



ROVIM T2D

Um robô autônomo de vigilância de instalações militares

Gonçalo Filipe Ribeiro André

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Prof. Dr. António Joaquim Serralheiro
Prof. Dr. Duarte de Mesquita e Sousa

Júri

Presidente: Prof. Dr. Rui Castro
Orientador: Prof. Dr. Duarte de Mesquita e Sousa
Vogais: Prof. Dr. António Joaquim Serralheiro
Prof. Dr. Moisés Piedade

Abril 2016

Agradecimentos

Este tempo que me debrucei sobre este trabalho, foi uma árdua jornada de desafio, construção e amadurecimento; nada é realizado de forma fácil e sem esforço.

Quero agradecer em especial à minha família, que contribuiu para esta conquista, que me apoiou incondicionalmente e sempre acreditou em mim. Aos meus amigos e companheiros desta fase da minha vida, pelos inúmeros momentos de divertimento. À minha namorada que, apesar da distância, sempre me amou e me incentivou. Ao professor António Serralheiro, pelo suporte, correções e pela sua disponibilidade, porque talvez saber ensinar seja mais difícil que saber aprender.

Abstract

In the last decade, technological advancements have enabled a rise of autonomous robotic applications for military use. With the goal of exploring its potential in surveilling military facilities, the Academia Militar commissioned the development and construction of a functioning prototype of an autonomous vehicle. In this article the traction, steering and braking actuators of such vehicle are addressed. Current research focuses on commercial road vehicle applications where autonomy is the key topic, whereas small, non-professional teams often struggle with a lack of clear vision of the whole project and lax safety procedures. A quad vehicle embedded with an electric battery pack, traction, steering and braking actuators, along with a control and interface mechanism, with a design focus on flexibility and personnel safety is proposed and evaluated. Limitations of the proposed design are identified and solutions proposed.

Keywords

Electric vehicles, Vehicle safety, Magnetic sensors, Steering systems, Robot motion control, Robot programming

Resumo

Os avanços tecnológicos da última década permitiram um crescimento nas aplicações militares de veículos autónomos. Com o objetivo de explorar o seu potencial na vigilância de instalações militares, a Academia Militar encomendou o desenvolvimento e construção de um protótipo funcional de um veículo autónomo. Nesta dissertação os sistemas de tração, travagem e direção desse protótipo são abordados. A literatura atual foca-se em aplicações comerciais de veículos rodoviários, onde a autonomia é o principal problema. No entanto, equipas não profissionais lidam antes disso com dificuldades em capturar uma visão clara do projecto e fracos procedimentos de segurança. Uma moto-quatro com um módulo de baterias elétricas e atuadores embarcados para os sistemas da tração, travagem e direção, assim como os mecanismos de controlo e interface, é aqui proposta e avaliada, numa abordagem focada na flexibilidade de desenho e na segurança dos utilizadores. As limitações da solução proposta são identificadas e são propostas correções.

Palavras Chave

Veículos elétricos, Segurança de veículos, Sensores magnéticos, sistemas de direção, Controlo do movimento de robôs, Programação de robôs

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Enquadramento	3
2.1	Análise do caderno de encargos	3
2.2	Abordagem	4
2.3	Revisão da literatura	5
2.3.1	Propulsão	5
2.3.2	Rodas e acoplamento mecânico	5
2.3.3	Motor	6
2.3.4	Controlo	8
2.3.5	Armazenamento de energia elétrica	9
2.3.6	Direção	9
2.4	Planeamento	10
3	Descrição da T2D	11
3.1	Visão geral do módulo	11
3.2	<i>Chassi</i>	12
3.3	Sistema de baterias embarcado	14
3.4	Sistema de tração do ROVIM	15
3.4.1	Dimensionamento do sistema	15
3.4.2	Sistema embarcado	16
3.4.3	Sensor de velocidade	20
3.5	Sistema de travagem do ROVIM	22
3.6	Sistema de direção do ROVIM	26
3.6.1	Controlo da direção	32
3.7	Sistema eletrónico desenvolvido	33
3.7.1	Mecanismo de segurança	33
3.7.2	Integração dos sistemas	35
3.8	Programa de controlo da T2D	41
3.8.1	Arquitetura do <i>software</i>	42
3.8.2	Monitorização do sistema e <i>lockdown</i>	43
3.8.3	Condução e utilização	43

4	Utilização da T2D	46
4.1	Interface com o utilizador	46
4.1.1	Interface física	46
4.1.1.A	Código de cores do estado do veículo	47
4.1.1.B	Programador do controlador da tração	49
4.1.2	Interface série	49
4.1.2.A	Sintaxe dos comandos ROVIM T2D	50
4.1.2.B	Especificação dos comandos ROVIM	51
4.1.3	Interface I ² C	58
4.2	Funcionalidades	59
4.2.1	Chave dos fluxogramas	59
4.2.2	Ligar	59
4.2.2.A	Verificações de segurança	59
4.2.2.B	Configuração inicial dos seletores	61
4.2.3	Desligar	61
4.2.4	Travagem de emergência/ Ir para <i>lockdown</i>	61
4.2.5	Sair de <i>lockdown</i>	61
4.2.6	Alternar modos de condução	61
4.2.6.A	Arranque em modo manual	63
4.2.7	Selecionar marcha	64
4.2.8	Acelerar	65
4.2.9	Desacelerar	65
4.2.10	Virar	66
4.2.11	Colocar em ponto morto	66
4.2.12	Imobilizar	66
4.3	Exemplo típico de utilização	66
4.4	Resolução de problemas	66
4.4.1	Problemas conhecidos	67
5	Conclusão	68
5.1	Trabalhos futuros	69
	Bibliografia	73
	Apêndice A Apêndice A - código do programa	A-1
	Apêndice B Apêndice B - Esquemas elétricos	B-1
	Apêndice C Apêndice C - Configurações	C-1
	Apêndice D Apêndice D - Lista de componentes	D-1

Apêndice E	Apêndice E - desenhos técnicos das peças do redutor do motor de tração	E-1
Apêndice F	Apêndice F - Fotografias	F-1

Lista de Figuras

2.1	Topologias dos motores citados.	6
3.1	Diagram de blocos.	12
3.2	<i>Chassi</i>	13
3.3	Baterias.	14
3.4	Montagem do atuador da tração.	17
3.5	Corte longitudinal da cápsula do sensor de velocidade.	20
3.6	Montagem do sensor de velocidade.	21
3.7	Circuito elétrico simplificado do sensor de velocidade.	21
3.8	Sinal do sensor de velocidade.	22
3.9	Montagem do atuador do travão.	23
3.10	Montagem dos sensores do travão.	25
3.11	Montagem do atuador da direção.	28
3.12	Montagem dos sensores da direção.	30
3.13	Caixa das ligações eletrónicas.	36
3.14	Placas protótipo.	37
3.15	Painéis de instrumentação.	38
3.16	Comutação de um interruptor mecânico.	39
3.17	Comutação filtrada de um interruptor.	40
3.18	Sinal do sensor de velocidade e do seu corretor de onda.	40
3.19	Sinal do conversor digital–analógico.	41
3.20	Forma de representação do ângulo da direção.	44
4.1	Chave dos fluxogramas deste capítulo.	59
4.2	Fluxograma do processo de ligar.	60
4.3	Fluxograma do processo de desligar.	62
4.4	Fluxograma do processo de sair do estado de <i>lockdown</i>	63
4.5	Fluxograma do processo de comutação para modo autónomo de condução.	64
4.6	Fluxograma do processo de comutação para modo manual de condução.	65

Lista de Tabelas

2.1	Requisitos funcionais do ROVIM.	4
2.2	Avaliação das várias topologias de motores elétricos [3], modificada segundo os requisitos do ROVIM.	8
3.1	Sinais de entrada e saída do microcontrolador.	42
3.2	Ações tomadas pela tarefa de monitorização em função dos parâmetros monitorizados.	43
4.1	Elementos físicos de comando acessíveis pelo utilizador.	47
4.2	Indicadores visuais (LEDs) do ROVIM.	48
4.3	Código visual de cores dos LEDs do μC	49
4.4	Resumo dos comandos úteis para o ROVIM.	50
4.5	Comandos permitidos em <i>lockdown</i>	51
5.1	Especificações técnicas do ROVIM.	71
C.1	Parâmetros ajustáveis do controlador Sigmadrive PMT835M.	C-3
C.2	Configurações do controlador Sigmadrive PMT835M.	C-3
C.3	Configurações do controlador Sigmadrive PMT835M.	C-4
C.4	Alterações ao <i>parameter block</i> no <i>software</i> do ROVIM.	C-4

