,54 %	19,84 %	11,8 %	16,54 %
Tempo de Aceleração	3,81 s	3,92 s	3,98 s	4 s	4 s

Tabela 7.3: Teste ao movimento - 0,9 m/s

Teste 0,9 m/s	Teste1	Teste2	Teste3	Teórico ($c_r = 0,007$)	Teórico ($c_r = 0,013$)
Binário (em aceleração)	44,10 %	39,54 %	41,68 %	34,65 %	38,6 %
Binário (sem aceleração)	21,16 %	20,38 %	20,78 %	11,8 %	16,54 %
Tempo de Aceleração	2,91 s	2,89 s	2,85 s	3 s	3 s

Tabela 7.4: Teste ao movimento - 0,6 m/s

Teste 0,6 m/s	Teste1	Teste2	Teste3	Teórico ($c_r = 0,007$)	Teórico ($c_r = 0,013$)
Binário (em aceleração)	39,96 %	42,82 %	36,68 %	34,65 %	38,6 %
Binário (sem aceleração)	20,42 %	22,74 %	17,98 %	11,8 %	16,54 %
Tempo de Aceleração	1,97 s	1,95 s	1,99 s	2 s	2 s

Tabela 7.5: Teste ao movimento - 0,3 m/s

Teste 0,3 m/s	Teste1	Teste2	Teste3	Teórico ($c_r = 0,007$)	Teórico ($c_r = 0,013$)
Binário (em aceleração)	34,52 %	33,68 %	34,76 %	34,65 %	38,6 %
Binário (sem aceleração)	14,76 %	15,40 %	20,54 %	11,8 %	16,54 %
Tempo de Aceleração	0,89 s	0,92 s	0,91 s	1 s	1 s

Adicionalmente, através dos valores de binário e velocidade, foram calculados os valores de potência mecânica do sistema, apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6: Potência mecânica para as diversas velocidades

Teste à Potência	Teste1	Teste2	Teste3	Teórico ($c_r = 0,007$)	Teórico ($c_r = 0,013$)
Potência Mecânica (1,2 m/s com aceleração)	105,73 W	113,30 W	97,06 W	95,40 W	107,76 W
Potência Mecânica (1,2 m/s sem aceleração)	54,03 W	60,17 W	47,58 W	32,4 W	44,76 W
Potência Mecânica (0,9 m/s com aceleração)	87,52 W	78,47 W	82,71 W	71,55 W	80,82 W
Potência Mecânica (0,9 m/s sem aceleração)	41,99 W	40,44 W	41,23 W	24,30 W	33,57 W
Potência Mecânica (0,6 m/s com aceleração)	52,17 W	56,65 W	48,53 W	47,70 W	53,88 W
Potência Mecânica (0,6 m/s sem aceleração)	27,01 W	30,08 W	23,79 W	16,20 W	22,38 W
Potência Mecânica (0,3 m/s com aceleração)	22,80 W	22,24 W	22,96 W	23,85 W	26,94 W
Potência Mecânica (0,3 m/s sem aceleração)	9,74 W	10,17 W	13,56 W	8,10 W	11,19 W

Avaliação: começando pelos valores de aceleração, em todos os testes efetuados esta encontra-se num valor muito próximo do pretendido, considerando-se este valor bastante aceitável.

Relativamente ao binário, verifica-se que todos os valores se encontram bastante mais próximos dos obtidos para o c_r superior, confirmando que existe um atrito superior ao normalmente encontrado (com estas rodas) num pavimento fabril. Existem ainda, entre testes, diferenças que podem chegar aos 4% e que são justificadas pelo facto da área de testes não ter as mesmas condições (inclinação, atrito, entre outros), particularmente as irregularidades existentes no piso. No entanto, considera-se que os resultados obtidos são satisfatórios, e suficientes para confirmar os cálculos efetuados.

Por último, o valor da potência que depende da velocidade e binário, tem as mesmas características do referido no parágrafo anterior. As irregularidades no solo levam a que, em certos casos, existam pequenas discrepâncias entre os valores reais e teóricos. No entanto, as diferenças não são muito significativas, o que permite validar os cálculos.

7.3.2 Estabilidade do Veículo

Procedimento: mover o veículo pelos diversos pontos do local de testes, avaliando a sua estabilidade e eventuais limitações que possam existir.

Resultados: alguns dos dados apresentados, que ajudam no processo de avaliação da estabilidade, encontram-se aqui expostos. Desde logo o desnível na roda, verificado na Figura 7.3, causado por um desnivelamento no solo, provado com recurso à Figura 7.4.



Figura 7.3: Desnível na roda omnidirecional

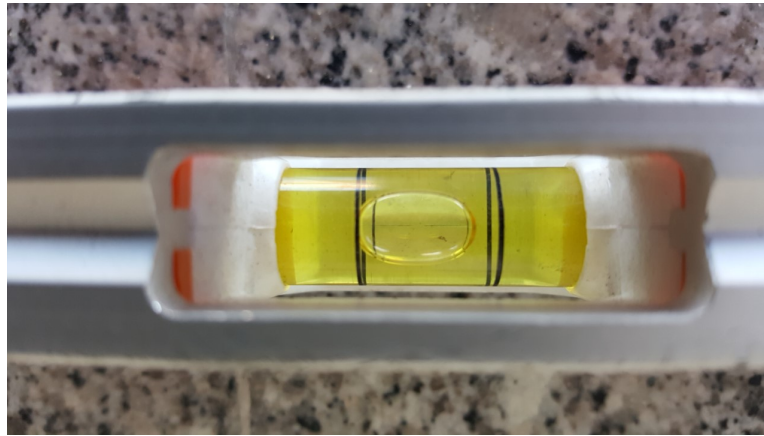


Figura 7.4: Avaliação do desnível do piso

Avaliação: os resultados apresentados levam à confirmação da informação apresentada na primeira secção do capítulo, onde se expôs o desnível existente em certos pontos. Este problema pode levar a uma dificuldade acrescida no controlo do veículo, particularmente no que toca ao algoritmo de navegação natural, podendo diminuir a sua qualidade. Ao se movimentar o veículo em locais desnivelados, o AGV irá inclinar naturalmente, levando a que os *scanners* sofram o mesmo efeito, e podendo levar ao não cumprimento duma das condições consideradas importantes pela Bluebotics [47] - garantir um desnível entre os *scanners* de ± 2 cm e $\pm 1^\circ$.

É importante, numa implementação futura, implementar uma solução que permita resolver este problema. Como sugestão, indica-se a utilização de uma suspensão no veículo ou garantir um nivelamento do solo.

7.4 HMI

A consola desenvolvida foi alvo de testes que permitissem validar as suas funcionalidades gerais e específicas a cada modo de operação. O procedimento, avaliação e resultados são apresentados no decorrer da secção.

Procedimento: atuar o veículo de diversas formas - iniciando o seu movimento, parando, alterando o valor da velocidade - por forma a validar as diferentes funcionalidades implementadas na HMI. Em simultâneo correr a HMI, verificando os dados apresentados e atuando nas diversas opções disponíveis.

Resultados: com o objetivo de facilitar a avaliação das funcionalidades, foram traduzidos os resultados obtidos para a Tabela 7.7. De forma complementar, são apresentadas as Figuras 7.5 e 7.6 que ilustram algumas das funcionalidades referidas.

Tabela 7.7: Avaliação das funcionalidades gerais da HMI

Funcionalidade	Resultado
Hora/data atual	A hora e data atual são apresentadas corretamente.
Sinalização de emergência	Quando é verificada uma das condições de emergência, esta é sinalizada corretamente.
Arranque/paragem do sistema	O arranque e paragem do sistema são efetuados da forma pretendida.
Monitorização do modo de operação dos motores	O modo de operação dos motores é alterado corretamente, consoante o estado atual do sistema.
Avaliação do sentido de movimento do veículo	O sentido do movimento do AGV é alterado corretamente.
Informação do caso de monitorização atual	Os sensores fornecem a informação correta, estando o caso de monitorização atual sempre coerente com o do sistema.
Estado do sinalizador luminoso e <i>buzzer</i>	O estado de ambos os periféricos é alterado corretamente, e em coerência com o <i>hardware</i> .
Informação da invasão da área de proteção/aviso	Quando as áreas são invadidas a informação correta é apresentada. Adicionalmente, o seu tamanho também é alterado corretamente consoante o caso de monitorização.
Monitorização de parâmetros dos motores	A velocidade, binário e estado de operação são apresentados de acordo com o apresentado no MacTalk, na sua secção de monitorização.
Modo Manual	O modo manual cumpre as tarefas pretendidas, sendo possível a alteração da velocidade em ambos os motores, inversão do sentido e paragem/arranque.
Modo ANT	A interação entre o PLC e o ANT lite+ é conseguida, sendo possível alternar entre o movimento automático e com recurso ao <i>joystick</i> .

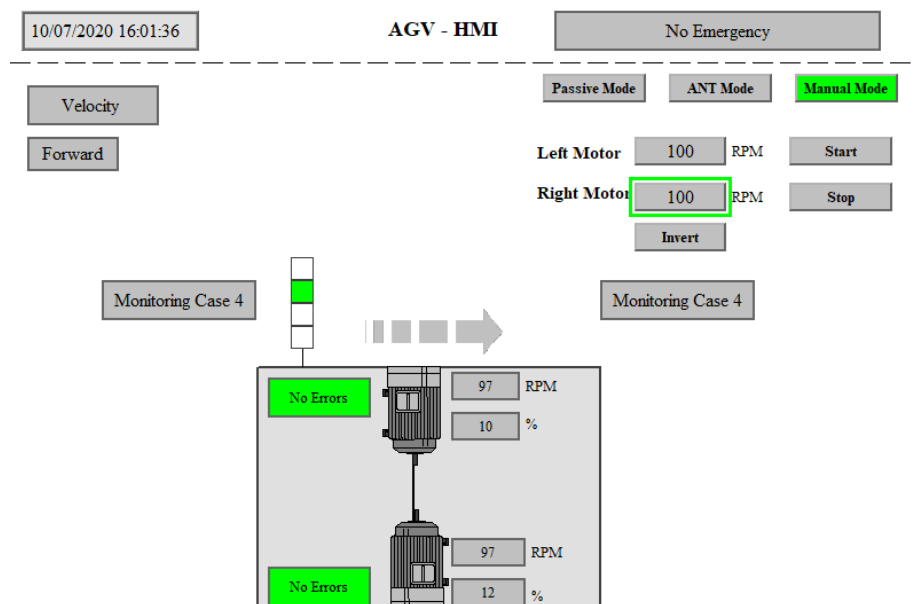


Figura 7.5: HMI - exemplo 1

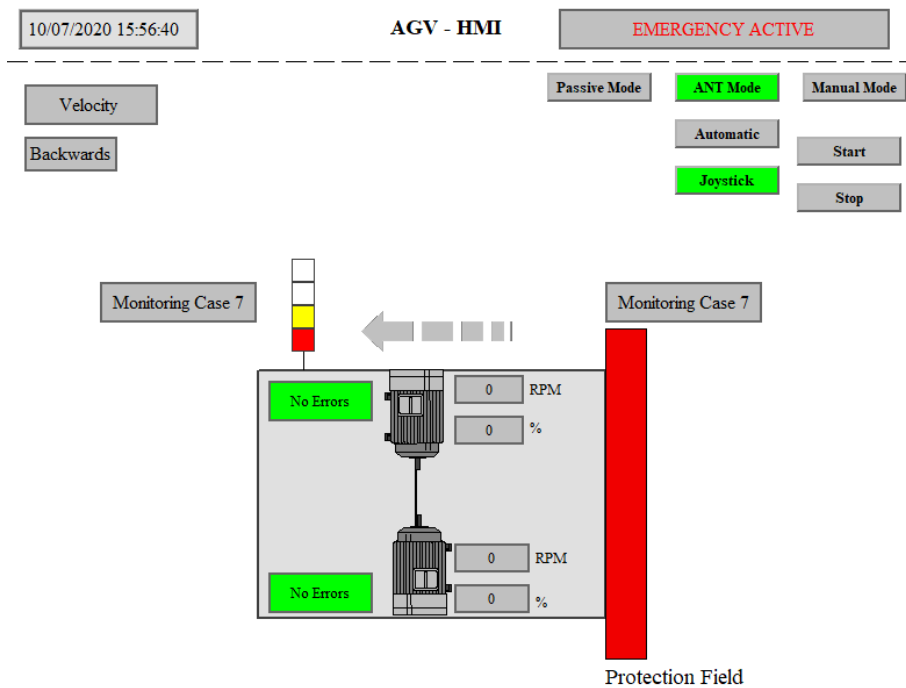


Figura 7.6: HMI - exemplo 2

Avaliação: todas as funcionalidades gerais disponíveis obtiveram os resultados pretendidos, o que valida o implementado e, como consequência, melhora a interação entre o operador e o AGV. A monitorização de parâmetros como a velocidade e binário atual, modo de operação dos motores, entre outros, facilita também a deteção de possíveis problemas que podem surgir durante a operação do veículo.

O modo manual do veículo (visível na Figura 7.5) também cumpre as especificações, permitindo a seleção da velocidade de cada motor, bem como a inversão do sentido do movimento, da forma pretendida.

Por último, o modo ANT, que facilita a alternância entre o movimento automático e com o *joystick*, também foi avaliado de forma positiva. Relativamente ao modo automático a seleção da missão também é conseguida e atua o veículo no sentido da cumprir.

7.5 Bluebotics

Cumpridas as fases anteriores de testes, encontram-se reunidas as condições para avaliar o produto da Bluebotics, o ANT lite+. Esta avaliação passou inicialmente pela verificação do funcionamento do *joystick*, seguindo-se um teste e validação da odometria e terminando com a análise à navegação natural do veículo.

7.5.1 Movimento com o Joystick

Procedimento: mover o veículo em várias direções, avaliando se o comportamento do *joystick* vai de acordo com o pretendido.

Resultados e Avaliação: o *joystick* funciona de acordo com o esperado. O AGV consegue efetuar movimentos retilíneos em ambos os sentidos, realizar curvas e rodar sobre si próprio, de acordo com o movimento do *joystick*.

7.5.2 Teste à Odometria

Procedimento: marcar a posição inicial do veículo no chão e, com recurso ao ANT lab, executar uma ordem de movimento linear de 3 metros. Medir a distância entre a marcação e o veículo, e retornar à posição inicial, avaliando a sua proximidade face ao definido. Este teste é efetuado unicamente com recurso à odometria do veículo, não dependendo de qualquer tipo de mapa para a estimativa de posição.

Resultados: após marcada a posição, e realizado o movimento linear de 3 metros, mediu-se a distância entre a posição inicial e final para o qual se obteve um resultado aproximado dos 3 m, salvo a resolução da fita métrica de ± 1 cm. As Figuras 7.7 e 7.8, demonstram o resultado obtido relativamente à posição inicialmente definida e o retorno à mesma após o movimento de 3 metros, respetivamente.