Siglas, Acrónimos e Abreviaturas

PWM *Pulse Width Modulation*, modulação por largura de pulso

ROVIM Robô de Vigilância de Instalações Militares

T2D Tração, Travagem e Direção

SeN Sensores e Navegação

CPC Comunicações e Posto de Controlo

I²C *Inter-Integrated Circuit*

OSI *Open Systems Interconnection*

MDF *Medium-Density Fibreboard*, fibra de madeira de média densidade

DC *Direct Current*, corrente contínua

AC *Alternating Current*, corrente alternada

NTC *Negative Temperature Coefficient*, coeficiente negativo de temperatura

PTC *Positive Temperature Coefficient*, coeficiente positivo de temperatura

NiMH *Nickel Metal Hydride*, níquel-hidreto metal

VRLA *Valve-Regulated Lead-Acid*, bateria de ácido chumbo selada

Li-Ion *Lithium-ion*, iões de lítio

LED *Light Emitting Diode*, díodo emissor de luz

PID Proporcional Integral Derivativo

PD Proporcional Derivativo

μC Micro Controlador

GPIO *General Purpose Input/Output*, pino programável de entrada/saída

ASCII *American Standard Code for Information Interchange*

PC *Personal Computer*, computador pessoal

TE *Terminal Emulator*, emulador de terminal

TJB Transistor de Junção Bipolar

RR Relação de Redução

SLIT Sistema Linear e Invariante no Tempo

PVC Policloreto de Vinil

SMD *Surface Mount Device*, dispositivo de montagem superficial

PCB *Printed Circuit Board*, placa de circuito impresso

SPST *Single Pole Single Throw*, unipolar de curso simples

DPDT *Double Pole Double Throw*, bipolar de curso duplo

SP3T *Single Pole Triple Throw*, unipolar de curso triplo

ADC *Analogue to Digital Converter*, conversor analógico–digital

1

Introdução

Este trabalho visa a construção de um dos módulos do protótipo de um veículo autónomo de vigilância de instalações militares, a Tração, Travagem e Direção (**T2D**) do Robô de Vigilância de Instalações Militares (**ROVIM**).

Os avanços tecnológicos da última década permitiram um crescimento nas aplicações militares de veículos autónomos. Com o objetivo de explorar o seu potencial na vigilância de instalações militares, a Academia Militar encomendou o desenvolvimento e construção de um protótipo funcional de um veículo autónomo, o **ROVIM**.

O **ROVIM** é uma plataforma móvel, baseada num *chassi* de moto-quatro equipado de motores eléctricos para tracção, travagem e de direcção. Esta plataforma está equipada com sensores diversos e com módulos de comunicação via rádio com uma estação de controlo. O **ROVIM** é consistindo por 3 subsistemas ou módulos: **T2D**, Sensores e Navegação (**SeN**) e Comunicações e Posto de Controlo (**CPC**), cujas funcionalidades se complementam e conjugam de acordo com um modelo em camadas, semelhante ao modelo *Open Systems Interconnection* (**OSI**).

O módulo **T2D** corresponde à camada de mais baixo nível, e consiste dos motores e seus controladores, baterias e sistemas de monitorização e controlo embarcados no *chassi* do veículo. É o módulo **T2D** que permite a movimentação da plataforma, através de comandos recebidos do módulo **SeN**. O **T2D** foi concebido para também poder ser operado de forma manual, controlado localmente por um utilizador humano.

Esta dissertação trata do projeto e construção de um protótipo do módulo **T2D** do **ROVIM**. Em 2, com base no caderno de encargos inicial, são definidos critérios de avaliação da solução a projetar, e planeada uma abordagem de ataque ao problema e de validação do progresso realizado. Posteriormente, a literatura sobre a matéria é revista e apreciada à luz dos critérios de avaliação.

Em 3 é apresentada a solução desenhada e construída, e justificadas as escolhas feitas ao longo do projeto. Em 4 é de novo apresentado o veículo, mas do ponto de vista do utilizador, com foco nas funcionalidades e procedimentos. Por fim, são reunidas em 5 as conclusões retiradas do projeto, e a avaliação feita do resultado

final. São também propostas correções e melhorias ao projeto e proposto um caminho de desenvolvimento futuro.

2

Enquadramento

2.1 Análise do caderno de encargos

O objectivo deste projeto é a construção de um protótipo funcional de um veículo autónomo destinado à vigilância de instalações militares. A sua estrutura básica é definida no enquadramento do módulo T2D e consiste em motores elétricos de tração, travagem e direção e seus controladores, baterias e sistema de monitorização, embarcados no *chassi* de uma moto-quatro.

Uma lista não exaustiva dos requisitos funcionais da T2D é apresentada na tabela 2.1. Este pretendem apenas balizar o desenho da plataforma e foram definidos a partir do âmbito do projeto e de uma análise das necessidades e potenciais capacidades de uma plataforma deste tipo.

Os requisitos funcionais são demasiado vagos para orientarem eficazmente o desenvolvimento do projeto, mas não faz sentido criar demasiadas condicionantes numa prova de conceito e primeira iteração de um protótipo executado por alunos sem experiência prévia neste tipo de trabalho. Por isso foram definidos princípios de desenho que pretendem emular requisitos subjacentes à ideia da plataforma, orientar o desenvolvimento do protótipo e eliminar a rigidez de uma longa lista de requisitos mensuráveis, muitos dos quais não são conhecidos à partida.

É expectável nesta iteração do protótipo que algumas das soluções inicialmente projetadas se mostrem inviáveis e tenham que ser corrigidas. É também razoável esperar que o protótipo apresentado seja alvo de modificações em iterações futuras. Assim, é essencial projetar soluções simples, flexíveis e sobredimensionadas, que acomodem facilmente alterações futuras, e relegar optimizações para iterações seguintes.

O protótipo a desenhar deverá ser tão seguro quanto possível, quer ao nível da prevenção de curto-circuitos e choques elétricos, como ao nível da prevenção de embates, pois as suas dimensões tornam-no capaz de infligir sérias lesões em caso de acidente.

Parâmetros como a fiabilidade, a autonomia, o custo e a facilidade de utilização são importantes, mas não são

prioritários num protótipo inicial, por isso são considerados como princípios secundários. Em suma, a concepção da plataforma rege-se primariamente por critérios de segurança, flexibilidade e simplificação tecnológica e secundariamente pela fiabilidade, autonomia, custo e facilidade de utilização.

Id.	Requisito	Quantificação
R1	Autonomia	> 20 h
R2	Velocidade máxima	> 10 km/h
R3	Velocidade mínima	< 1 km/h
R4	Condução autónoma	Acelera, desacelera e vira por comandos de um computador sem ligações exteriores à plataforma
R5	Condução manual	Acelera, desacelera e vira por ações humanas sem interface computadorizada
R6	Imobilização	Desacelera até se imobilizar
R7	Imobilização	Permite bloquear imediatamente as rodas em caso de emergência
R8	Imobilização	Permite apenas desbloquear as rodas após ação humana deliberada

Tabela 2.1: Requisitos funcionais do [ROVIM](#).

2.2 Abordagem

O objectivo deste projeto é a construção de um protótipo funcional de um veículo autónomo destinado à vigilância de instalações militares. Na seção 2.1 foram definidos os seus requisitos funcionais, bem como os princípios a seguir no seu desenho.

O protótipo a construir pode ser visto como três atuadores embarcados num *chassi*, e respetivo *hardware* e *software* de suporte. A projeção de cada um será, exceto quando explicitamente mencionada, aproximada como independente, de modo a simplificar o dimensionamento dos componentes.

Analisando as especificidades dos atuadores, observa-se que o seu dimensionamento se assemelha a dois tipos de problemas distintos: a construção de um veículo elétrico e a construção de um robô.

A literatura existente valida esta distinção. A literatura sobre veículos elétricos é vasta, mas trata maioritariamente sobre veículos com condutor. A propulsão e armazenamento de energia são amplamente discutidos, mas outros sistemas elétricos são ignorados. A direção do veículo é melhor endereçada na literatura de robótica, por se assemelhar a um problema de controlo.

Assim, o projeto é dividido em duas áreas do saber: veículos elétricos, que compreende o *chassi*, sistema de tração e baterias, e robótica, que compreende o desenho do sistema de viragem. O sistema de travagem não é tratado neste capítulo, pois a tecnologia usada já é endereçada para os outros dois sistemas.

2.3 Revisão da literatura

2.3.1 Propulsão

O veículo a motor é hoje em dia um componente fundamental da sociedade, e a base da plataforma [ROVIM](#). Existem dois tipos principais de motores usados na propulsão de veículos: o motor de combustão interna e o motor elétrico.

O motor de combustão interna é uma tecnologia fiável e refinada ao longo de mais de um século, no entanto, é maioritariamente usada em veículos conduzidos por humanos. Adaptar um veículo com motor de combustão interna para condução autónoma exige um conjunto de alterações ao nível do seu funcionamento interno (no caso de motores mais antigos sem controlo eletrónico), da sua gestão e do acoplamento mecânico que são complicadas e dispendiosas, mas o principal entrave à sua utilização em veículos autónomos é a ligação do motor sem intervenção humana. Os veículos elétricos não apresentam dificuldades no arranque e permitem, através dos controladores eletrónicos disponíveis atualmente, controlar com exatidão a potência produzida e a direção do movimento.

A propulsão puramente elétrica é principalmente adequada para veículos pequenos, de baixa velocidade e curta autonomia [1], pelo que se adequa perfeitamente para o [ROVIM](#). O sistema de propulsão é a parte fundamental de um veículo elétrico [1], sendo composto pelo motor e o seu controlador, o acoplamento mecânico e as rodas.

2.3.2 Rodas e acoplamento mecânico

As rodas dos veículos elétricos são idênticas às dos veículos com motor de combustão, à exceção de algumas aplicações demasiado complexas para os objetivos deste projeto.

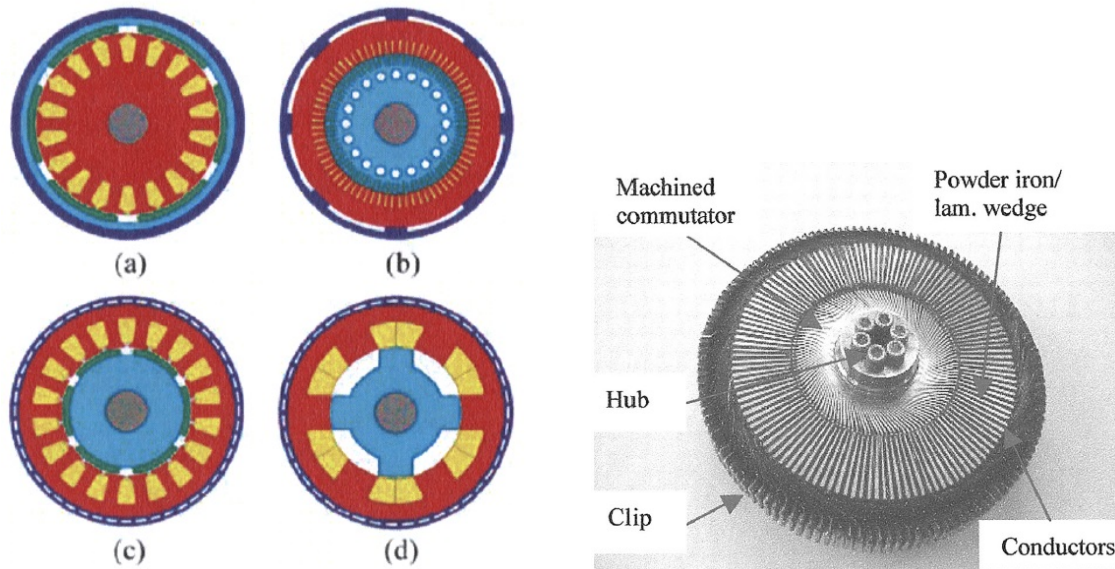
O acoplador mecânico transmite a potência do motor para as rodas e é dimensionado em conjunto, tendo em conta as necessidades de locomoção e a disposição dos componentes no veículo. Pode ser apenas uma ligação solidária entre os veios do motor e o eixo das rodas, mas tipicamente consiste num conjunto de engrenagens que desmultiplica a rotação do motor, de modo a aumentar o binário disponível nas rodas. A esta peça dá-se o nome de redutor, quando a razão de desmultiplicação é fixa, e caixa de velocidades, quando é variável. Devido à maior disponibilidade de binário dos motores elétricos, um redutor é suficiente para aplicações típicas, o que simplifica o controlo do sistema.

Há três características técnicas a ter em conta na escolha de redutores para este projeto: as dimensões, o alinhamento dos eixos e a direção da transmissão. As dimensões e o alinhamento dos eixos são importantes no planeamento da disposição dos componentes no veículo. A direção da transmissão consiste na definição do veio de entrada (onde é aplicado o binário) e de saída do redutor. Há topologias de redutores, como o parafuso sem-fim e coroa, que não permitem facilmente reverter a direção da transmissão [2].

O redutor do motor de tração deverá transmitir binário bidirecionalmente, para permitir que o veículo possa movimentar-se em ponto morto.

2.3.3 Motor

Existem vários tipos de motor elétrico com potencial técnico para uso na locomoção de veículos: o motor de relutância variável, o motor *Alternating Current* (AC) de indução, os motores síncronos de ímãs permanentes e de escovas, o motor *Direct Current* (DC) com escovas e o motor de Lynch. Na figura 2.1 são apresentadas as topologias citadas.



(a) Topologias de motores usados convencionalmente em veículos elétricos [3]. Legenda: a) motor DC; b) motor de indução; c) motor de ímãs permanentes sem escovas; d) motor de relutância variável.

(b) Fotografia da armadura de um motor de Lynch [4].

Figura 2.1: Topologias dos motores citados.

- O motor de relutância variável consiste num rotor com pólos salientes de material magnético, que gira consoante o campo magnético produzido no estator, de modo a minimizar a relutância do circuito magnético. Este tipo de motores é baratos, simples e com boas características de binário e velocidade para uso em veículos elétricos, mas não são conhecidas aplicações comerciais desta tecnologia [5].
- O motor de indução é um motor muito simples, robusto e tecnologicamente maduro. Consiste num rotor bobinado cuja corrente é induzida pelo campo magnético gerado nos enrolamentos do estator e, por sua vez, gera um campo magnético que tende a seguir o do estator, gerando movimento. É especialmente indicado para aplicações estáticas, mas pode ser adaptado para aplicações de veículos elétricos, com recurso a técnicas avançadas de controlo.
- O motor síncrono de ímãs permanentes é um motor que gera um campo magnético constante no rotor, com recurso a ímãs permanentes, que gira sincronamente com o campo gerado nos enrolamentos do estator. O motor síncrono de ímãs permanentes é alimentado por corrente AC, com recurso a controladores específicos. Este tipo de motores é muitas vezes equipado com inversores que permitem que sejam alimentados por corrente DC, tomando nesse caso a designação de motores DC sem escovas. Devido ao uso de ímãs permanentes estes motores conseguem atingir uma elevada eficiência e adquirir formas não

convencionais. Os ímanes permanentes nos motores síncronos podem ser substituídos por enrolamentos no rotor, alimentados por corrente **DC** com recurso a escovas e anéis coletores. Estes motores têm um controlo mais simples e mais adaptável que os motores de ímanes permanentes, mas pior rendimento.

- O motor **DC** com escovas consiste num rotor com vários enrolamentos alimentados por um sistema de comutação com escovas, e num estator que gera um campo estático. O estator pode ser bobinado ou de ímanes permanentes. Estes são motores fiáveis, tecnologicamente maduros, baratos e fáceis de controlar. Para além disso é possível controlar o fluxo magnético e o binário independentemente. As suas principais desvantagens são o baixo rendimento e densidade de potência, as necessidades de manutenção e a contra-indicação para uso em ambientes inflamáveis, devido às faíscas e ao desgaste produzidos na comutação das escovas.
- Uma configuração particular do motor **DC** com escovas de ímanes permanentes é o motor de Lynch. Em [4] é apresentada uma descrição da estrutura do motor e da sua performance. Este é um motor de fluxo magnético axial, ao contrário das restantes tecnologias apresentadas (de fluxo radial). O rotor é constituído por enrolamentos laminares de cobre, com "dentes" de ferro compactados entre os enrolamentos, que ajudam a conduzir o fluxo. O estator é formado por dois discos de ímanes permanentes que o ladeiam. Este motor apresenta algumas das vantagens dos motores **DC** de ímanes permanentes, nomeadamente rendimento e densidade de potência elevados, mas é a sua compactidade a principal vantagem em aplicações de pequenos veículos elétricos, pois permite maior flexibilidade no desenho de soluções de propulsão. Além disso, é atualmente usado em aplicações de pequenos barcos, motas e veículos elétricos de porte semelhante ao da plataforma **ROVIM**.

Em [1], [5] e [3] são apresentadas comparações semelhantes dos méritos destas topologias de motores (à exceção do motor de Lynch) para soluções comerciais de veículos rodoviários. Nos três casos conclui-se que os motores síncronos de ímanes permanentes e os motores de indução são os mais indicados. Esta comparação é um excelente ponto de partida no processo de escolha do motor de propulsão da plataforma, no entanto, estas aplicações têm diferentes requisitos dos do **ROVIM**, pelo que se impõe uma análise crítica destes resultados.

Em [3] é apresentada uma tabela (tabela II) com a avaliação dos diferentes sistemas de tração para veículos elétricos. Os critérios de avaliação (de igual ponderação) usados são: densidade de potência, eficiência, controlabilidade, fiabilidade, maturidade e custo. Tendo em conta os critérios de desenho e os requisitos da plataforma **ROVIM**, estes critérios foram ponderados da seguinte forma: densidade de potência, controlabilidade, fiabilidade e maturidade contam a dobrar para a classificação final, enquanto que a eficiência e o custo mantêm o seu peso.