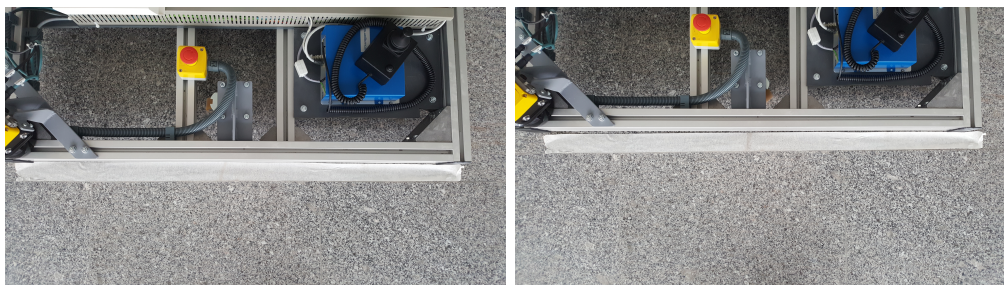


Figura 7.7: Marcação da posição inicial Figura 7.8: Marcação da posição final

Adicionalmente, e com o objetivo de validar a informação proveniente dos *encoders*, é apresentada a Figura 7.9, que ilustra a relação entre a velocidade alvo e a atual. Isto foi conseguido através de um programa desenvolvido pela Bluebotics para o efeito, com o nome de ViewMotion.

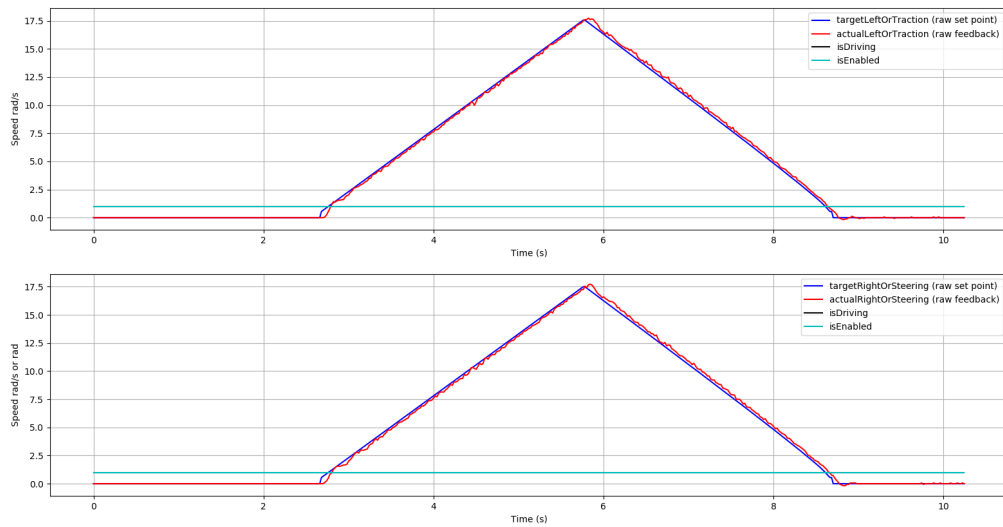


Figura 7.9: Velocidade alvo *vs.* velocidade atual

Avaliação: face aos resultados expostos, é possível validar a odometria do veículo. O veículo moveu-se de acordo com o esperado, cumprindo a ordem de movimento de 3 metros de forma precisa, salvo o erro de medição inerente. Também se verificou que o retorno à posição inicial foi bastante aproximado, o que pode ser confirmado através da marcação da posição. Por fim, referir um fator que contribuiu de forma significativa para os resultados obtidos o facto da informação proveniente dos *encoders* corroborar a velocidade alvo enviada pelo ANT lite+, tal como é apresentado na Figura 7.9.

7.5.3 Avaliação da Navegação Natural

Procedimento: mover o veículo através dos diversos nós, avaliando a qualidade da sua navegação natural. Também foram testadas/validadas as *hull areas* definidas, verificando se o principal objetivo da sua definição, a redução gradual da velocidade (evitando a colisão), é cumprida. Adicionalmente, foi avaliada a precisão de posicionamento nos 3 nós especificados na Figura 7.10, em três momentos distintos. Esta avaliação foi conseguida através da monitorização da posição atual *vs.* desejada no ANT lab.

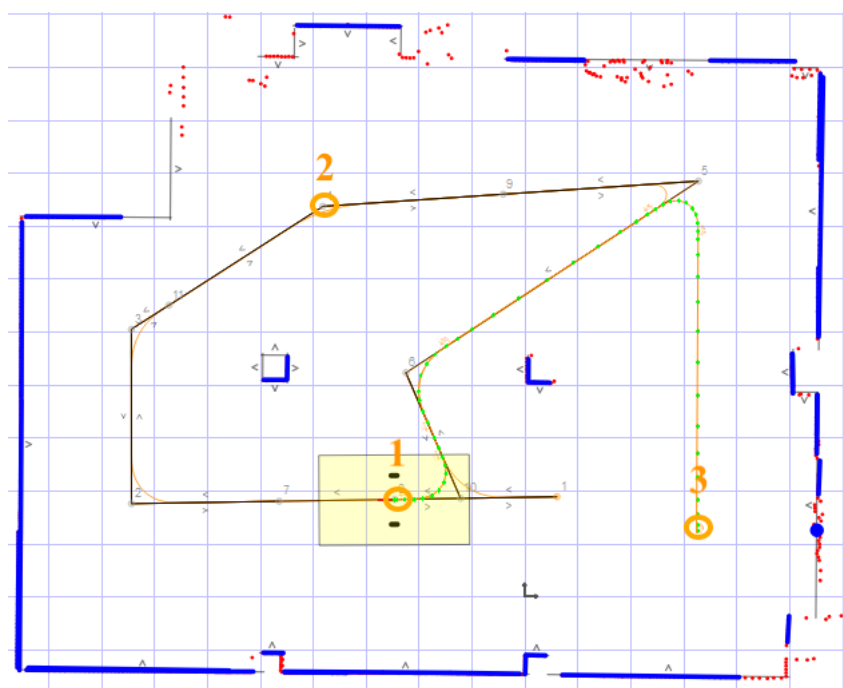


Figura 7.10: Nós alvo do teste de precisão

Resultados: Relativamente à precisão do posicionamento, os dados podem ser encontrados na Tabela 7.8. Por sua vez, a Tabela 7.9 representa os desvios em relação a cada eixo.

Tabela 7.8: Avaliação da precisão da navegação natural

Nó	Alvo	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Nó 1	x = -2,453 m y = 1,831 m	x = -2,464 m y = 1,832 m	x = -2,457 m y = 1,825 m	x = -2,457 m y = 1,818 m
Nó 2	x = -3,809 m y = 7,363 m	x = -3,839 m y = 7,382 m	x = -3,815 m y = 7,349 m	x = -3,812 m y = 7,384 m
Nó 3	x = -3,250 m y = 1,212 m	x = -3,260 m y = 1,206 m	x = -3,259 m y = 1,211 m	x = -3,259 m y = 1,208 m

Tabela 7.9: Avaliação da precisão da navegação natural - desvios

Nó	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Nó 1	x = 1,1 cm y = 0,1 cm	x = 0,7 cm y = 0,6 cm	x = 0,4 cm y = 1,3 cm
Nó 2	x = 3,0 cm y = 1,9 cm	x = 0,6 cm y = 1,4 cm	x = 0,3 cm y = 2,1 cm
Nó 3	x = 1,0 cm y = 0,6 cm	x = 0,9 cm y = 0,1 cm	x = 0,9 cm y = 0,4 cm

Avaliação: o veículo movimentou-se de acordo com o esperado, seguindo as rotas planejadas e sem qualquer tipo de problemas aparentes. A inclinação verificada no piso revelou não ser significativa o suficiente para afetar a precisão da navegação, o que pode ser confirmado pelos resultados da Tabela 7.8. Relativamente aos resultados apresentados nesta é analisável que a pior estimativa de posição é a do nó 2. Isto porque, olhando para a Figura 7.10, é o local onde o AGV se movimenta com recurso a menos referências (encontram-se assinaladas a azul), o que prejudica a precisão. Isto podia ser facilmente resolvido colocando refletores em pontos próximos do nó.

Outra nota bastante importante é que o veículo efetua a redução de velocidade corretamente, tentando sempre evitar o acionamento dos mecanismos de emergência. Isto é conseguido devido à boa comutação entre as *hull areas* (referidas na Subsecção 6.7.3), que funcionam como um mecanismo que evita a colisão.

Em suma, a escolha do ANT lite+ da Bluebotics, como base para a implementação da navegação natural, revelou-se bastante adequada. Desde o seu processo de implementação bastante claro, sempre apoiado por um bom manual [47], até à simplicidade de aprendizagem do funcionamento do ANT lab.

Capítulo 8

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

No decorrer do presente capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugeridos alguns desenvolvimentos a implementar no futuro.

8.1 Conclusões

O objetivo principal do trabalho consistiu no desenvolvimento dum protótipo de AGV que se movimenta com recurso a um sistema de navegação natural, e que fosse a base para uma implementação futura. Este ponto foi cumprido, encontrando-se o sistema desenvolvido e validado com recurso a um conjunto diversificado de testes, que foram desde a análise à segurança, até à navegação natural.

A primeira tarefa foi estudar em que consiste um AGV - desde os diferentes tipos existentes, aplicações em que este se insere, sistemas de controlo, métodos de navegação, sensores utilizados, entre outros. Isto permitiu aprender e clarificar alguns conceitos mais gerais sobre veículos autónomos, úteis para iniciar o desenvolvimento do projeto.

Como o tipo de navegação era um pré-requisito do projeto, foi importante explorar as características de um sistema de navegação natural. Foram identificados três principais sensores que permitem o mapeamento do ambiente (LiDAR, sonar e câmeras), parte fulcral num sistema que implemente um algoritmo SLAM. Através das câmeras consegue-se obter uma grande quantidade de informação, que não é possível através de sensores como LiDAR ou sonares. No entanto são uma alternativa menos utilizada devido à necessidade de uma maior capacidade de processamento. Possivelmente, com a constante evolução tecnológica, esta úl-

tima característica venha a ser melhorada ao ponto de se poder integrar de forma eficiente um sensor que forneça uma significativa quantidade de informação.

Outra parte fulcral na navegação natural são as estratégias de estimativa de posição. Aqui, o caminho a seguir é a abordagem integrada, que combina técnicas como o *scan-to-scan* e o *scan-to-map*, juntamente com a odometria do veículo, para ultrapassar as limitações inerentes ao uso individual de cada método, e fornecendo uma posição precisa. Ainda relacionado com o movimento do AGV, o simples uso da odometria origina uma acumulação do erro ao longo do tempo. Para corrigir este aspeto é normalmente utilizado um EKF, uma variação do KF utilizada em processos não lineares, e que melhora significativamente a estimativa da posição.

Com o estudo dos AGV e métodos de navegação cumprido, a próxima fase foi iniciar a análise de requisitos e soluções. Inicialmente, baseado nas características pretendidas, foi feita uma modelação do veículo que permitiu a obtenção dos requisitos necessários (potência, binário, entre outros) para este se mover de acordo com o proposto. Este passo foi executado tanto para o protótipo como tendo em vista uma implementação futura, esta última com uma exigência maior em termos de requisitos. De salientar que a seleção da grande maioria dos componentes foi realizada tendo em vista a sua utilização pós-protótipo, salvo raras exceções que foram sendo apontadas e justificadas.

Definidos os requisitos, estudaram-se as soluções presentes no mercado. Desde logo foi selecionada a solução em termos de navegação natural da Bluebotics, o ANT lite+, em torno da qual se baseou a análise de soluções para as restantes partes integrantes. A Bluebotics exige compatibilidade em determinados componentes, nomeadamente os *scanners*, limitando as escolhas. Para além dos *scanners* foram também analisados os tipos de motores, baterias e sistemas de carregamento mais adequados para a aplicação em questão, apresentando as vantagens/desvantagens das diversas alternativas. De forma complementar, foi também avaliada uma solução alternativa à da Bluebotics, que não se justificou em termos de flexibilidade da escolha de componentes e preço.

Tendo por base o ANT lite+ e as soluções estudadas, foi definida a arquitetura do sistema, onde se definiu exatamente quais os componentes a utilizar, bem como a forma como estes interagem entre si. É nesta etapa que, com recurso à análise de soluções, foram justificadas as escolhas adotadas em termos de sensores, motores, sistema de segurança, baterias, entre outros. Como referido, pretende-se que os componentes selecionados tenham em vista a sua utilização pós-protótipo, no entanto existem exceções, como as baterias, onde se evitou a necessidade de compra devido à disponibilidade destas nas instalações da empresa. Uma correta definição da arquitetura, permitiu facilitar a execução da fase seguinte - implementação prática.

Esta fase compreendeu todos os passos realizados para colocar o AGV operacional, desde a definição da estrutura elétrica e mecânica, até à programação e configuração das partes integrantes do sistema. Foi importante garantir que todos os componentes interagiam entre si de acordo com o pretendido, por exemplo, os motores serem acionados de acordo com a informação recebida pelo ANT lite+, a comutação entre casos de monitorização ser realizada corretamente, os sensores comunicarem corretamente com o ANT lite+, entre outros. Adicionalmente, foi desenvolvida uma HMI que facilita a interação entre o AGV e o operador, oferecendo funcionalidades de monitorização (estado dos motores, direção do movimento, caso de monitorização atual, entre outras) e de controlo (definição do modo de funcionamento, arranque/paragem do veículo, seleção da missão, entre outros).

De seguida, a última etapa, os testes e validação. A primeira avaliação realizada foi à segurança do sistema, onde se verificou e validou as distâncias de segurança definidas, o acionamento dos botões, as travagens de emergência, o sinalizador luminoso, o *buzzer* e o Modo de Aviso. Foi importante validar os mecanismos de segurança em primeiro lugar, para garantir que os testes futuros fossem realizados sem preocupações neste aspeto.

Cumprindo as condições de segurança, efetuou-se um estudo ao movimento do veículo, avaliando a sua estabilidade e se os requisitos definidos estão de acordo com o esperado. Em termos de estabilidade foi apontado o desnível do chão, que leva em certos pontos a uma inclinação não desejada do veículo, e que pode afetar o bom funcionamento do algoritmo de navegação natural. Quanto ao comportamento dos motores foram realizados testes para diversas velocidades, dos quais se conseguiu retirar parâmetros como o binário, tempo de aceleração e potência, e que permitiram validar os cálculos teóricos realizados num momento anterior. Uma dificuldade encontrada nesta validação foi a dificuldade em estimar parâmetros como o coeficiente de rolamento, onde inicialmente se assumiu um valor inferior ($c_r = 0,007$) indicado pelo fornecedor para determinado pavimento, mas onde os resultados indicam que (para o pavimento dos testes) este valor é superior.

A HMI desenvolvida foi outro alvo de testes, onde se validaram as suas funcionalidades de monitorização (velocidade atual dos motores, estado do sistema, caso de monitorização atual, entre outras) e de operação (selecionar o modo atual, arrancar/parar o movimento, entre outros). Apesar de possuir funcionalidades interessantes prevê-se que, numa implementação futura, esta consola seja melhorada, adicionando funcionalidades que possibilitem a interação com certos periféricos ou sistemas.

A fase de testes encerrou com a avaliação da base da arquitetura do sistema - o ANT lite+ da Bluebotics - e respetivo movimento do veículo com recurso ao

algoritmo de navegação natural. Validou-se o funcionamento manual do veículo com recurso ao *joystick*, o que permitiu avançar para o mapeamento do ambiente e definição de rotas. Estes dois últimos pontos são a base para se atingir a navegação natural, com particular destaque para o mapeamento do ambiente, onde um mapa bem conseguido melhora significativamente a estimativa de posição. A navegação natural do veículo foi atingida, e com resultados satisfatórios, que permitiu cumprir a premissa do projeto - desenvolvimento de um AGV para tarefas industriais, que se movimenta com recurso a um sistema de navegação natural.

Em suma, o protótipo de AGV encontra-se funcional e permitiu validar as soluções que foram estudadas e implementadas. É considerado como um bom ponto de partida para uma implementação futura, mais exigente em termos de características e funcionalidades, mas onde grande parte do trabalho já foi perspectivado tendo isto em consideração.

8.2 Desenvolvimentos Futuros

Como o projeto realizado consiste num protótipo, a margem para melhorias é extensa. Algumas sugestões já foram sendo apresentadas ao longo da dissertação, no entanto ficam aqui apontadas mais algumas:

- incorporação de *encoder* de segurança para garantir a comutação segura de velocidades;
- definir uma área de segurança própria para movimentos precisos, como inserir o veículo num local mais restrito em termos de espaço;
- desenvolver uma estrutura mecânica mais adequada incorporando, por exemplo, uma suspensão para garantir um melhor desempenho do veículo em planos inclinados;
- utilizar um sistema de carregamento mais desenvolvido, em detrimento do carregamento manual do protótipo. Sugere-se a utilização de baterias do tipo íões-lítio, com um esquema de carregamento alternado;
- inclusão de um travão certificado de segurança, evitando a necessidade de utilização do travão embutido dos motores (não certificado);
- testar o AGV num ambiente mais aproximado ao do seu local de funcionamento alvo, preferencialmente com um menor desnivelamento do pavimento.

Referências Bibliográficas

- [1] G. Ullrich, *Automated Guided Vehicle Systems: A Primer with Practical Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 ed., 2015. [citado na p. 7, 8, 11, 12, 16, 22]
- [2] M. S.-M. Hamed Fazlollahtabar, *Autonomous Guided Vehicles: Methods and Models for Optimal Path Planning*. Studies in Systems, Decision and Control 20, Springer International Publishing, 1 ed., 2015. [citado na p. 7]
- [3] N. G. Hall, C. Sriskandarajah, and T. Ganesharajah, “Operational Decisions in AGV-Served Flowshop Loops: Scheduling,” *Annals of Operations Research*, vol. 107, no. 1-4, pp. 161–188, 2001. [citado na p. 8]
- [4] C. Feledy and S. Luttenberger, “A State of the Art Map of the AGVS Technology and a Guideline for How and Where to Use It,” Master’s thesis, University of Lund, Lund, 2017. [citado na p. 8, 12, 14, 15, 17, 19, 20, 22, 60]
- [5] Marketsandmarkets, “Automated Guided Vehicle Market by Type.” Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automated-guided-vehicle-market-27462395.html>, 2019. Acedido em: 01/10/2019. [citado na p. 9]
- [6] T. M. Handling, “Toyota BT Staxio.” Disponível em: <https://www.toyotamaterialhandling.com.au/products/product-search/automatic-guided-vehicles/toyota-bt-staxio-sae160-agv-autopilot-stacker/{#}prettyPhoto>, 2019. Acedido em: 01/10/2019. [citado na p. 10]
- [7] S. Walsum, “Exploring the viability of AGV implementation in warehouses of express delivery companies,” Master’s thesis, Faculty of Technology, Policy and Management, 2018. [citado na p. 10]

- [8] A. Guide, “Towing Vehicles.” Disponível em: <https://www.automaticguidedvehicles.com/towing-vehicles/>, 2019. Acedido em: 05/10/2019. [citado na p. 11]
- [9] AssemblyMag, “AGVs - Mercedes.” Disponível em: <https://www.assemblymag.com/articles/92915-agvs-deliver-parts-to-mercedes-assembly-line>, 2015. Acedido em: 05/10/2019. [citado na p. 12, 13]
- [10] Conductix, “Advantages of Inductive Power Transfer.” Disponível em: <https://www.conductix.com/en/news/2015-10-20/using-wireless-battery-free-agvs-manufacturing>, 2015. Acedido em: 05/10/2019. [citado na p. 13]
- [11] G. Products, “VDL AGV.” Disponível em: <http://www.greenfieldpi.com/vdl-agv/>, 2019. Acedido em: 06/10/2019. [citado na p. 14]
- [12] M. Costa, “Implementação e Teste de Algoritmos de Planeamento e Escalonamento para Frotas AGV,” Master’s thesis, ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2018. [citado na p. 17]
- [13] E. Santos, “Logística baseada em AGVs,” Master’s thesis, FEUP - Faculdade Engenharia Universidade Porto, 2013. [citado na p. 17, 18, 20]
- [14] Gotting, “KATE small AGV.” Disponível em: <https://www.goetting-agv.com/news/2013/hmi/kate>, 2018. Acedido em: 06/10/2019. [citado na p. 18]
- [15] Amerden AGV, “AGV System Replacement Project,” tech. rep., Santa Rita, 2017. [citado na p. 18, 19]
- [16] AGV Network, “Types of AGV Navigation Systems - Automated Guided Vehicles.” Disponível em: <http://www.agvnetwork.com/automated-guided-vehicles-technology/agv-technology/types-of-agv-navigation-systems-automated-guided-vehicles>, 2019. Acedido em: 09/10/2019. [citado na p. 19, 20]
- [17] Lisa Eitel, “Electric actuators for better robotic-vehicle steering.” Disponível em: <https://www.therobotreport.com/electric-actuators-for-better-robotic-vehicle-steering>, Mar 2019. Acedido em: 14/10/2019. [citado na p. 21]
- [18] R. Rocha, “Estado da Arte da Robótica Móvel em Portugal.” Disponível em: <https://ap.isr.uc.pt/archive/37.pdf>, 2011. Acedido em: 17/10/2019. [citado na p. 21]
- [19] G. A. Covic and J. T. Boys, “Inductive Power Transfer,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, 2013. [citado na p. 22]

- [20] R. McHaney, “Modelling Battery Constraints in Discrete Event Automated Guided Vehicle Simulations,” *International Journal of Production Research*, vol. 33, no. 11, pp. 3023–3040, 1995. [citado na p. 22, 23]
- [21] International Organization for Standardization, “Driverless Industrial Trucks and their Systems,” EN ISO 1525, CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 1997. [citado na p. 24, 80, 83, 104, 126]
- [22] T. Bailey and H. Durrant-Whyte, “Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part II,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13, pp. 108–117, sep 2006. [citado na p. 25, 26]
- [23] AGV Network, “Natural Navigation Automated Guided Vehicles.” Disponível em: <http://www.agvnetwork.com/automated-guided-vehicles-technology/agv-technology/natural-navigation-automated-guided-vehicles>, Oct 2019. Acedido em: 10/10/2019. [citado na p. 26]
- [24] Spencer Allen, Aethon Inc., “Robots With Laser and Vision Systems Conquer New Industrial Terrain.” Disponível em: https://www.photonics.com/Articles/Robots_With_Laser_and_Vision_Systems_Conquer_New/a61118, Sep 2016. Acedido em: 11/10/2019. [citado na p. 26, 31, 33, 35]
- [25] J. Carter, J., Schmid, K., Waters, K., Betzhold, L., Hadley, B., Mataosky, R., Halleran, “Lidar 101 : An Introduction to Lidar Technology , Data , and Applications,” *NOAA Coastal Services Center*, no. November, p. 76, 2012. [citado na p. 26, 27]
- [26] ROS Components, “RS-LiDAR-16.” Disponível em: <https://www.roscomponents.com/en/lidar-laser-scanner/251-rs-lidar-16.html>, Oct 2019. Acedido em: 10/10/2019. [citado na p. 27]
- [27] SPAR 3D, “Ouster starts 2019 with a new \$18k 128-channel lidar, offering big benefits for 3d mapping.” Disponível em: <https://www.spar3d.com/news/lidar/>, Jan 2019. Acedido em: 10/10/2019. [citado na p. 27]
- [28] Phidgets, “MaxBotix EZ-1 Sonar Sensor - 1128_0 at Phidgets.” Disponível em: <https://www.phidgets.com/?tier=3&catid=5&pcid=3&prodid=100>, Oct 2019. Acedido em: 14/10/2019. [citado na p. 28]
- [29] Mundo Educação, “Sonar - Mundo Educação.” Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/sonar.htm>, Oct 2019. Acedido em: 14/10/2019. [citado na p. 28]

- [30] Chiang, Wen-chuan and Ramamurthy, Dhyana Chandra and Mundhenk, Terrell N. and Hall, Ernest L., “Range Detection for AGV Using a Rotating Sonar Sensor,” in *Intelligent Robots and Computer Vision XVII: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, vol. 3522, pp. 435–443, SPIE, oct 1998. [citado na p. 29]
- [31] Right Eyes, “Specular Reflection and Driving at Night - Right Eyes.” Disponível em: <https://drstyle.me/specular-reflection-driving-night>, Aug 2013. Acedido em: 14/10/2019. [citado na p. 29]
- [32] Prince, Dr Simon J. D., “Computer Vision: Models, Learning, and Inference,” *The Lancet Neurology*, vol. 12, no. 4, p. 335, 2013. [citado na p. 29]
- [33] J. Brownlee, “A Gentle Introduction to Computer Vision.” Disponível em: <https://machinelearningmastery.com/what-is-computer-vision>, Mar 2019. Acedido em: 14/10/2019. [citado na p. 30]
- [34] L. Vilaça, “Detecção e Reconhecimento Facial,” Licentiate Thesis, Instituto Superior Engenharia Porto, 2018. [citado na p. 30]
- [35] S. Sabikan, M. Sulaiman, S. Najib, S. Salim, and M. Fahmi Miskon, “Vision-Based Automated Guided Vehicle for Navigation and Obstacle Avoidance,” tech. rep., 2010. [citado na p. 31]
- [36] Y. Chen and G. Medioni, “Object Modeling by Registration of Multiple Range Images,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2724–2729, 1991. [citado na p. 32]
- [37] C. Brenneke and B. Wagner, “A Scan Based Navigation System for Autonomous Operation of Mobile Robots in Man-made Environments,” 2003. [citado na p. 32, 33]
- [38] K. Ryu, L. Dantanarayana, T. Furukawa, and G. Dissanayake, “Grid-based Scan-to-Map Matching for Accurate 2D Map Building,” *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 7, pp. 431–448, 2016. [citado na p. 32, 33, 34, 35]
- [39] H. Alves, “Navegação e Controlo de um Veículo Móvel,” Master’s thesis, Faculdade Engenharia Universidade Porto, 2010. [citado na p. 36]
- [40] H. Singh, “Kalman Filter Interview,” *Medium*, Jul 2018. [citado na p. 36]
- [41] G. Bishop and N. Carolina, “An Introduction to the Kalman Filter,” *In Practice*, vol. 7, no. 1, pp. 1–16, 2006. [citado na p. 36, 37, 38, 39, 40]
- [42] H. Singh, “Extended Kalman Filter: Why do we need an Extended Version?,” *Medium*, Sep 2018. [citado na p. 38, 39]

- [43] J. Borenstein and L. Feng, “Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 6, pp. 845–857, 1996. [citado na p. 41]
- [44] M. Wise, “Understanding the Basics of AMR Technology.” Disponível em: https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/AMR19_Melonee_Wise.pdf, 2019. Acedido em: 6/1/2020. [citado na p. 41]
- [45] J. Jung, H. Kim, K. Park, and K. Y. Lee, “State Estimation for Autonomous Guided Vehicle Using the Extended Kalman Filter,” *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, vol. 15, no. 1, pp. 487–492, 2002. [citado na p. 41]
- [46] BlueBotics, “Mobile Robots at your Service.” Disponível em: <https://www.bluebotics.com/>, Oct 2019. Acedido em: 31/10/2019. [citado na p. 50, 51, 52]
- [47] BlueBotics, “ANT lite+ - User Manual,” 2019. Versão 1.1. [citado na p. 54, 55, 69, 70, 107, 113, 115, 118, 119, 120, 130, 136]
- [48] SICK, “Safety Laser - Solve applications efficiently with SICK.” Disponível em: <https://docplayer.net/43906831-Safety-laser-scanners-safety-first-solve-applications-efficiently-with-sick-s-power-trio.html>, 2013. Acedido em: 23/1/2020. [citado na p. 55]
- [49] A. Hughes and B. Drury, *Electric Motors and Drives*. Newnes, 2013. [citado na p. 56]
- [50] M. Dirjish, “What Is the Difference Between Brush Dc And Brushless Dc Motors,” *Electronic Design*, 2012. [citado na p. 57]
- [51] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, B. Burr Ridge, I. Dubuque, I. Madison, and W. New York San Francisco St Louis Bangkok Bogota Caracas Kuala Lumpur Lisbon London Madrid Mexico City Milan Montreal New Delhi Santiago Seoul Singapore Sydney Taipei Toronto, *Electric Machinery*. McGraw-Hill, 6 ed., 1980. [citado na p. 58]
- [52] Electrical Technology, “Stepper Motor Construction Types and Modes of Operation.” Disponível em: <https://www.electricaltechnology.org/2016/12/stepper-motor-construction-types-and-modes-of-operation.html>[{_}motors.html](https://www.omega.co.uk/prodinfo/stepper_{_}motors.html)<https://www.electricaltechnology.org/2016/12/stepper-motor-construction-types-and-modes-of-operation.html>, 2018. Acedido em: 30/1/2020. [citado na p. 59]
- [53] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press, 3 ed., 2018. [citado na p. 60, 61, 149]