Para poder comparar o motor de Lynch com as outras topologias, este foi avaliado de forma idêntica (à luz dos requisitos desta aplicação). Foi-lhe atribuída a seguinte classificação (de 0 a 5):

Densidade de potência 5: apresenta dimensões reduzidas (especialmente o comprimento axial) que facilitam a instalação em veículos pequenos e elevada densidade de potência [4];

Eficiência 3,5: cerca de 93 % de eficiência máxima [6] (idêntica à do motor de relutância [3]);

Controlabilidade 5: igual à de um motor **DC** com escovas;

Fiabilidade 3: igual à de um motor DC com escovas;

Maturidade 4,5: patenteado em 1986. Desenvolvido para aplicações semelhantes ao ROVIM;

Custo 3: Custo idêntico ao de um motor síncrono de ímãs permanentes;

O motor Lynch é também usado num dos protótipos do Projeto FST Novabase, o que permite potenciais trocas de experiências e impressões entre as equipas de concepção e acesso mais fácil a peças supletivas. Para além disso, este motor possui uma gama de controladores recomendados pela marca, o que simplifica o seu processo de escolha e aumenta o grau de confiança na solução projetada. Por isso, foram atribuídos a este motor 4 pontos adicionais à classificação final.

A tabela 2.2 apresenta a classificação das topologias apresentadas, revista de acordo com os requisitos deste projeto.

Critério	peso	Topologia				
		DC	Indução	Ímãs permanentes	Relutância variável	Lynch
Densidade de potência	x2	2,5	3,5	5	3,5	5
Eficiência	x1	2,5	3,5	5	3,5	3,5
Controlabilidade	x2	5	5	5	3	5
Fiabilidade	x2	3	5	4	5	3
Maturidade	x2	5	5	4	4	4,5
Custo	x1	4	5	3	4	3
Pré-total		37,5	45,5	44	38,5	45,5
Extra		0	0	0	0	4
Total		37,5	45,5	44	38,5	45,5

Tabela 2.2: Avaliação das várias topologias de motores elétricos [3], modificada segundo os requisitos do ROVIM.

Dos resultados expressos na tabela 2.2 conclui-se que o motor de indução, de ímãs permanentes e o motor de Lynch são os mais adequados para satisfazer os requisitos desta aplicação, não havendo um vencedor definido. Isto significa que a escolha do motor não recai nos méritos das várias tecnologias, mas noutros aspetos práticos de implementação.

2.3.4 Controlo

O controlo do sistema de propulsão de um veículo elétrico consiste num conversor de potência e um controlador eletrónico. O conversor converte e regula a energia fornecida pelas baterias ao motor e é comandado pelo controlador, de forma a implementar um algoritmo de controlo. Existem várias topologias destes componentes, mas a sua escolha depende diretamente do motor a controlar, pelo que se torna secundária em relação à escolha do motor.

2.3.5 Armazenamento de energia elétrica

A fonte de energia dos veículos puramente elétricos é o principal entrave à sua massificação [1]. As principais tecnologias usadas atualmente para acumular energia em veículos puramente elétricos são: super condensadores, baterias elétricas e células de combustível.

A célula de combustível é um dispositivo eletroquímico que usa uma reação química para gerar energia elétrica de forma não reversível. Esta tecnologia não é ainda considerada comercialmente viável [1].

Os super condensadores são condensadores de capacidade muito elevada. Têm uma densidade de energia (kWh/Kg) extremamente baixa [1], mas uma densidade de potência (kW/kg) bastante elevada. Por isso podem ser usados como fonte auxiliar de energia para picos de potência. Em combinação com baterias tradicionais permitem aumentar a autonomia e reduzir o desgaste das baterias, no entanto esta combinação introduz complexidade adicional à gestão das baterias.

As baterias elétricas são atualmente a principal fonte de energia dos veículos puramente elétricos [1]. Estas transformam energia química acumulada em energia elétrica. Nas baterias usadas em veículos elétricos a reação química que produz a energia elétrica é reversível, o que permite recarregá-las e reutilizá-las.

Em [7] são apresentadas as tecnologias de baterias mais comuns para uso em veículos elétricos, que se dividem em três famílias principais: ácido-chumbo, à base de lítio e à base de níquel. Destas três famílias, três tecnologias merecem especial destaque pela sua adequação ao uso em veículos elétricos: *Lithium-ion (Li-Ion)*, *Nickel Metal Hydride (NiMH)* e *Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA)*.

- As baterias de íões de lítio possuem a melhor densidade de energia e excelente densidade de potência. São usadas maioritariamente em aplicações de baixa potência, mas estão em constante evolução tecnológica e a sua adoção tem aumentado gradualmente. No entanto são mais instáveis, caras, e são suscetíveis a incendiar-se em caso de sobrecarga.
- As baterias de NiMH são a tecnologia mais usada em veículos elétricos [7]. Possuem elevada densidade de potência e são bastante seguras de operar.
- As baterias de VRLA são baterias de ácido e chumbo, uma tecnologia extremamente robusta e disseminada, mas seladas e com regulação por válvula, que as tornam mais seguras e tolerantes a sobrecarga. Possuem uma boa densidade de potência e são baratas, mas têm fraca densidade de energia, o que as torna pouco adequadas para aplicações de baixo peso e/ou elevada autonomia. No entanto devido à sua simplicidade e robustez são válidas para uso em protótipos, em particular para uso nesta fase do projeto ROVIM, que requer baixa velocidade e curta autonomia.

Quando são ligadas várias baterias em série, como é o caso das aplicações em veículos elétricos, requererem uma unidade de monitorização e balanceamento de cargas e temperatura. Isto é especialmente verdade para as baterias de NiMH e Li-Ion. As baterias de VRLA suportam melhor temperaturas adversas.

2.3.6 Direção

O sistema de direção do ROVIM deve permitir controlar o ângulo de viragem do veículo por computador.

A direcção de uma moto-quatro é tipicamente um sistema de Ackermann [8] atuado através de um guiador. Esta é uma geometria de viragem coordenada de duas rodas paralelas, que permite mantê-las num movimento de rotação pura (sem derrapagem) durante uma viragem em que estas seguem trajetórias de raios diferentes.

Este sistema pode ser controlado por um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) simples. O controlador é composto pelos componentes: o atuador (o motor e o acoplador mecânico), o dispositivo de retro-alimentação (um sensor de posição angular) e um controlador que execute o algoritmo de controlo.

Para projetar um controlador para o sistema, este precisa de ser traduzido por um modelo matemático. Existem duas abordagens para o fazer: deduzir as equações do movimento do sistema, ou estimá-las usando um método de identificação.

2.4 Planeamento

A execução do projeto foi planeada numa sequência natural de planeamento, construção e validação, de modo a minimizar o custo de alterações futuras. Para validar a execução foi definido um objetivo preliminar de instalação dos componentes principais no veículo e um objetivo intermédio: a implementação das funcionalidades de condução manual.

Após instalar os componentes principais no veículo (os acumuladores de energia, atuadores e acoplamentos mecânicos), as necessidades logísticas e de recursos difíceis de obter num laboratório de eletrónica diminuem.

A funcionalidade de condução manual do veículo é um objetivo mais simples que o objetivo final e permite validar a execução do projeto numa etapa intermédia, e continuar de seguida em direcção ao objetivo final sem necessidade de executar modificações relevantes no veículo.

Assim, inicialmente cada subsistema foi projetado e dimensionado com o detalhe que a visão inicial sobre o projeto permitiu. Foi possível compreender as suas características fundamentais, mas pormenores avançados de implementação foram capturados e resolvidos nas fases de construção e validação. De seguida foram adquiridos e acomodados no *chassi* os componentes principais, de modo a validar o planeamento da sua disposição e atingir o objetivo preliminar. A terceira fase consistiu na instalação das funcionalidades de tração e travagem e dos sistemas de segurança, de modo a atingir o objetivo intermédio do projeto. Por fim partiu-se para o objetivo final, que a este ponto implicava controlar a direcção e integrar as várias funcionalidades e o seu comando por computador.

3

Descrição da T2D

Neste capítulo apresentam-se os constituintes do módulo **T2D**, do ponto de vista da sua concepção e instalação. No fim deste capítulo o leitor deve conseguir identificar em detalhe os vários órgãos do veículo e entender como foram concebidos e implementados e porquê.

3.1 Visão geral do módulo

O módulo **T2D** do **ROVIM** é fundamentalmente constituído por atuadores eletromecânicos para as funções de tração, travagem e direção de um veículo, por dois mecanismos distintos de condução (manual e por computador) e por um programa de monitorização e controlo do estado do veículo. Todos os componentes do módulo foram projetados e instalados à volta destas funcionalidades.