- [54] M. Mintz, J. Han, and A. Burnham, *Alternative and Renewable Gaseous Fuels to Improve Vehicle Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2014. [citado na p. 60]
- [55] N. Omar, Y. Firouz, M. Monem, A. Samba, H. Gualous, T. Coosemans, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, “Analysis of Nickel-Based Battery Technologies for Hybrid and Electric Vehicles,” in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, 2014. [citado na p. 61]
- [56] A. Yoshino, *Development of the Lithium-Ion Battery and Recent Technological Trends*. Elsevier B.V., 2014. [citado na p. 61]
- [57] Kishore Naik, Hemant Dashora, Manuele Bertoluzzo and Giuseppe Buja, “From Wired to In-Moving Charging of the Electric Vehicles,” no. Department of Industrial Engineering University of Padova, pp. 33–42, 2013. [citado na p. 62]
- [58] Sew-Eurodrive, “Factory automation | MAXOLUTION® | SEW-EURODRIVE.” Disponível em: <https://www.sew-eurodrive.de/automation/factory-automation/mobile-assistance-systems/transportation-vehicles/transportation-vehicles.html>, Oct 2019. Acedido em: 17/10/2019. [citado na p. 62]
- [59] Navitec Systems, “Pioneers in Natural Feature Navigation | Navitec Systems.” Disponível em: <https://www.navitecsystems.com>, Oct 2019. Acedido em: 17/10/2019. [citado na p. 63]
- [60] Kollmorgen, “Building agvs.” Disponível em: <https://www.kollmorgen.com/en-us/solutions/automated-guided-vehicles/building-agvs>, Aug 2018. Acedido em: 17/10/2019. [citado na p. 63]
- [61] WEWO Techmotion, “AGV Navigation.” Disponível em: <https://wewotechmotion.com/solutions/automatic-guided-vehicle/agv-software>, Oct 2019. Acedido em: 17/10/2019. [citado na p. 64]
- [62] SICK, “Safety Laser Scanners - microScan3.” Disponível em: <https://www.sick.com/ag/en/safety-systems-and-solutions/safety-systems/safe-efi-pro-system/mics3-cbaz90za1p01/p/p608646>, 2020. Acedido em: 27/03/2020. [citado na p. 70]
- [63] SICK, “EFI-pro - Safe Device Communication Via the Network.” Disponível em: https://cdn.sick.com/media/docs/5/25/025/Technical_information_EFI_pro_en_IM0084025.PDF, 2019. Acedido em: 05/04/2020. [citado na p. 71, 155]

- [64] JVL, “MAC Motor - Integrated Servo Motor.” <https://www.jvl.dk/files/pdf-1/brochures/lc0016gb.pdf>, 2020. LD0016-GB. [citado na p. 72]
- [65] JVL, “The MAC motor. AC-servo Motors with Integrated Driver MAC400 and MAC800.” Disponível em: [https://www.jvl.dk/files/_2011clean/pdf/ld083gb%20\(mac400-800\).pdf](https://www.jvl.dk/files/_2011clean/pdf/ld083gb%20(mac400-800).pdf), 2011. LD0083-06 GB. [citado na p. 72, 73, 96]
- [66] JVL, “JVL Integrated MAC400 Servo motor - Triple Torque at All Speeds.” Disponível em: <https://www.jvl.dk/718/integrated-mac-400-triple-torque>, 2020. Acedido em: 26/2/2020. [citado na p. 73]
- [67] ISQ, “Segurança na conceção de máquinas - iso 13849-1,” 2020. Acedido em: 04/04/2020. [citado na p. 78, 79]
- [68] SICK, “Safety Controllers - FX3-CPU0.” Disponível em: https://cdn.sick.com/media/pdf/7/77/477/dataSheet_FX3-CPU000000_1043783_en.pdf, 2020. Acedido em: 07/04/2020. [citado na p. 81]
- [69] SICK, “Safety Controllers - FX3-XTIO84002.” Disponível em: https://cdn.sick.com/media/pdf/0/80/480/dataSheet_FX3-XTIO84002_1044125_en.pdf, 2020. Acedido em: 07/04/2020. [citado na p. 81]
- [70] SICK, “Safety Controllers - FX3-GPR0.” Disponível em: https://cdn.sick.com/media/pdf/3/53/553/dataSheet_FX3-GEPR00000_1069070_en.pdf, 2020. Acedido em: 07/04/2020. [citado na p. 81]
- [71] Allen-Bradley, “Torres Luminosas Control Tower 855.” Disponível em: <https://ab.rockwellautomation.com/pt/Signaling-Devices/Control-Tower-Stack-Lights>, 2020. Acedido em: 15/04/2020. [citado na p. 84]
- [72] McNaughton-McKay, “855T-B24SA1 - Allen Bradley.” Disponível em: <https://www.mc-mc.com/2512484/Product/>, 2020. Acedido em: 13/04/2020. [citado na p. 84]
- [73] Trojan, “27-GEL DATA SHEET.” Disponível em: http://www.generator.co.il/Content/Images/uploaded/27GEL_TrojanRE_Data_Sheets.pdf, 2020. Acedido em: 22/03/2020. [citado na p. 86]
- [74] Union Battery, “ZENITH Lithium - Lithium batteries.” Disponível em: <https://www.unionbatteryservice.it/en/products/batteries/zenith-batteries/zenith-lithium>, Jun 2020. Acedido em: 20/06/2020. [citado na p. 87]

- [75] Vahle, “Charging Contacts BLS/BLK.” Disponível em: https://www.vahleinc.com/assets/pdfs/catalogs/Charging%20Contacts_US_Catalog_2019.pdf, 2019. Acedido em: 27/03/2020. [citado na p. 88]
- [76] SICK, “microScan3 - Operating Instructions.” Disponível em: https://cdn.sick.com/media/docs/4/74/174/Operating_instructions_microScan3_EtherNet_IP%E2%84%A2_en_IM0075174.PDF?fbclid=IwAR0o0UcCU2JanzSPxmUjbahaZscCZahmB88tcAzOGmP679WS8n555-FLH1k, 2019. Acedido em: 04/04/2020. [citado na p. 96]
- [77] JVL, “Rockwell Logix5000 AOI for MAC and MIS –motors. .” Disponível em: https://www.jvl.dk/files/pdf-1/instructions/lb0061.pdf?fbclid=IwAR3_kH5va7_g38909BD00YfIyTvH7AvpAJGZrHhdLJdgyX8dh7W1JhcF2vU, 2019. Acedido em: 5/05/2020. [citado na p. 106]
- [78] Engineering ToolBox, “Rolling Friction and Rolling Resistance.” Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html, 2020. Acedido em: 02/03/2020. [citado na p. 149]
- [79] JVL, “Modes of Operation of the MAC Integrated Servo Motors.” Disponível em: <https://www.jvl.dk/587/integrated-servo-motors>, 2020. Acedido em: 12/05/2020. [citado na p. 173]

Anexo A

Anexo A - Valores do Coeficiente de Resistência ao Rolamento

A Tabela A.1 apresenta alguns valores típicos para o coeficiente do rolamento.

Tabela A.1: Coeficientes de resistência do rolamento - baseados em [53] e [78]

Coeficientes da resistência de rolamento	
Condições	Coeficientes
Rodas de aço sobre caminhos de aço	0,001 - 0,002
Pneus de bicicleta em caminho de madeira	0,001
Pneus de baixa resistência	0,002 - 0,005
Pneu de bicicleta em betão	0,002
Pneu de bicicleta em asfalto	0,004
Via sem pavimento	0,005
Pneu de camião em asfalto	0,006 - 0,01
Pneu de bicicleta em estrada com pavimento	0,008
Pneus de carro em betão	0,01 - 0,015
Pneus de carro em asfalto	0,02
Pneus de carro em gravilha	0,03
Pneus de carro em areia	0,04 - 0,08

		Formulas	Unidades
Força atrito (Fr)	151,05	$Fr = cr * M * g * \cos(\text{inclinação})$	N
Força resistência aerodinâmica (Fw)	0,00	Desprezei	N
Força gravidade (Fg)	376,66	$Fg = M * g * \sin(\text{inclinação})$	N
Força aceleração (Fla)	0,00	$Fla = M * \text{aceleração}$	N
Força total (Ft)	527,71	$Ft = Fr + Fw + Fg + Fla + Ft$	N
Torque (Tt)	52,77	$Tt = rd * Ft$	N.m
Potência (Pt)	633,25	$Pt = Ft * \text{velocidade ou } Pt = T * w$	W
Potência motor (Pm)	633,25	$Pm = Pt/nt$	W
Torque motor (Tm)	2,11	$Tm = 1/(nt * ig) * Tt$	N.m
Potência conversor (Pcc)	633,25	$Pcc = Pm/nm$	W
Rotações (Nt)	114,59	$Nm = v/((rd/1000) * 0,10472)$	RPM

Figura B.2: Documento Excel desenvolvido - cálculos

Anexo C

Proposta Alternativa

A Tabela C.1 representa a proposta alternativa, considerada numa fase inicial do projeto.

Tabela C.1: Proposta por fornecedor alternativo

Descrição	Quantidade	Produto
Movimento		
Motores sincronos	2	HK37 CMPZ71S/BY/HR/KY/AK1H/SB!
Controlo do veículo		
<i>Driver</i> dos motores	2	MDX61B0014-5A3-4-00/DEH11B
Resistência de travagem	2	BW090-P52B 8245630
Cabo do motor	2	Cabo 13354329 / 5.0
Cabo do <i>encoder</i>	2	Cabo 13324551/ 5.0
Controlador	2	DHE41B/OMH-I41B-T2/UOH21B
PLC	1	MOVI-PLC I/O SYSTEM C
HMI	1	DOP11C-70
Segurança		
Módulo de segurança	1	UCS51B/UCS62/UCS63B
Separador sinal <i>encoder</i>	2	DAE70B 18243797
Cabo do <i>encoder</i>	2	DAE80B 18132650 / 1.5
Cabo <i>encoder</i> (modulo segurança)	2	DAE80B 18131123 / 1.5
Sensor	2	S300 Expert
Botões emergência	2	E-stop <i>button</i>
Conversores de potência		
Conversor DC/DC	1	EPC 3k5 648 (3,5kW)
Interface	1	EPC CAN <i>interface</i>
Conversor DC/DC (28/60 V->24V)	1	CRS-500-6458-T (0,48kW)

Descrição	Quantidade	Produto
Navegação		
Função leitura/escrita	1	<i>Reading head</i> IQT-FP-R4-V1 Pepperl+Func
BlueBotics	1	ANT localization
Conversor Internet/Serie	1	Brainbox ES-522
<i>Switch</i> Ethernet	1	Hirschman Spider 5TX
Potência		
Bateria	4	LiFePo <i>battery</i> - 72Ah
Cabo da bateria	1	CEE 3ph <i>connector</i>
Comunicação		
Transmissão dados <i>wireless</i>	1	Scalance WLAN <i>client</i>
Cartão de memória	1	<i>Memory card</i>
Antena	2	<i>Antenna</i>
Cabo coaxial	2	<i>Coax cable</i>
Acoplador cabo coaxial	2	Telegartner coupling
Sinalização		
Fita de luz	1	LED_ <i>strip</i>
Buzzina	1	<i>Buzzer</i>
Controlo de logística		
Controlador com interface <i>fieldbus</i>	1	Sturing UHX71B-OSR71B
Cartão de memória para controlador	1	Geheugenkaart OMH71B-T0
Licença de <i>software</i>	1	<i>Logistic controller software license for max. 2 vehicles</i>
Carregamento		
Carregador e contacto	1	<i>Battery charger + floorcontact</i> (60A nominal)

Anexo D

Descrição do Protocolo EFI-pro

O protocolo EFI-pro permite uma comunicação segura na rede entre dispositivos, e é baseado no protocolo Ethernet/IP com segurança CIP. Para uma melhor compreensão, é apresentada a Figura D.1, onde os seguintes padrões e tecnologias são implementadas com base umas nas outras [63].

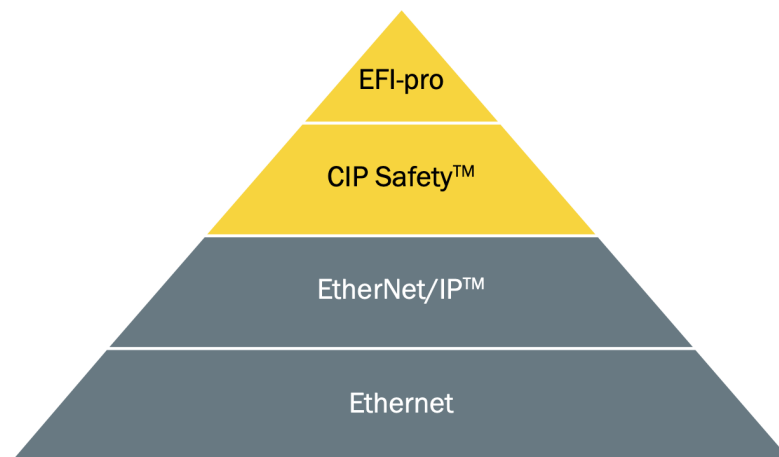


Figura D.1: Conceito do protocolo EFI-pro [63]

Cada um dos blocos da Figura D.1, pode ser descrito da seguinte forma [63]:

- **EFI-pro** - Protocolo de comunicação desenvolvido pela SICK, para uma comunicação segura entre dispositivos;
- **CIP-Safety** - Extensão do CIP para aplicação seguras;
- **Ethernet/IP** - Protocolo para redes industriais que implementa o CIP baseado em Ethernet;

- **Ethernet** - Arquitetura de comunicação de rede.

O EFI-pro permite assim uma comunicação via Ethernet, onde protocolos de segurança validam e asseguram a integridade dos dados transmitidos.

Anexo E

Lista de Componentes do AGV

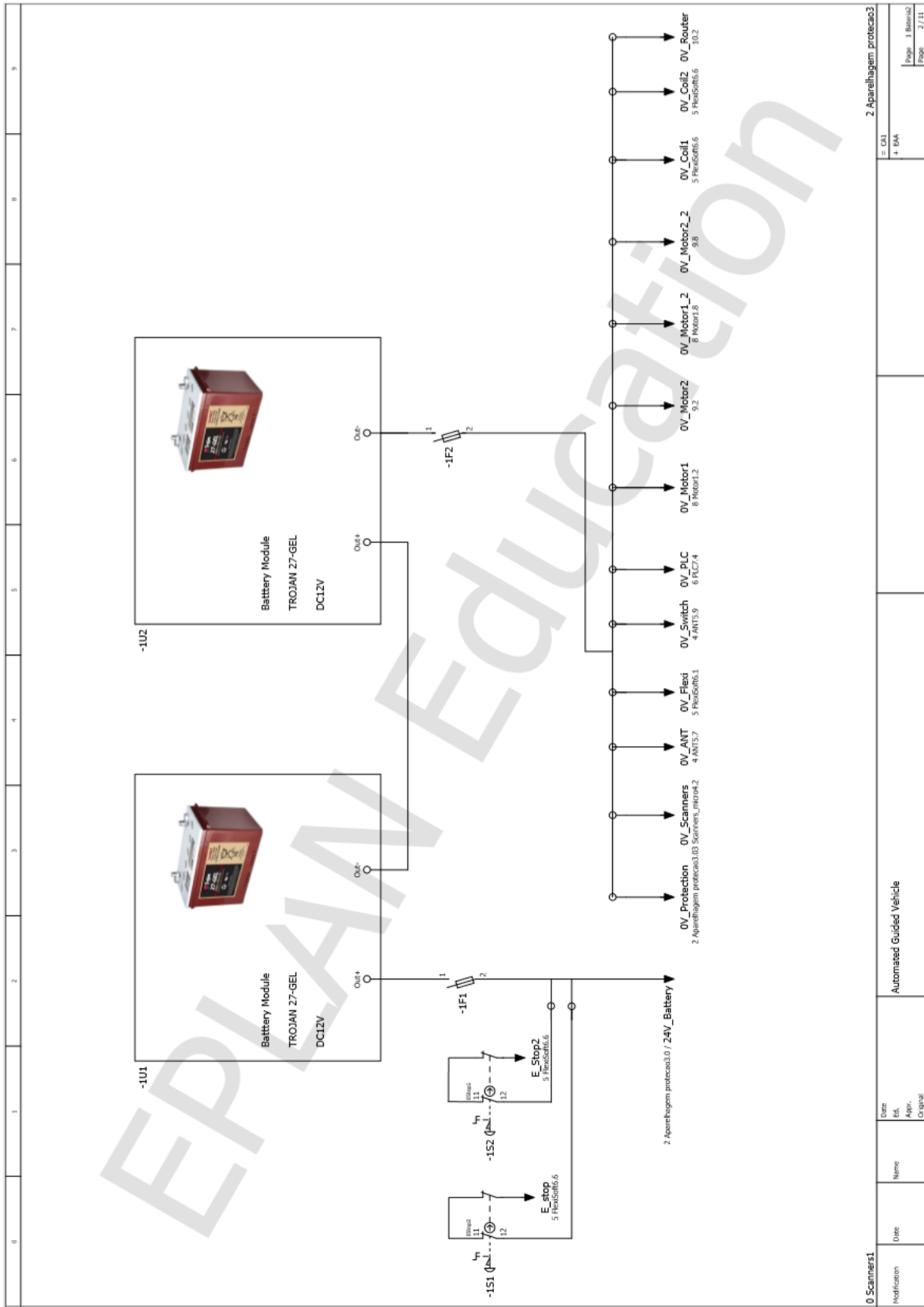
Uma lista das partes integrantes do AGV podem ser consultada através da Tabela E.1.

Tabela E.1: Lista de componentes do AGV

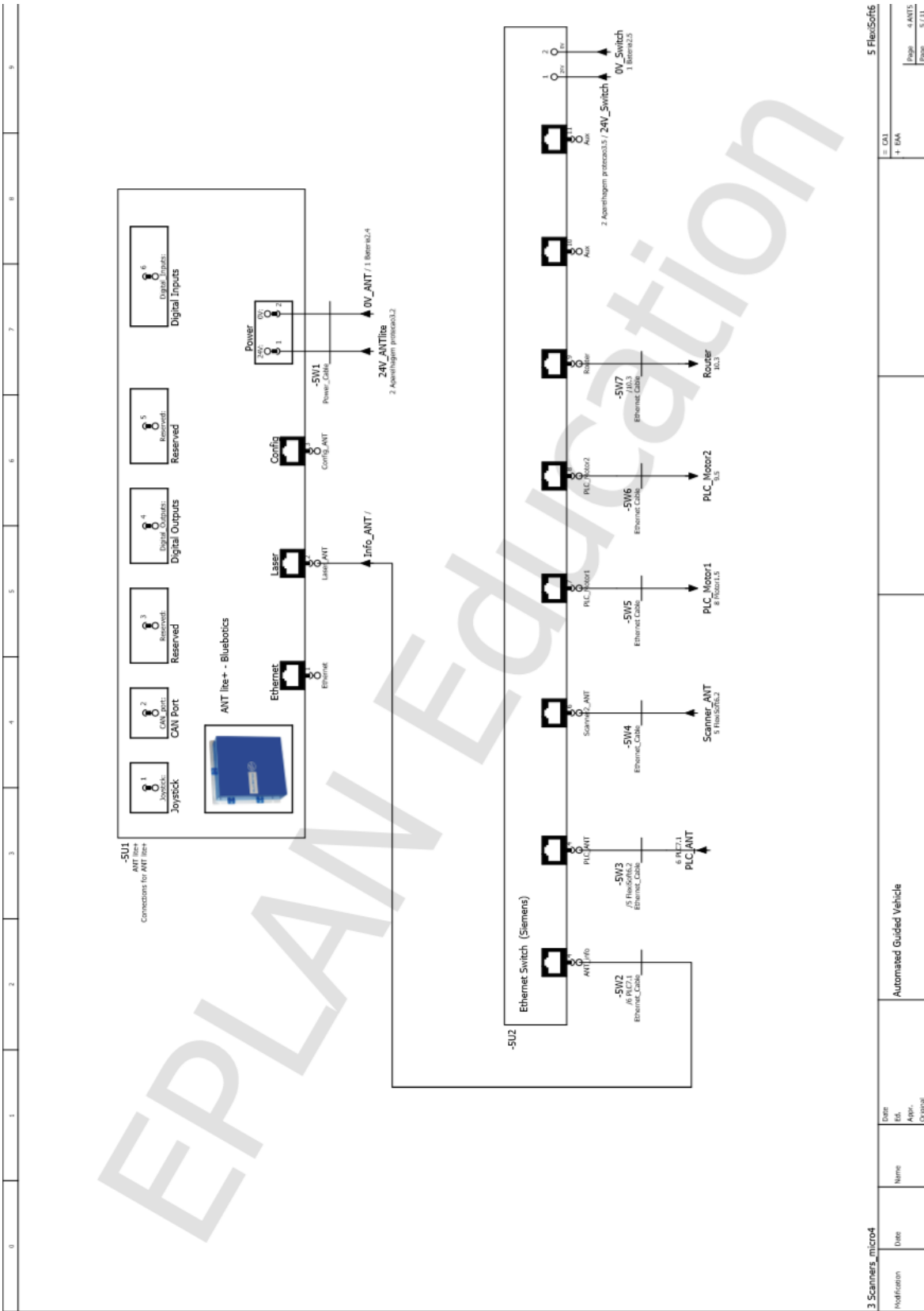
Descrição	Quantidade	Produto
Movimento		
Motores	2	MAC402-D5
Rodas de tração	2	Blickle Besthane (55 mm)
Rodas omnidirecionais	2	Blickle Besthane (40 mm)
Caixa de redução	2	<i>Alpha Servo GearBox</i>
Segurança		
Botões de emergência	2	Schneider
PLC de segurança	1	FX3-CPU0
Módulo E/S	1	FX3-XTIO84002
Módulo Ethernet	1	FX3-GEPR0
Cabo M12/M12	1	SSL-1204-G05ME90
Cabo M12/RJ45	1	SSL-2J04-G05ME60
Contactora	2	3RT2015-1BB42
Navegação e Controlo		
Módulo Bluebotics	1	ANT lite+
<i>Joystick</i>	1	<i>Bluebotics joystick</i>
Switch Ethernet	1	Siemens Scalance
Software de Navegação	1	ANT lab
Scanner Laser	2	microScan 3
PLC	1	1769-L33ERM
Módulo E/S para PLC	1	1734-Point I/O
Router	1	D-link
Aparelhagem de proteção		
Disjuntor Eletrónico	3	MICO 4.10
Disjuntor Unipolar	2	Siemens C16
Caixa de Fusível 25A	2	
Estrutura Mecânica		
Estrutura do AGV	1	Material: Alumínio
Suporte dos sensores	2	-
Acoplamento dos motores	2	-
Outros		
Cabelagem	-	-
Calhas	6	-
Pontos de Contacto	8	-

Anexo F

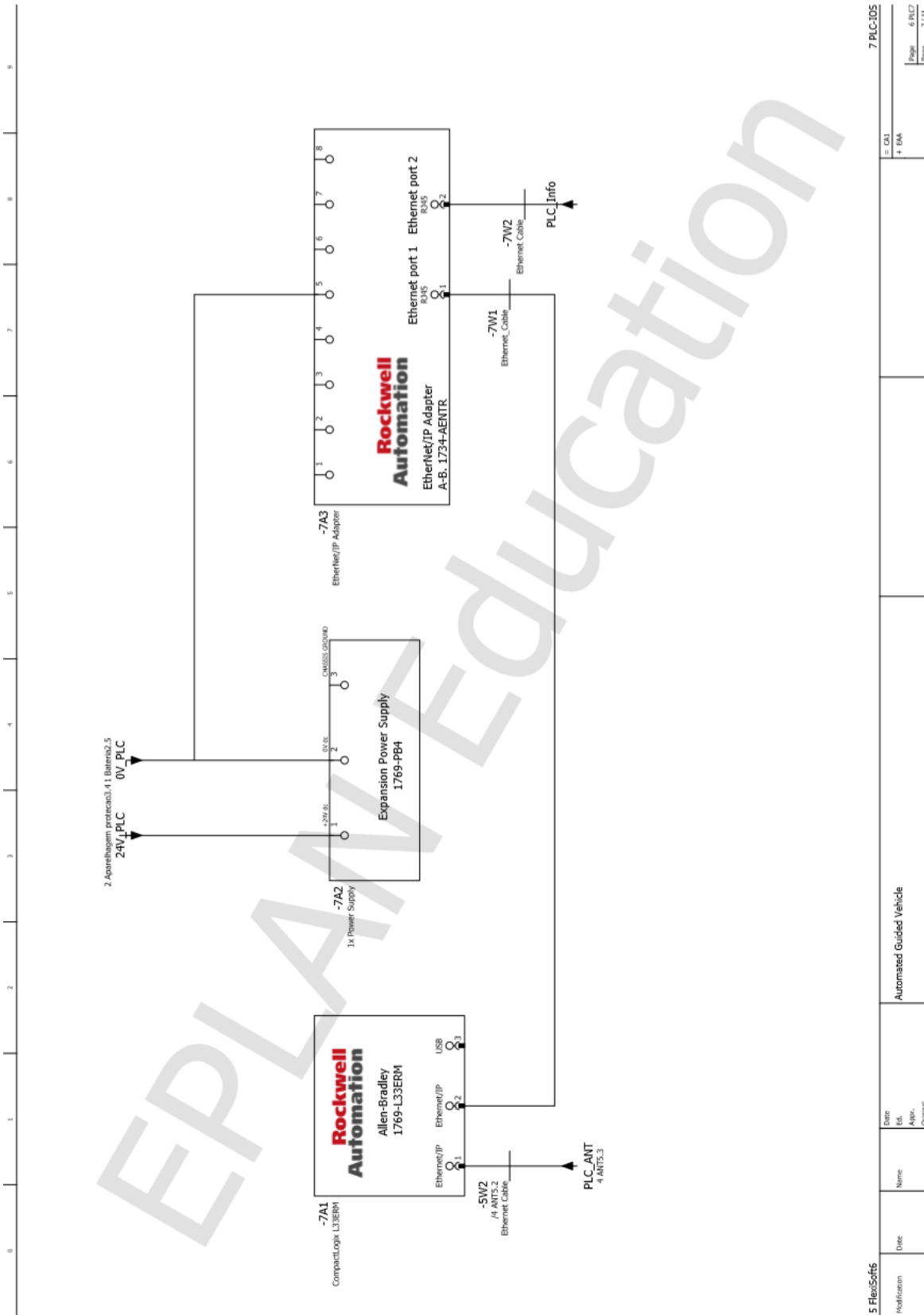
Esquema Eléctrico - EPLAN



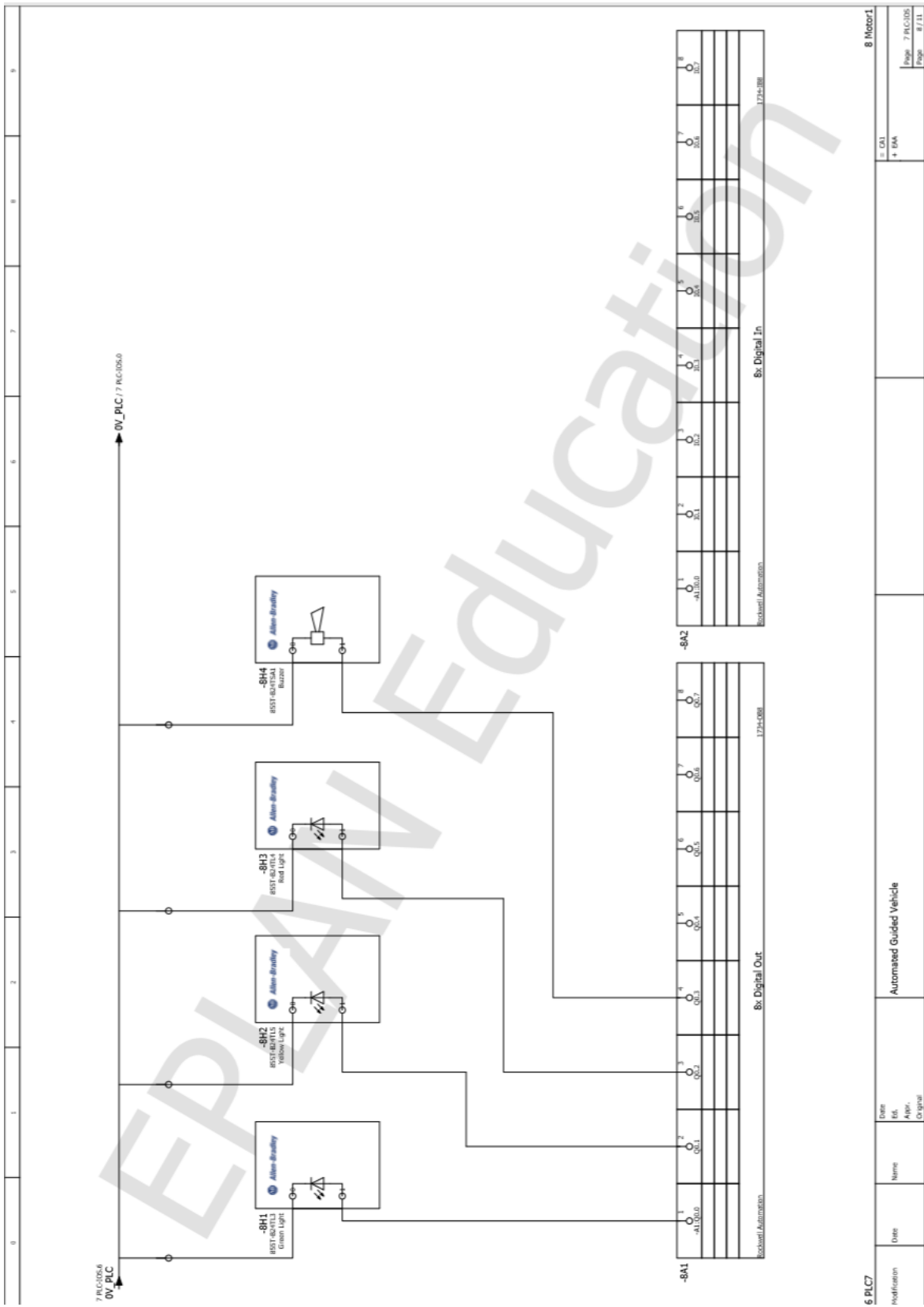
0 Scanners1		2 Aparilhagem protecao3	
Location:	ES	Location:	ES
Name:	Automated Guided Vehicle	Name:	Automated Guided Vehicle
Date:	Original	Date:	Original
Modification:		Modification:	
Page:	1/11	Page:	1/11