A figura 3.1 ilustra um esquema de alto nível dos componentes embarcados no veículo e das suas interligações. Os atuadores integram controladores/conversores de potência responsáveis por mover o respetivo motor a partir da alimentação das baterias, de acordo com as ordens dos mecanismos de condução, e sensores que permitem ao microcontrolador monitorizar constantemente o estado do sistema.

O microcontrolador recolhe informação sobre o estado dos atuadores e implementa uma interface de condução que pode ser usada por outro computador, tornando assim o veículo verdadeiramente autónomo. O veículo incorpora ainda instrumentos de *hardware* que permitem a condução *in loco*. Existe também um mecanismo de segurança que, em caso de emergência, corta a alimentação aos motores da tração e direção e trava o motor do travão.

A condução consiste no controlo dos atuadores de tração e direção e é comandada por um dos dois mecanismos disponíveis. A instrumentação manual faz uso do guiador e dispensa o uso do motor da direção. O travão serve apenas para imobilizar o veículo em caso de emergência, que pode ser despoletado pelo utilizador ou pelo programa de controlo. Após uma emergência, o travão tem que ser destravado manualmente.

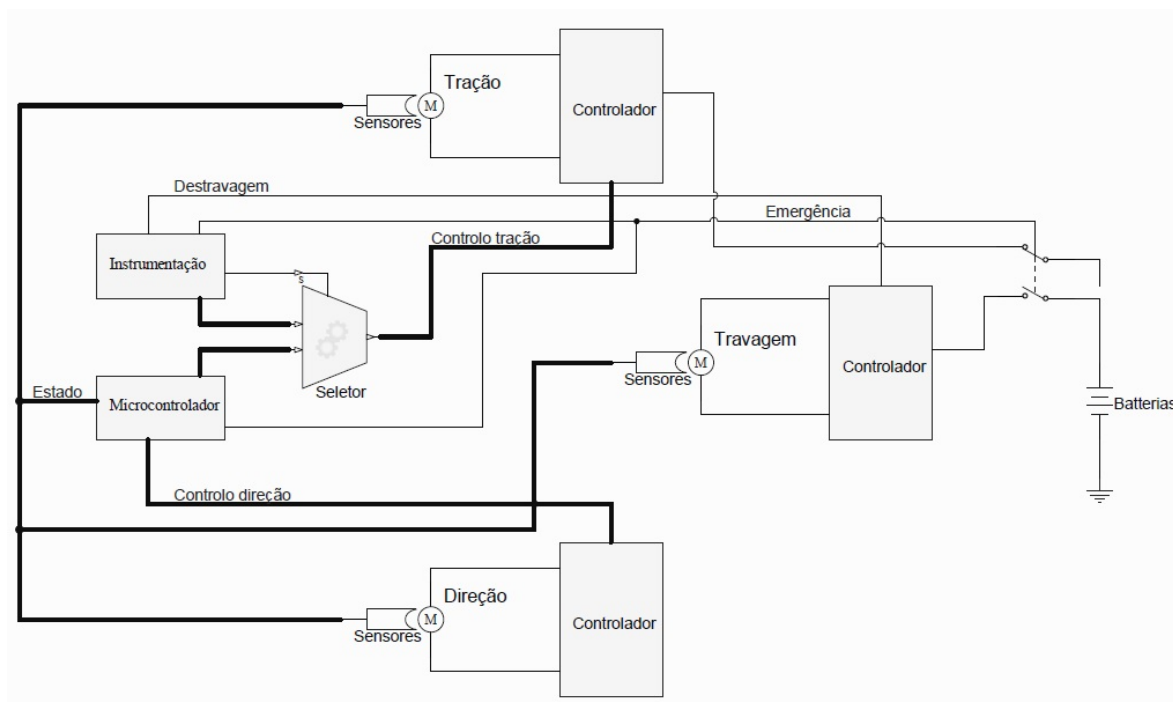


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema.
As ligações a carregado representam barramentos de sinais.

3.2 Chassi

O *chassi* é o esqueleto do ROVIM, onde todos os componentes embarcados do módulo T2D são instalados. É uma adaptação do *chassi* de uma moto-quatro com motor de combustão interna, de onde foram removidas todas as peças não essenciais e soldadas estruturas em ferro para fixação dos componentes. Com o objetivo de facilitar eventuais alterações futuras, todos os componentes foram fixados ao *chassi* de forma não permanente (aparafusados em vez de soldados).

O *chassi* selecionado foi o de uma Suzuki quadSPORT 1t-160, por ser económico e ter espaço suficiente para acomodar os componentes. O conjunto comprado é ilustrado na figura 3.2 e, para além do *chassi*, é constituído pelas seguintes peças: rodas, sistema de direção, sistema de travagem dianteira, carreto do motor, corrente e eixo traseiro com respetivo carreto, travão e forquilha. Este apresenta um geometria de direção de Ackerman, acionada através do guiador, passando por uma coluna quase vertical.

Antes de iniciar as modificações no *chassi* foram projetados e comprados os componentes de maior volume (baterias e atuadores) e planeado o posicionamento do seu conjunto no veículo, de modo a garantir a viabilidade das escolhas e a adequação das modificações a realizar.

O *chassi* foi alterado para construir na baía do antigo motor de combustão uma estrutura para duas plataformas de madeira *Medium-Density Fibreboard* (MDF) empilhadas, de fácil acesso, onde embarcam as baterias (plataforma inferior) e a maior parte dos componentes de menor dimensão (plataforma superior).

A plataforma inferior foi projetada para acomodar as baterias (que são o componente mais pesado do veículo) e assim não alterar significativamente o centro de gravidade projectado pelo construtor da moto. Estas são instaladas pela lateral da plataforma e são acondicionadas com recurso a tábuas frontais (dispostas em toda a altura das baterias), batentes rasos nas traseiras e laterais (colados na plataforma) e elásticos que as prendem



Figura 3.2: Chassi da moto-quatro antes das adaptações para o ROVIM.

aos limites da estrutura. O método de fixação usado apresenta limitações em terrenos acidentados ou durante acelerações bruscas, em que as baterias se podem deslocar e originar curto-circuitos. Esta restrição foi assumida nesta iteração do protótipo devido a limitações dos métodos de fabrico e porque não impede a prova do conceito. Na eventualidade desta não se ter verificado, ter-se-ia optado por fixadores em plástico ao estilo dos usados nas baterias dos automóveis.

Na forquilha traseira foram criados apoios para fixar o conjunto motor de tração e redutor, de modo a que o carreto de saída do redutor assente no mesmo plano que o do eixo traseiro, assim como um esticador para a corrente. Foi também criado um suporte para fixar um sensor junto ao carreto de saída do redutor, projetado para maximizar as opções de fixação.

Foi criada uma pequena plataforma na forquilha traseira onde fixa o motor do travão, assente em anilhas de borracha, assim como braçadeiras semi-rígidas para fixar o motor. O travão dianteiro não foi alterado, uma vez que se pretende usá-lo no modo de condução manual.

Criaram-se para a direção, na frente do *chassi*, apoios para fixar o redutor do motor da direção, um esticador para uma correia e um apoio para um sensor de posição. A coluna da direção foi cortada para lhe acoplar uma roda dentada concêntrica, complanar com a roda dentada acoplada na saída do redutor da direção. Esta assenta e fixa em cima de um ferro quadrado solidário com a coluna, disposto radialmente. Ao quebrar a coluna da direção, criou-se uma zona morta, discutida em mais detalhe em 3.6.

O resultado final a que de ora se chama *chassi* é composto pelos componentes C1 – C9 (ver apêndice C). O raio das rodas traseiras é de 28 cm, o das rodas dianteiras é de 23 cm e a tara do veículo de cerca de 250 Kg (o veículo não tem lugar para condutor).

3.3 Sistema de baterias embarcado

As baterias são a fonte de energia do **ROVIM**. São um dos componentes com maior potencial para causar acidentes sérios, nomeadamente curto-circuitos e explosões. Tendo em conta os critérios de desenho da plataforma, foi escolhida a tecnologia de baterias **VRLA**, devido à sua robustez, maturidade e fiabilidade. As desvantagens desta família de baterias (densidade de energia) têm pouca relevância para os requisitos do **ROVIM** em relação aos seus benefícios. A validade da escolha foi demonstrada durante o processo de construção, num evento em que uma bateria sobrecarregada libertou gases, mas não explodiu.

Optou-se por dispensar o uso de um sistema de monitorização nesta iteração do protótipo, apesar das suas vantagens para a segurança do sistema (mesmo em baterias **VRLA**) e prolongamento da vida útil das baterias, para reduzir a complexidade do sistema e porque o regime de utilização previsto para o veículo é lento e progressivo, colocando pouca exigência no sistema de armazenamento de energia.

Existem 7 baterias EnerSys Genesis NP55-12R: 6 montadas em série na moto e uma bateria suplente. A figura 3.3, mostra a vista explodida da montagem das baterias fora da moto. Cada bateria pesa 17,7 kg e tem uma corrente nominal de descarga de 150 A, conseguindo atingir picos de 500 A.