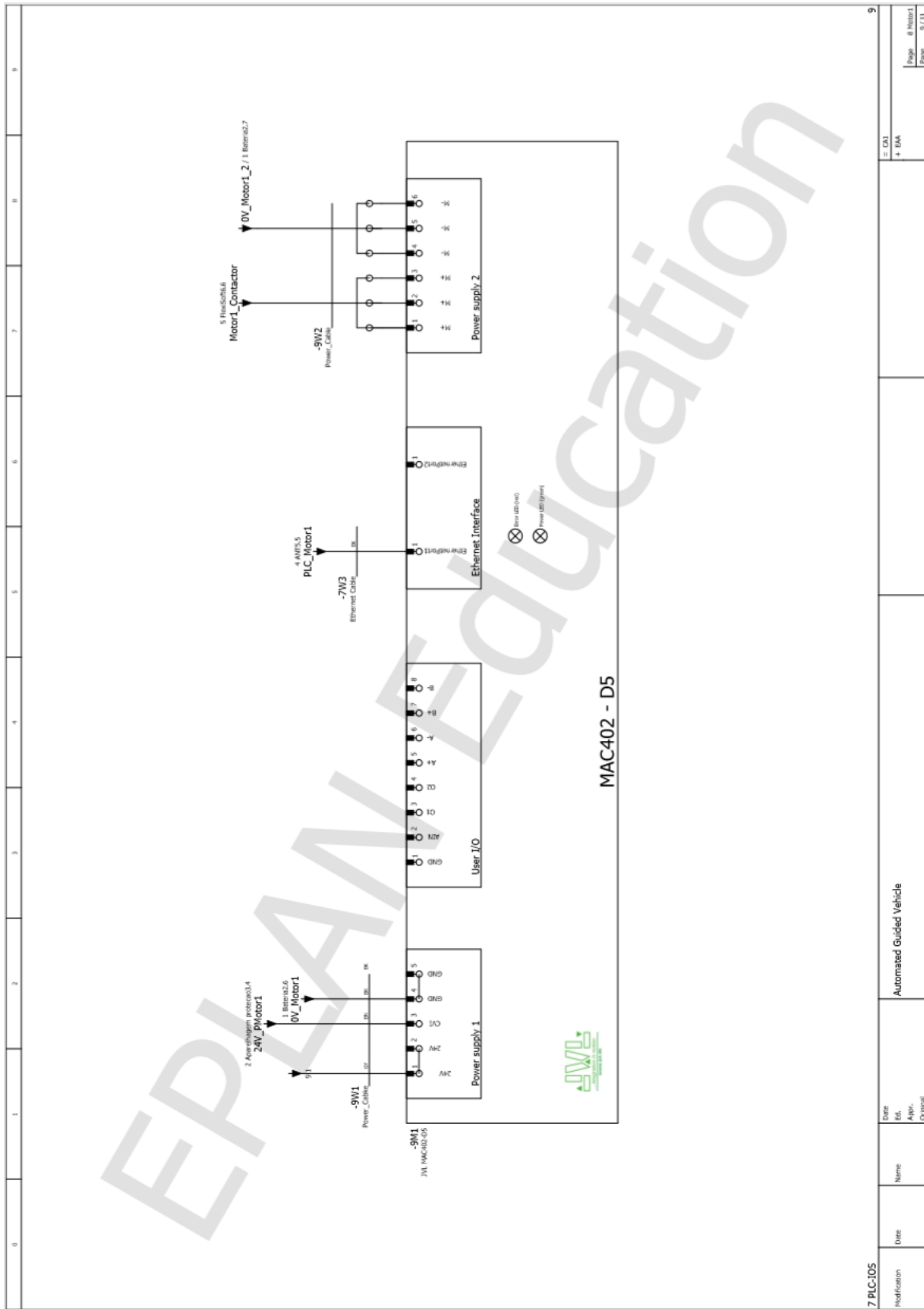


Modification	Date	Name	Date	File	App.	Original
3 Scanners_micro4		Automated Guided Vehicle				
5 Flex50/50.2						



5 FlexSoft6		7 PLC-IO5	
Modification	Date	Name	Date
		Est. Appr.	Original
Automated Guided Vehicle		= D01 + IMA	
		Page	6 PLC7
		Page	7 / 11





7 PLC-105	MAC402 - D5	Automated Guided Vehicle	Date: _____ Name: _____ Date: _____ Appr: _____ Drawn: _____	= GND + BNA	Page: 8/1001 Page: 9/11
-----------	-------------	--------------------------	--	----------------	----------------------------

Anexo G

Estrutura Mecânica do Protótipo de AGV

As diferentes perspectivas da estrutura do AGV podem ser visualizadas nas Figuras G.1,G.2 e G.3.

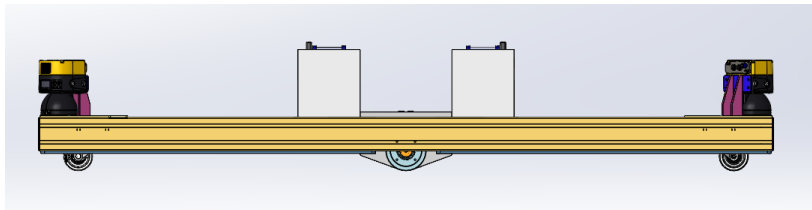


Figura G.1: Estrutura mecânica - perspectiva lateral

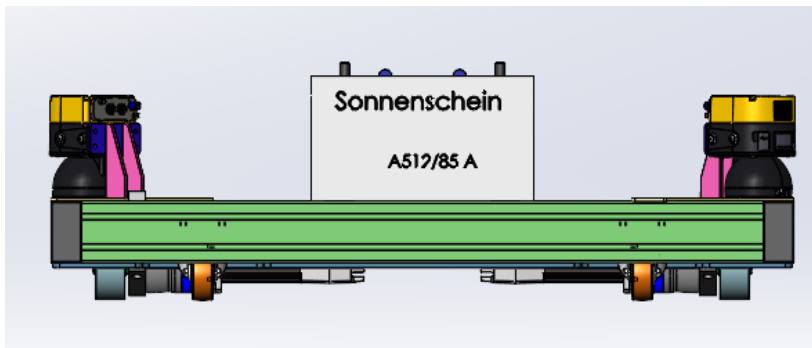


Figura G.2: Estrutura mecânica - perspectiva frontal

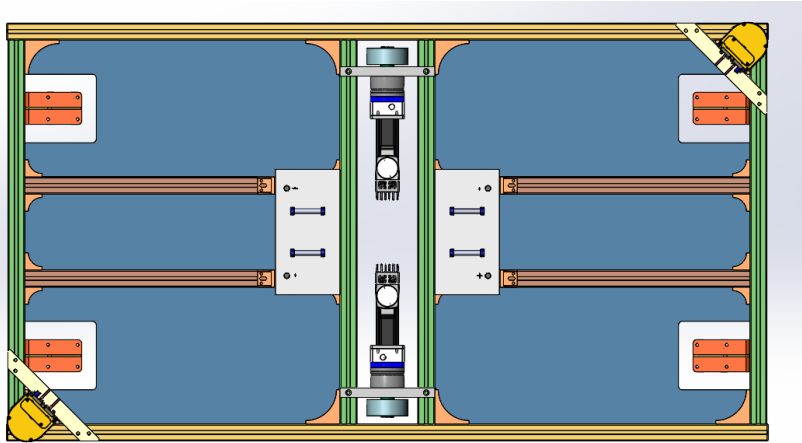


Figura G.3: Estrutura mecânica - perspectiva topo

Anexo H

Modos de Funcionamento do MAC402-D5

Os modos de funcionamento dos servomotores MAC podem ser resumidos da seguinte forma [79]:

- *passive* - o motor encontra-se num estado passivo, mas a comunicação encontra-se ativa;
- *velocity* - a velocidade do motor pode ser controlada através de comandos externos ou do MacTalk;
- *position* - a posição do motor pode ser controlada através de comandos externos ou do MacTalk;
- *gear* - a posição do motor é controlada pelas E/S, configuradas como entradas. Neste modo o motor tem controlo sobre a posição de paragem, pelo que não existirá um *overshoot* da mesma;
- *gear (follow)* - semelhante ao anterior, com a diferença que não existe controlo sobre a posição de paragem;
- *analogue velocity* - a velocidade do motor é controlada pela tensão aplicada à entrada analógica de ± 10 V;
- *analogue velocity (with deadband)* - semelhante ao anterior, mas é inserida uma zona morta à volta de 0;
- *analogue velocity/gear* - semelhante ao modo *gear*, com a possibilidade de aumentar ou diminuir a posição do motor consoante a tensão aplicada à entrada de ± 10 V;

- ***velocity/analogue torque*** - o torque do motor é totalmente controlado pela tensão aplicada à entrada analógica de ± 10 V;
- ***analogue torque (direct)*** - igual ao modo anterior mas a frequência de atualização é bastante superior (7812 Hz);
- ***analogue gear*** - este modo é bastante semelhante ao modo *gear* ou *analogue velocity/gear*. A característica especial é que a razão de redução pode ser ajustada $\pm 5\%$, consoante a tensão aplicada à entrada analógica;
- ***coil*** - semelhante ao modo *gear*, mas onde o intervalo da posição pode ser limitado de tal maneira que o motor inverte a posição quando atinge o limite superior/inferior;
- ***analogue bi-position*** - o motor irá mover-se uma determinada distância ou ir para um de duas posições, consoante a tensão aplicada à entrada analógica;
- ***analogue to position*** - a posição do motor irá alterar proporcionalmente com a tensão aplicada à entrada analógica, entre a posição zero e a predefinida.

Anexo I

Modo de Aviso - Descrição do Funcionamento

Em relação ao seu funcionamento, a redução gradual da velocidade é aplicada no caso do sensor colocado no sentido do movimento do veículo, sendo que para o outro sensor o caso de monitorização encontra-se fixo na opção com o campo mais reduzido (Caso 1). Para facilitar a compreensão, é apresentado o fluxograma da Figura I.1, relativo à lógica aplicada.

São apresentados três fluxogramas distintos: o primeiro relativo à lógica implementada no FlexiSoft e os restantes à do PLC. Inicialmente, o FlexiSoft recebe através da comunicação com os *scanners* o estado da área de aviso, transmitindo esta informação para o PLC (Instrução 1). Este, em caso de invasão da área ativa o Modo de Aviso, e informa o FlexiSoft (Instrução 2). O PLC, com recurso ao algoritmo de redução de velocidade, verifica se o caso de monitorização atual é o 1 - caso esta condição seja verificada, a velocidade é limitada ao valor mínimo estabelecido devido a não ser possível comutar para um caso inferior; se o caso atual não for o 1, é efetuada uma redução de velocidade que garante a comutação para o caso seguinte, com área inferior.

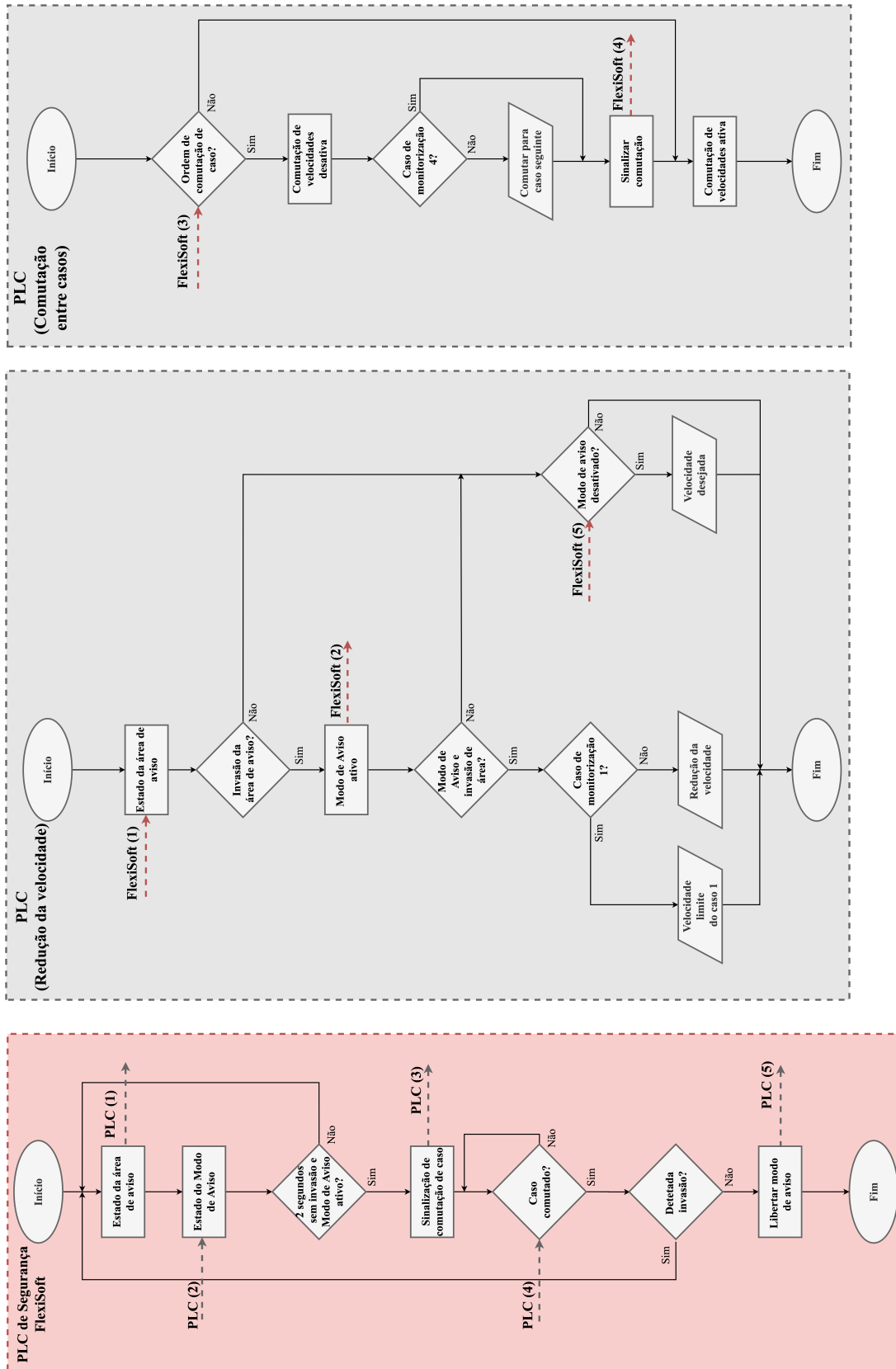


Figura I.1: Fluxograma da lógica de comutação - sensor no sentido do movimento

Este processo (redução de velocidade) é realizado de forma contínua, até que o FlexiSoft verifique que o Modo de Aviso se encontra ativo, e não existe interferência da área de aviso por um período de 2 segundos. Com esta condição cumprida, é sinalizado (Instrução 3) a ordem de comutação de caso, que tem como finalidade avaliar se o caso seguinte se encontra livre de invasão da área de aviso. Este processamento é efetuado no algoritmo de comutação de casos, que quando recebe a Instrução 3 desativa a comutação consoante a velocidade, e comuta para o caso seguinte (caso seja possível), e sinaliza o FlexiSoft (Instrução 4). Ao reconhecer a comutação do caso, o FlexiSoft avalia se existe invasão da área de aviso, caso se verifique mantém o Modo de Aviso, caso contrário indica ao PLC (Instrução 5) que este pode retomar a sua normal operação, desabilitando o Modo de Aviso.

Anexo J

Descrição das AOI Fornecidas pela JVL

- **JVL_COM_Servo** - gere o dimensionamento, operação básica do motor, e garante que os dados corretos são configurados e transmitidos para a troca de dados cíclica, manuseada pelas E/S do motor. Deve ser chamada continuamente;
- **JVL_Config_Servo** - utilizada para configurar certos parâmetros do motor, como o tipo de motor, binário máximo e a razão de transmissão utilizada;
- **JVL_SetParameter** - suporte para quando um registo específico necessita de ser configurado. Não é direcionada para uso comum.
- **JVL_MSO (*MotionServoOn*)** - baseada no comando da Rockwell MSO, que basicamente energiza o *driver* do motor. É necessário chamar esta instrução com sucesso, previamente a outras instruções serem comandadas ao motor;
- **JVL_MSF (*MotionServoOff*)** - baseada no comando da Rockwell MSF, que desabilita o *driver* do motor. É necessária uma chamada bem sucedida à AOI JVL_MSO, para que esta seja utilizada;
- **JVL_MAJ (*MotionAxisJog*)** - coloca o motor no *velocity mode*. Permite movimentar o motor numa dada direção, com determinada velocidade;
- **JVL_MAS (*MotionAxisStop*)** - baseada na instrução da Rockwell MAS, que para qualquer tipo de movimento;

- **JVL_MAM** (*MotionAxisMove*) - baseada na instrução da Rockwell MAM, iniciando o movimento do motor para uma dada posição absoluta ou incremental;
- **JVL_MAH** (*MotionAxisHome*) - baseada na instrução da Rockwell MAH, que executa uma sequência de retorno.

Anexo K

Avaliação do Comportamento dos Motores

As Figuras K.1, K.2, K.3, K.4, K.5 e K.6 referem-se aos testes para 0,3 m/s.

As Figuras K.7, K.8, K.9, K.10, K.11, K.12 à velocidade de 0,6 m/s.

As Figuras K.13, K.14, K.15, K.16, K.17, K.18 para 0,9 m/s.

Por fim, as Figuras K.19, K.20, K.21, K.22, K.23 e K.24 à velocidade de 1,2 m/s.