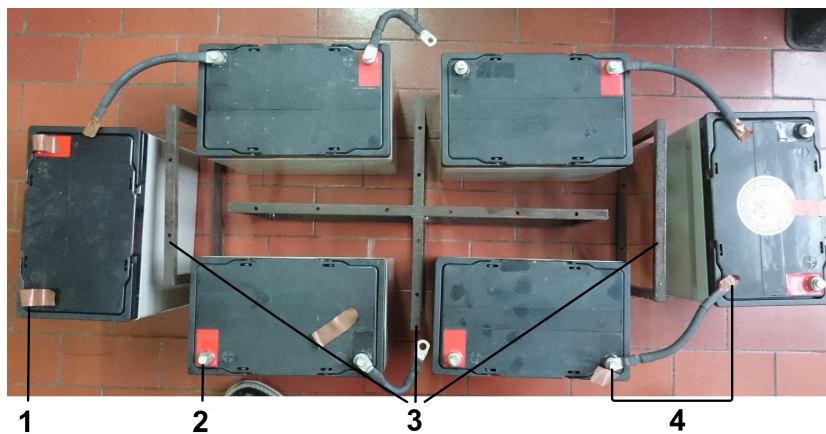


Figura 3.3: Vista explodida da montagem das baterias fora da moto. Legenda:
1: terminal V-; 2: terminal V+; 3: espaçadores; 4: cabo connector.

Foram instaladas 6 baterias, uma vez que a sua disposição era acomodável no *chassi* sem grandes dificuldades e porque assim permitem atingir a autonomia desejada (ver 3.4) e fornecer a tensão nominal ao motor de tração. Para melhorar a estabilidade térmica do conjunto foram inseridos espaçadores em madeira não condutora entre as baterias, que melhoram a circulação de ar. As baterias são acondicionadas com recurso a batentes de madeira e elásticos, como descrito em 3.2. As baterias estão ligadas por cabos multifilares de elevado calibre com as ligações expostas, o que aumenta o risco de choques elétricos e exige dos utilizadores cuidado adicional.

No esquema elétrico 1-Alimentações do apêndice B estão desenhadas as ligações elétricas às baterias. A tensão é fornecida ao sistema em duas voltagens: 12 V e 72 V, filtrada e limitada por fusíveis, sendo a bateria ligada à massa comum às duas alimentações, o que a torna alvo de um esforço adicional e a mais vulnerável do conjunto. O terminal negativo da bateria B1 foi definido como o ponto comum dos circuitos e ligado à massa por um cabo de elevado calibre. A estrutura de ferro do *chassi* foi definida como massa, por apresentar o menor potencial possível.

A tensão do conjunto das baterias carregadas varia entre os 81 V quando novo e os atuais 71,6 V, em que

as baterias estão no seu fim de vida e já não aceitam carga. Quando descarregadas, as baterias apresentam uma tensão de 72 V (durante a sua vida útil). A energia nominal do conjunto é de 56,3 Ah, ou 4,05 KWh, e a sua autonomia estimada é apresentada em (3.12). Foram adquiridos também dois carregadores para as baterias do ROVIM: um individual de 12 V e outro de 72 V, de modo a poder carregar o conjunto sem o retirar do veículo.

3.4 Sistema de tração do ROVIM

3.4.1 Dimensionamento do sistema

O sistema de propulsão, do qual o subsistema de tração faz parte, é a parte mais importante do veículo, na medida em que desempenha a funcionalidade principal, influencia significativamente a localização e o dimensionamento dos outros componentes e tem o maior potencial para causar acidentes sérios, nomeadamente curto-circuitos e embates.

Nesta secção é apresentado o dimensionamento das baterias junto com o do motor, já que para calcular a autonomia do veículo é preciso conhecer as suas necessidades de potência. Os requisitos/critérios principais que balizaram o dimensionamento do sistema de propulsão foram a velocidade máxima, a autonomia, a flexibilidade e a segurança. De modo a simplificar o dimensionamento das baterias foram ignoradas as contribuições dos outros sistemas elétricos para a autonomia, uma vez que se prevê que o motor de tração seja o principal consumidor de energia e porque se pretende apenas uma ordem de grandeza das necessidades do veículo, pois na seleção dos componentes entram outros fatores de escolha mais importantes.

A potência mínima pode ser calculada através da relação entre a potência e o binário:

$$P = \omega \cdot T \quad (3.1)$$

Onde a velocidade angular, ω , pode ser expressa em função da velocidade linear,

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3.2)$$

Para cálculo da potência mínima do sistema de propulsão, o binário aplicado pelo motor deve ser igual ao binário resistivo que, dada a reduzida velocidade de operação do veículo, é aqui aproximado ao binário de atrito de rolamento das rodas,

$$T \approx T_a \quad (3.3)$$

$$= m \cdot g \cdot b \cdot r \quad (3.4)$$

Substituindo em (3.1), obtém-se a expressão para a potência mínima do motor da tração em função da velocidade linear e do coeficiente de atrito,

$$P = v \cdot m \cdot g \cdot b \quad (3.5)$$

De acordo com [9, p. 117], o coeficiente de atrito típico dos pneus de um automóvel pode variar entre 0,010–0,015 numa superfície de betão e é de cerca de 0,3 numa superfície de areia. Substituindo os valores em (3.5) e considerando o pior caso para a circulação numa superfície de betão à velocidade mínima do requisito R2, obtém-se a potência mínima necessária para o motor de tração,

$$P_{min} = \frac{10}{3.6} \cdot 250 \cdot 10 \cdot 0.015 \quad (3.6)$$

$$= 104,2 \text{ W} \quad (3.7)$$

Para o perfil típico de utilização deste veículo, um sistema de propulsão com estas características será suficiente, mas é necessário garantir uma margem de segurança no dimensionamento, e antever possíveis alterações futuras. Por isso desenhou-se um cenário extremo de possível utilização futura do veículo, em que este transporta uma carga adicional de 150 kg numa superfície de areia, a um terço da velocidade máxima. Neste caso as necessidades da propulsão são de:

$$P_{min} = \frac{10}{3} \cdot \frac{1}{3.6} \cdot 400 \cdot 10 \cdot 0.3 \quad (3.8)$$

$$= 1111 \text{ W} \quad (3.9)$$

Com base nas necessidades de potência apresentadas é possível estimar a autonomia do veículo, que é dada por:

$$t = \frac{E}{P} \quad (3.10)$$

Substituindo em (3.10) para o cenário típico de utilização, obtém-se a autonomia mínima de:

$$t = \frac{4.05K}{125} \quad (3.11)$$

$$= 38,9 \text{ h} \quad (3.12)$$

E para o cenário extremo de utilização:

$$t = \frac{4.05K}{1111} \quad (3.13)$$

$$= 3,65 \text{ h} \quad (3.14)$$

A partir de (3.12) se conclui que o conjunto das baterias utilizado cumpre folgadoamente o requisito R1 para o caso típico de utilização.

3.4.2 Sistema embarcado

Com base nos requisitos da plataforma e nas restrições à localização dos componentes, escolheu-se o motor Agni B95-R para a propulsão do veículo. Este é um modelo do motor axial de Lynch, de 16 KW e 230 A nominais, capaz de atingir 6000 rpm a 72 V e 55 Nm a 400 A, muito mais potente que o necessário, mas que ainda assim foi o selecionado devido ao seu reduzido comprimento axial e porque vinha distribuído num *kit* com o controlador e a maior parte das peças necessárias para instalar o subsistema de tração, o que simplificou o processo de dimensionamento e compra de componentes. A instalação do conjunto motor+reductor no moto é ilustrada na figura 3.4.

As reduzidas dimensões do motor permitiram a sua instalação na forquilha traseira, mantendo o seu veio alinhado com o eixo traseiro da moto. A alternativa de o colocar numa posição semelhante à do antigo motor de combustão interna da moto iria retirar muito espaço para as baterias e dificultar o acesso aos componentes, possivelmente forçando a adoção de uma nova tecnologia de baterias menos fiável. Um motor mais volumoso iria possivelmente interferir no projeto do travão elétrico ou forçar a adoção de um reductor de eixos perpendiculares, mais complexo. O seu acoplamento à forquilha (em conjunto com o reductor) significa que o motor faz parte da parte não suspensa do veículo e está sujeito a mais vibrações mas, em contrapartida, a distância entre o eixo de saída (do reductor) e o eixo traseiro da moto mantém-se constante, o que simplifica bastante a ligação entre os dois (se o motor estivesse suspenso havia o risco de a corrente se soltar durante a compressão da suspensão).