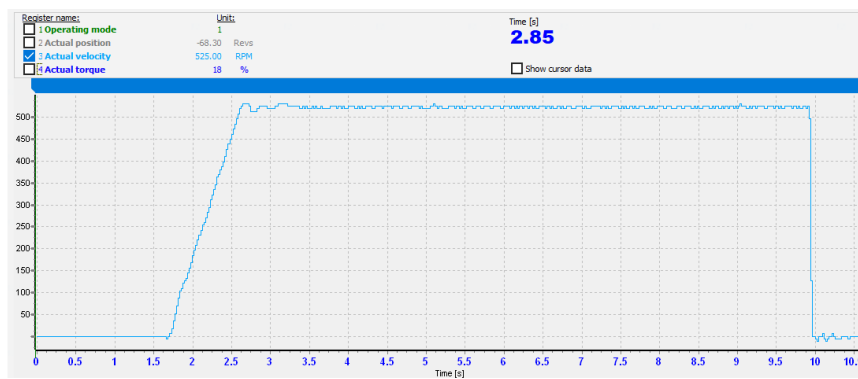


Figura K.1: Teste 1 0,3 m/s - velocidade

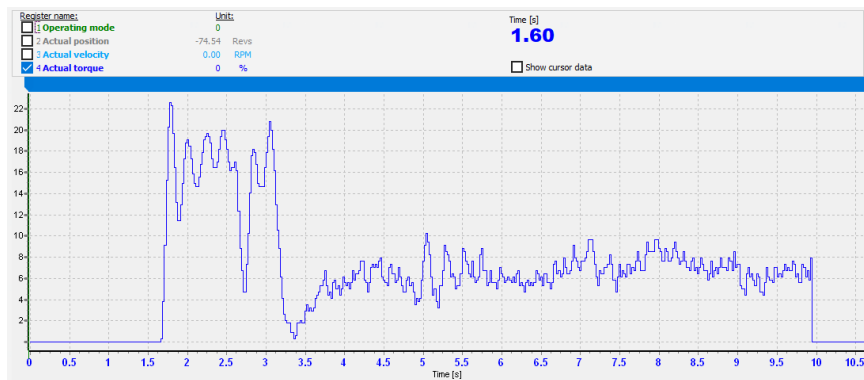


Figura K.2: Teste 1 0,3 m/s - binário

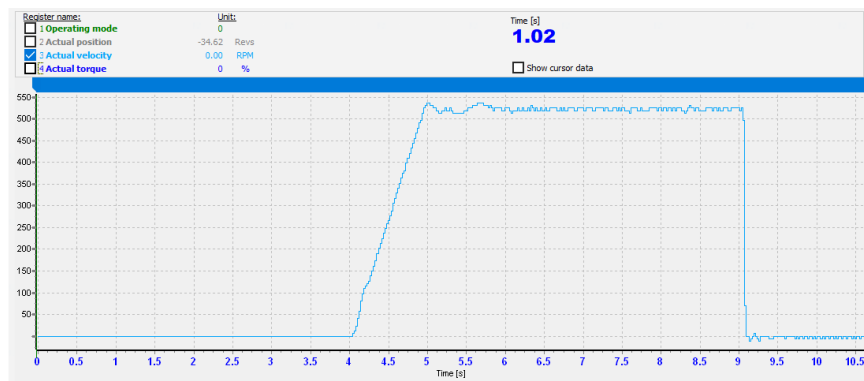


Figura K.3: Teste 2 0,3 m/s - velocidade

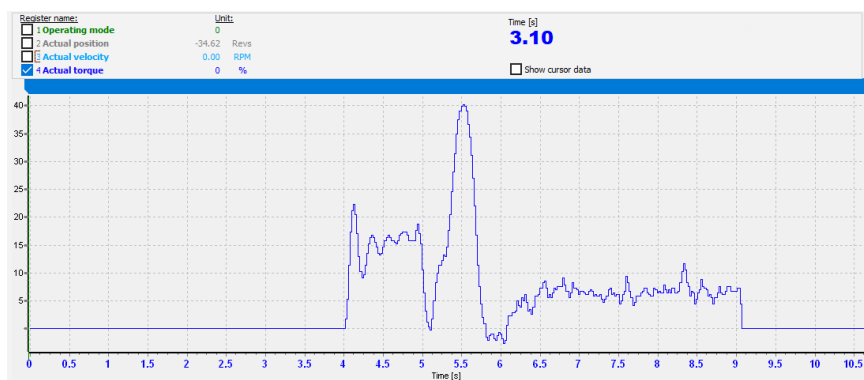


Figura K.4: Teste 2 0,3 m/s - binário

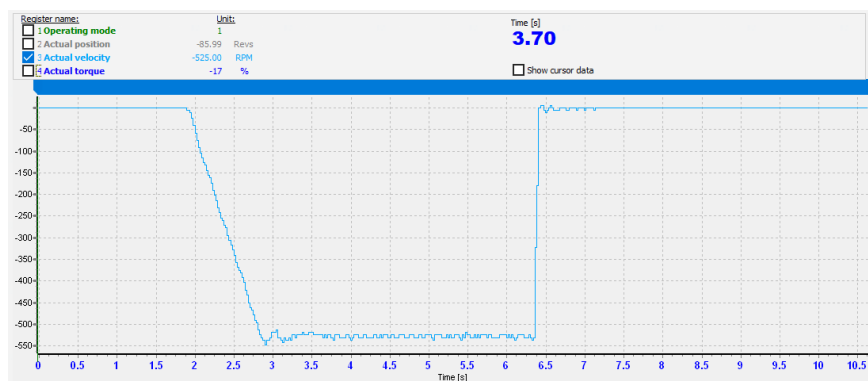


Figura K.5: Teste 3 0,3 m/s - velocidade

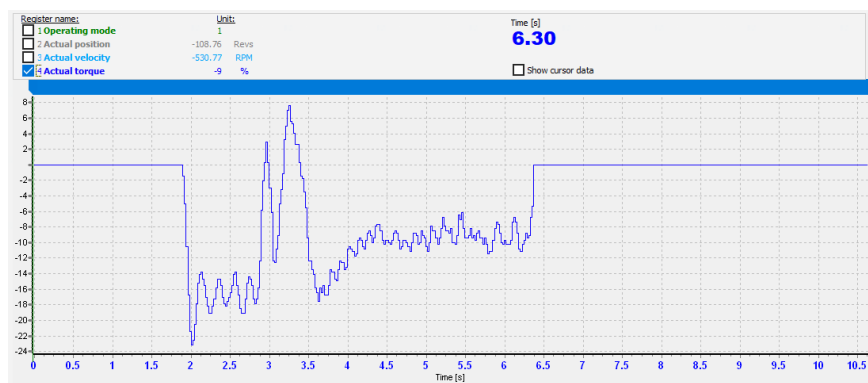


Figura K.6: Teste 3 0,3 m/s - binário

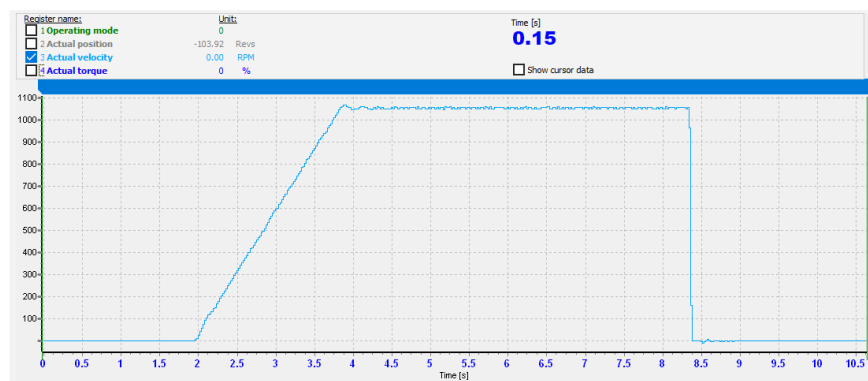


Figura K.7: Teste 1 0,6 m/s - velocidade

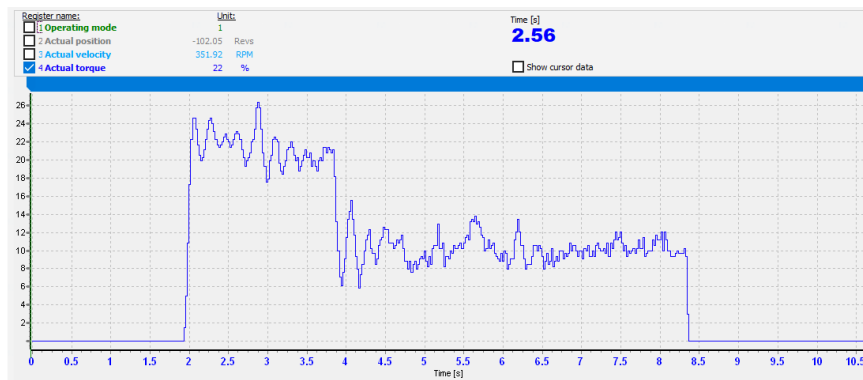


Figura K.8: Teste 1 0,6 m/s - binário

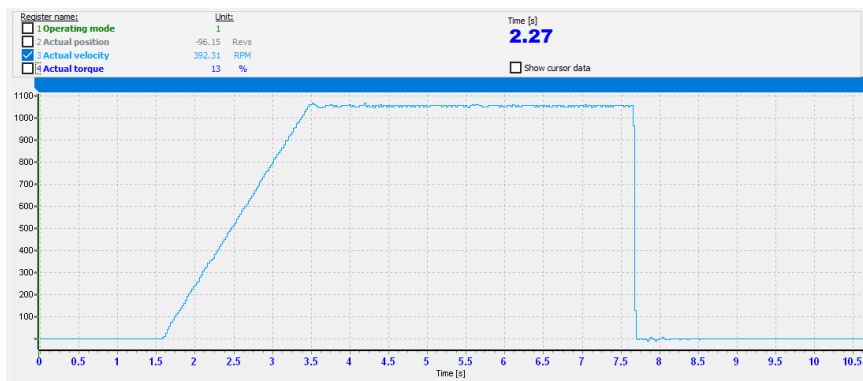


Figura K.9: Teste 2 0,6 m/s - velocidade

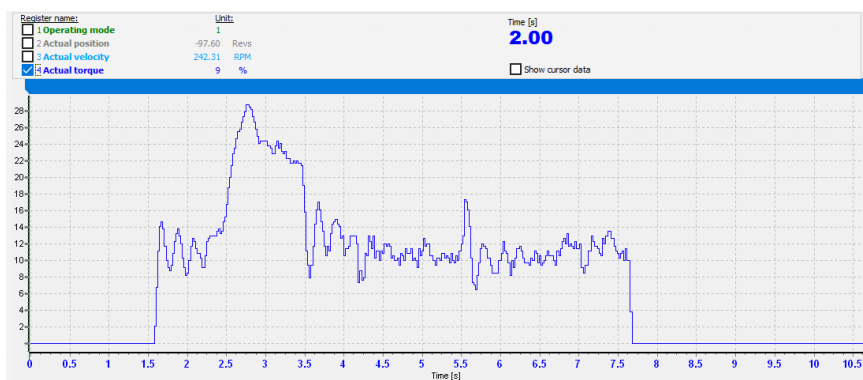


Figura K.10: Teste 2 0,6 m/s - binário

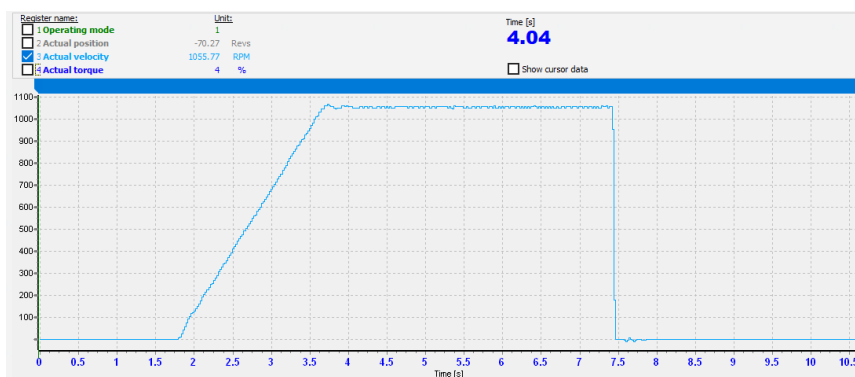


Figura K.11: Teste 3 0,6 m/s - velocidade

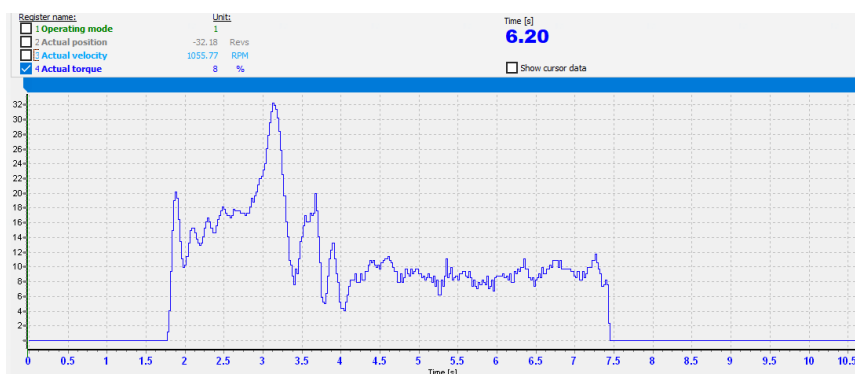


Figura K.12: Teste 3 0,6 m/s - binário

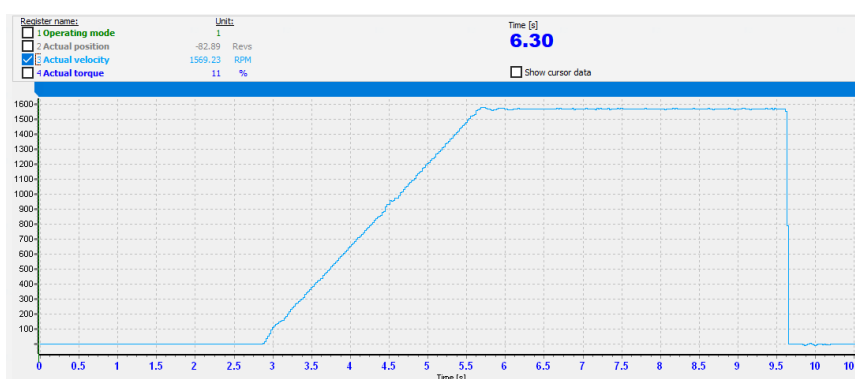


Figura K.13: Teste 1 0,9 m/s - velocidade

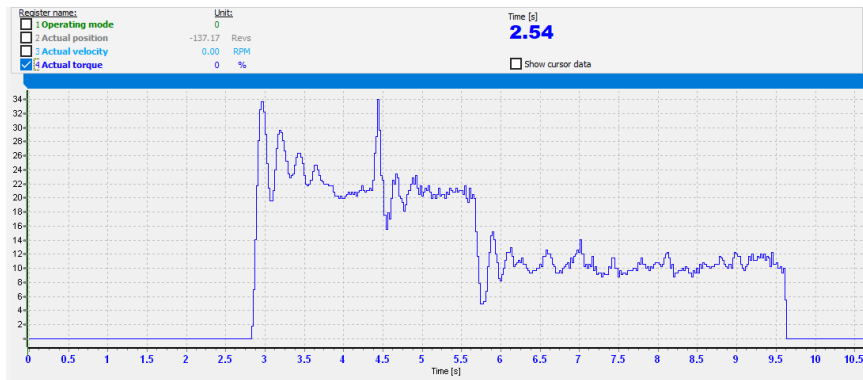


Figura K.14: Teste 1 0,9 m/s - binário

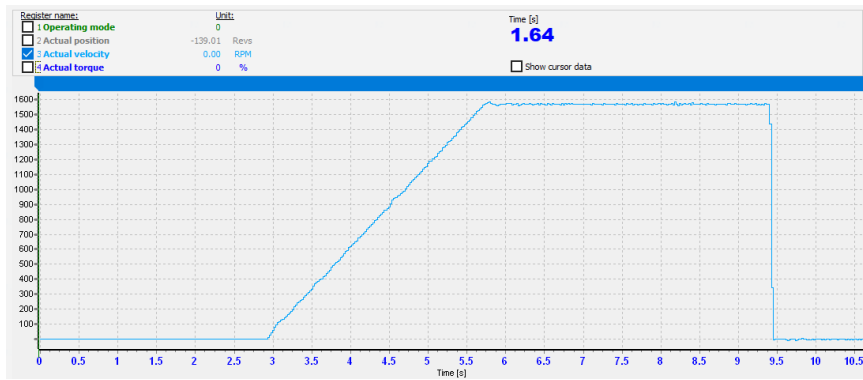


Figura K.15: Teste 2 0,9 m/s - velocidade

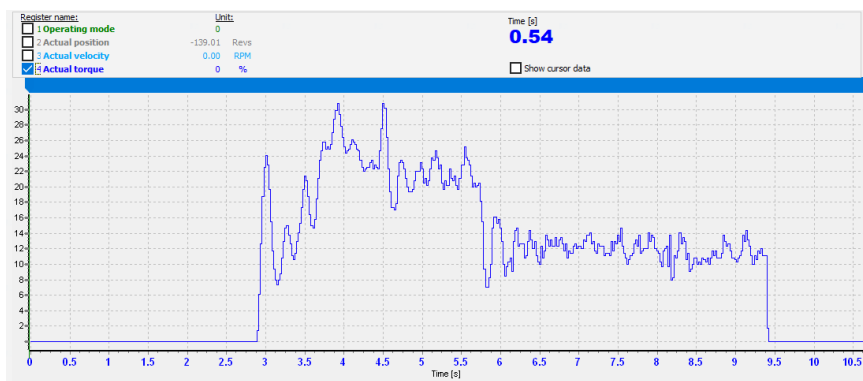


Figura K.16: Teste 2 0,9 m/s - binário

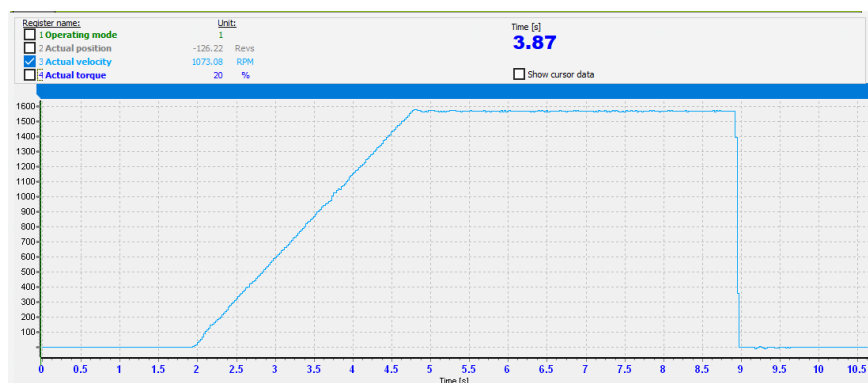


Figura K.17: Teste 3 0,9 m/s - velocidade

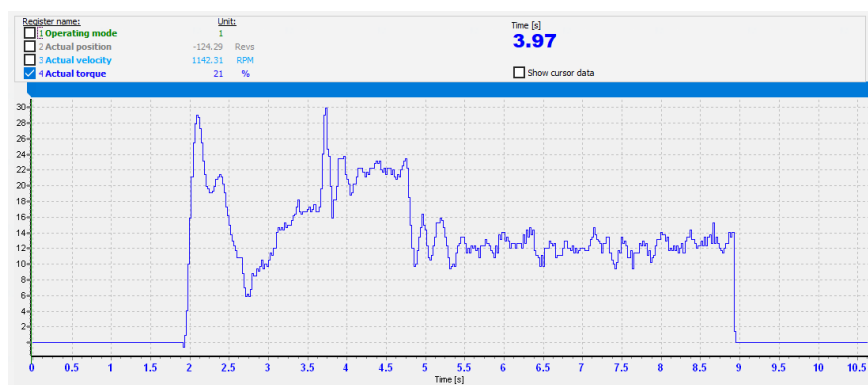


Figura K.18: Teste 3 0,9 m/s - binário

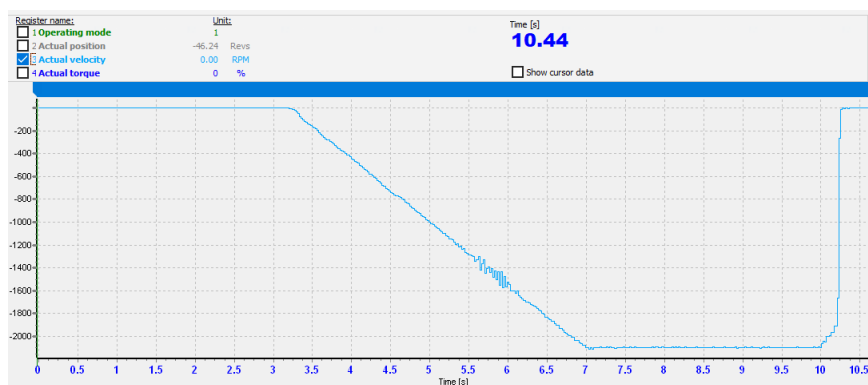


Figura K.19: Teste 1 1,2 m/s - velocidade

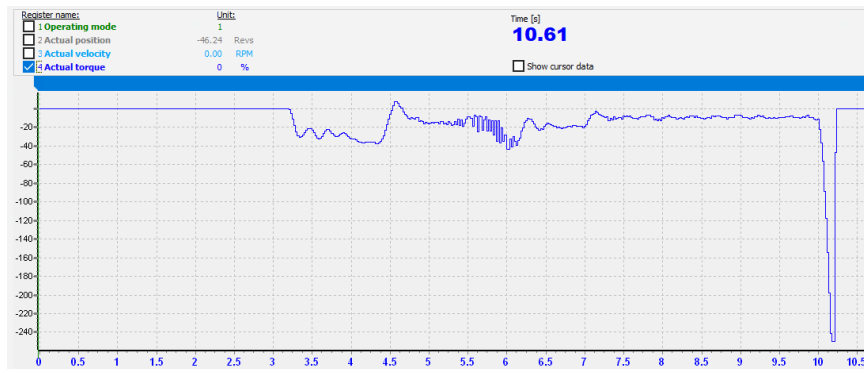


Figura K.20: Teste 1 1,2 m/s - binário

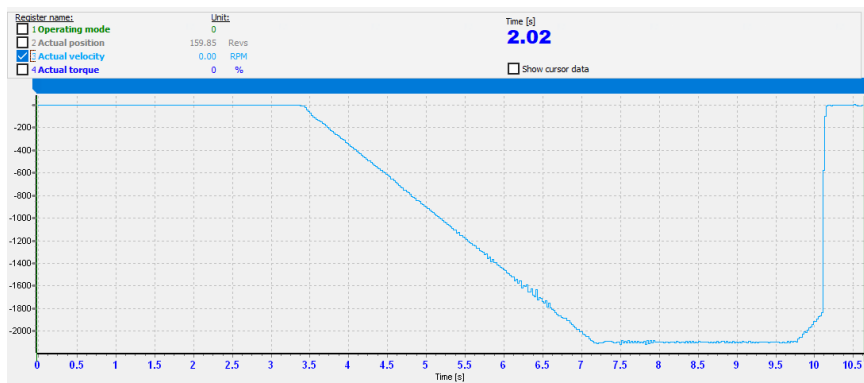


Figura K.21: Teste 2 1,2 m/s - velocidade

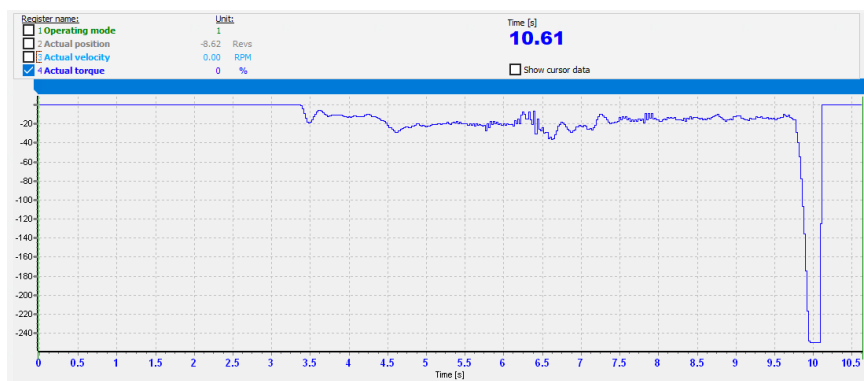


Figura K.22: Teste 2 1,2 m/s - binário

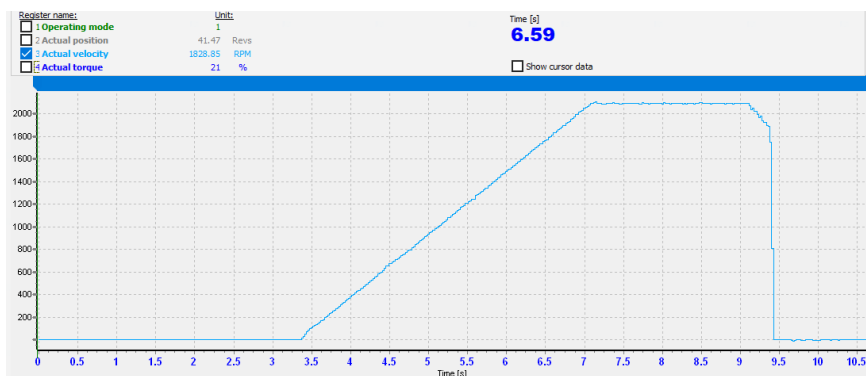


Figura K.23: Teste 3 1,2 m/s - velocidade



Figura K.24: Teste 3 1,2 m/s - binário