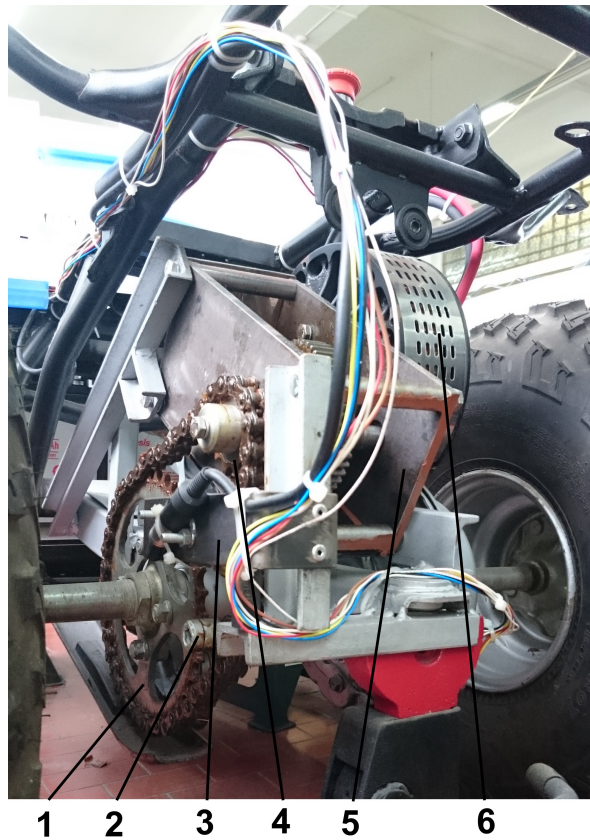


Figura 3.4: Montagem do atuador da tração. Legenda:
1: carreto do eixo traseiro; 2: esticador da corrente; 3: suporte do sensor de velocidade; 4: carreto de saída do redutor; 5: redutor da tração; 6: motor da tração.

O motor foi acoplado a um redutor projetado e construído de raiz para esta aplicação, que transmite a potência através de dois acoplamentos de engrenagens e liga ao eixo traseiro usando a corrente e os carretos originais da moto, totalizando uma Relação de Redução (RR) de 19,64 do motor às rodas. Os desenhos técnicos das peças do redutor são apresentados no apêndice E e os componentes listados no apêndice D. Com o redutor usado, a velocidade máxima teórica do veículo é de:

$$v_{\text{máx}} = \frac{rpm}{RR} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{60} \quad (3.15)$$

$$= \frac{6000}{19.64} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.28}{60} \quad (3.16)$$

$$= 8,96 \text{ m/s} \quad (3.17)$$

Ou 32,25 km/h. O binário máximo teórico aplicado nas rodas é de

$$T_{\text{máx}} = T_{\text{motor}} \cdot RR \quad (3.18)$$

$$= 55 \cdot 19.64 \quad (3.19)$$

$$= 1080,2 \text{ N m} \quad (3.20)$$

Optou-se por construir em vez de comprar um redutor, porque as alternativas encontradas eram caras, com pouca relação de redução e exigiam alterações à disposição dos componentes e à forma de ligação do eixo ao redutor. Ao construir o redutor de raiz, foi possível controlar em detalhe estes parâmetros de acordo com as exigências do projeto.

A construção do redutor consiste em duas chapas de metal, que cobrem lateralmente as engrenagens e onde assentam os rolamentos do veio; e quatro espaçadores nos cantos das placas, que as fixam em paralelo e com elas formam um contentor. O veio do motor fica acoplado a uma engrenagem dentro do contentor. À saída, um carreto instalado no último veio (que se propaga para além do espaço entre as duas chapas) transmite o binário para o carreto acoplado ao eixo traseiro através de uma corrente.

O *kit* do motor adquirido era composto também pelo seu controlador, um acelerador de punho, um contactor, um fusível, fios e conetores compatíveis com o controlador, que é o elemento agregador do subsistema de tração, onde todas as ligações elétricas são efetuadas. O controlador é o modelo recomendado pelo construtor do motor, um *Sigmadrive* PMT835M. Este é um controlador de quatro quadrantes para motores DC de ímanes permanentes, de 80 V e 350 A nominais [10], indicado para uso na tração de veículos elétricos. Vem equipado com dois *Light Emitting Diodes* (LEDs) informativos e um programador removível e foi montado em conjunto com o fusível e o contactor na plataforma superior de estibordo, sendo introduzidos espaçadores entre o controlador e a plataforma para melhorar a dissipação de calor.

Numa primeira fase, de modo a atingir o objetivo intermédio de condução manual, as ligações do controlador foram efetuadas de acordo com as recomendações do fabricante [10, p. 15], a um acelerador potenciométrico, a um sensor de velocidade (apresentado em detalhe em 3.4.3), ao motor e ao seu termistor, às baterias, a um LED exterior e aos vários interruptores de controlo. Após a validação intermédia, passaram-se os sinais de controlo da tração já construídos por um multiplexador de duas entradas para uma saída, que seleciona os modos de condução.

As ligações elétricas finais do controlador são apresentadas no esquema 2 - Tração do apêndice B. O acelerador comanda um potenciômetro de 5 KΩ, alimentado a 5 V e usado para gerar o sinal de aceleração de

modo manual. É também ligado um LED exterior para indicação de erros. A ligação às baterias é feita através de cabo multifilar de elevado calibre até à plataforma superior, onde liga ao fusível e ao contactor, equipado com uma resistência de pré-carga de 10 KΩ (fornecida no *kit*). A alimentação para ligar o contactor é fornecida ao controlador através de uma ligação de baixa corrente (com fusível lento de 1 A) entre o fusível principal e o contactor, e que passa por um interruptor de ligar/desligar. A ligação do contactor foi alterada para passar a depender de um sistema de segurança com capacidade de cortar a alimentação do controlador em caso de emergência (ver 3.7.1).

O controlador prevê também a ligação a um sensor de temperatura do motor, estando programado para funcionar com o modelo Philips KTY81-220 ligado com uma resistência de *pull-up* de 2,2 KΩ a 5 V. Este é um termistor diferente do que vem equipado no motor, um *Negative Temperature Coefficient (NTC)* de 37,5 KΩ a 25° e cerca de 5 KΩ à temperatura a partir da qual se deve começar a limitar a corrente no motor [11], enquanto que o KTY81-220 é um *Positive Temperature Coefficient (PTC)* de 2 KΩ a 25° de característica linear e coeficiente de temperatura de 0,79 %/K [12]. O circuito recomendado foi modificado para adaptar o sensor existente ao esperado pelo controlador. A montagem de entrada do pino do sensor de temperatura é um divisor resistivo, onde a tensão no ponto intermédio é dada por:

$$V = V_{CC} \cdot \frac{R_{pull-down}}{R_{pull-down} + R_{pull-up}} \quad (3.21)$$

A 25° a tensão que o controlador espera no circuito do termistor é de:

$$V = 5 \cdot \frac{2K}{2K + 2.2K} \quad (3.22)$$

$$= 2,38 \text{ V} \quad (3.23)$$

E a 100° (temperatura a partir da qual se define o começo da limitação de corrente) é de:

$$V = 5 \cdot \frac{3.392K}{3.392K + 2.2K} \quad (3.24)$$

$$= 3,03 \text{ V} \quad (3.25)$$

Como a resistência dos sensores varia em sentidos opostos, é necessário substituir a resistência de *pull-up* por uma de *pull-down*, para a tensão no ponto intermédio variar no mesmo sentido. Pretende-se que a 100° a tensão seja igual nas duas montagens. O valor da resistência necessária é dado por:

$$3.03 = 5 \cdot \frac{R}{R + 5K} \equiv \quad (3.26)$$

$$R = \frac{15.2K}{1.97} \quad (3.27)$$

$$= 7,75 \text{ k}\Omega \quad (3.28)$$

O sensor de temperatura foi ligado ao pino do controlador, juntamente com uma resistência de *pull-down* estandardizada de valor próximo, 7,5 kΩ. As ligações do sensor de temperatura, assim como as do sensor de velocidade, foram feitas em fio de microfone blindado para minimizar o ruído induzido pelas escovas e pelos ímanes permanentes do motor.

O controlador possui entradas para controlo das várias funções disponibilizadas, das quais apenas as seguintes são usadas: as entradas de seleção da direção da marcha (A1 e A2), um indicador do dispositivo de homem

morto (A3), e do travão de mão (A7) e os controladores da travagem regenerativa e da aceleração (A8 e A9). O indicador do dispositivo do homem morto é usado apenas por imposição do programa do controlador, já que no projeto é usado outro mais abrangente. O indicador do travão de mão é usado para imobilizar o veículo, recorrendo à capacidade de "Anti Roll-back" que o controlador disponibiliza.

O controlador possui vários parâmetros configuráveis através do programador removível. A configuração adotada para este projeto é apresentada no apêndice C.

3.4.3 Sensor de velocidade

O sistema de tração foi equipado com um sensor de velocidade para fins de monitorização e controlo do atuador. Foi escolhido um codificador de relutância variável por ser simples de construir e de montar, já que todas as engrenagens são de metal.

O núcleo do sensor é constituído por um circuito magnético permanente e um transdutor de energia magnética (uma bobina). Quando o sensor está próximo de uma engrenagem em rotação, os seus dentes vão fazer variar a relutância do circuito magnético e induzir uma tensão alternada aos terminais da bobina de frequência proporcional à velocidade da engrenagem.

A figura 3.5 representa esquematicamente um corte longitudinal da cápsula do sensor construído. No topo do lado da engrenagem está um pólo de material ferromagnético, acoplado a um ímã de neodímio cilíndrico, e envolvido por uma bobina de 800 espiras de fio de cobre de 0,08 mm de diâmetro, ligada à entrada de uma placa com o circuito de condicionamento apresentado no esquema Encoder do apêndice B impresso, e de forma simplificada na imagem 3.7. A montagem está encapsulada num tubo de Policloreto de Vinil (PVC) com uma resina (Araldite®) e montada no veículo como ilustra a figura 3.6.

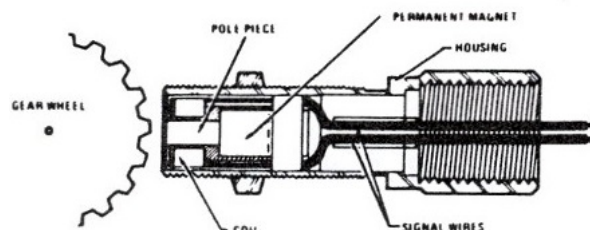


Figura 3.5: Esquema de um corte longitudinal de um sensor de relutância variável [13].

O circuito de condicionamento de sinal da *Printed Circuit Board* (PCB) transforma a tensão alternada induzida na bobina num sinal binário de frequência proporcional à velocidade. O sinal da bobina é primeiramente amplificado e retificado com recurso a um amplificador operacional *rail-to-rail* em montagem retificadora de precisão de meia onda. O sinal retificado é depois passado por um comparador com histerese, que gera o sinal da saída e está ligado a um LED que pisca a cada pulso, fornecendo assim uma confirmação visual da operação do sensor.

Para dimensionar o comparador, foi analisado o comportamento do sinal produzido pelo amplificador. Numa montagem de ensaio a 4 mm de uma engrenagem a 90 rpm, mediu-se uma amplitude de 20 mV para o sinal produzido pela bobina, que corresponde ao sinal retificado pelo amplificador com ciclo de utilização de 50%. Após o dimensionamento do comparador, mediu-se o limiar mínimo na tensão aos terminais da bobina que

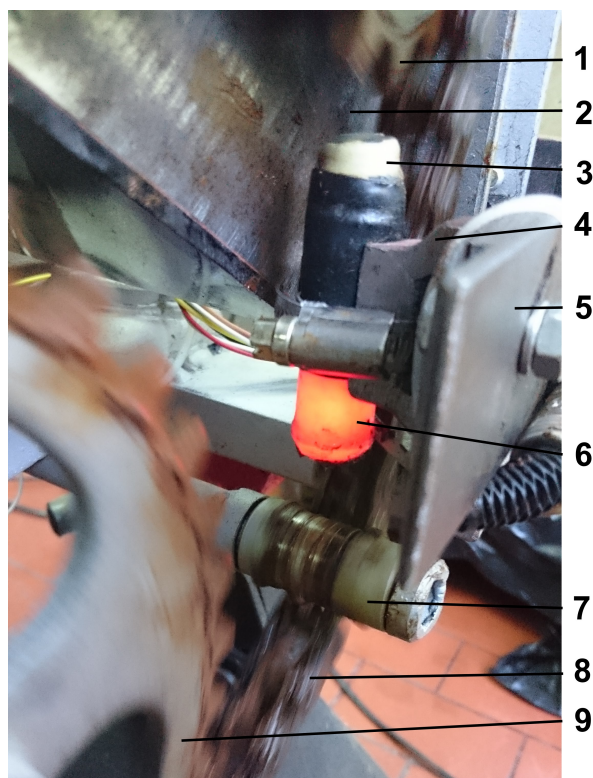


Figura 3.6: Montagem do sensor de velocidade. Legenda:
 1: carroto de saída do redutor; 2: redutor 3: cápsula do sensor; 4: adaptador de fixação; 5: suporte do sensor; 6: indicador luminoso de pulso; 7: esticador da corrente; 8: corrente; 9: carroto do eixo traseiro.

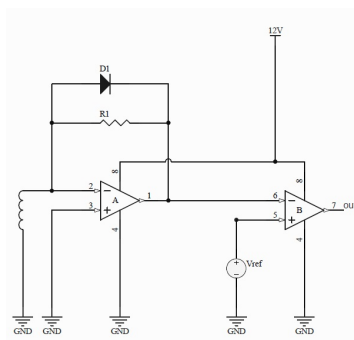
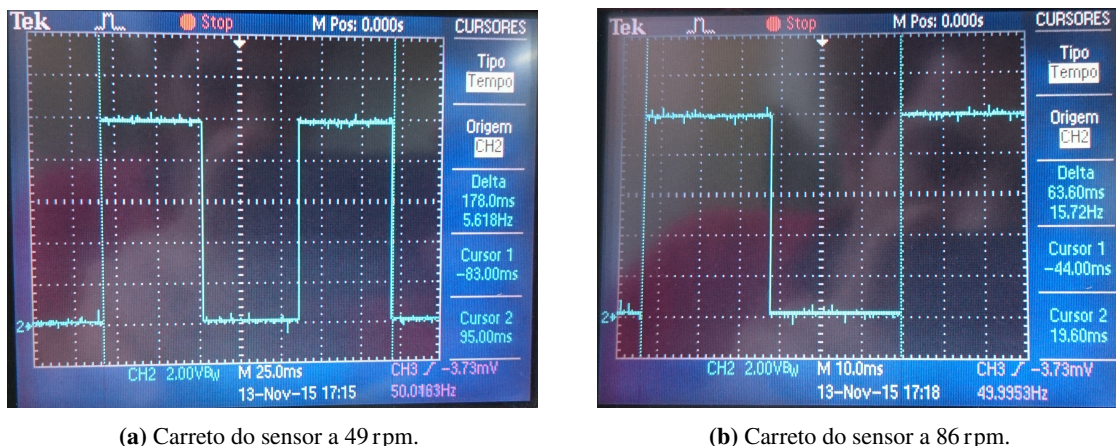


Figura 3.7: Circuito elétrico simplificado do sensor de velocidade.

permite gerar um sinal com intensidade suficiente para o disparar (e gerar uma onda quadrada na saída), 4 mV.

O circuito final foi montado e testado para várias velocidades, primeiro em bancada, e depois no veículo. Os gráficos da figura 3.8 mostram os resultados obtidos para diferentes velocidades. Foi também medido o consumo do circuito, sendo de cerca de 300 μ A em repouso e de 15 mA em funcionamento a elevada frequência.



(a) Carreto do sensor a 49 rpm.

(b) Carreto do sensor a 86 rpm.

Figura 3.8: Gráfico da tensão à saída do sensor de velocidade em função do tempo, a diferentes velocidades do eixo traseiro.

3.5 Sistema de travagem do ROVIM

Os objetivos do sistema de travagem do ROVIM são diminuir a velocidade e garantir a paragem em segurança do veículo. Existem três tipos de mecanismos que permitem ao ROVIM diminuir a sua velocidade: o travão da frente, o travão traseiro e o mecanismo de travagem regenerativa do controlador da tração. Decidiu-se usar o travão da frente para uso em modo manual de condução, a travagem regenerativa para uso em modo autónomo e o travão traseiro para uso em caso de emergência. A travagem regenerativa não é um mecanismo muito eficaz para travar um veículo mas, devido às baixas velocidades atingidas e à disponibilidade permanente de um travão mais poderoso, considerou-se suficiente. Ao dedicar o travão elétrico apenas às situações de emergência foi possível desenhar um sistema de segurança mais eficaz.

O travão da frente foi portanto mantido inalterado e foi desenhado um atuador para o travão de trás. Este é um travão de tambor acionado por uma alavanca com um pivô com liberdade de rotação onde, na configuração de origem, enroscava um ferro que propagava a força exercida no pedal e puxava o travão. Projetou-se em substituição um veio roscado sem fim acionado por um motor, que enrosca no pivô da alavanca.

Uma análise à operação do travão revelou que, durante o curso da alavanca, o ângulo do pivô com o plano da forquilha (e portanto com o veio do motor) varia, o que introduz forças radiais indesejadas no veio. Foi medida a força necessária para puxar completamente a alavanca do travão, 80 N.

O pivô da alavanca, em conjunto com o veio roscado, formam um sistema artesanal semelhante a uma engrenagem de parafuso sem fim e coroa, ideal para esta aplicação devido à transmissão unidirecional de binário, que impede o travão de destravar sozinho quando o motor pára. No entanto, os parâmetros do redutor são desconhecidos, o que torna mais difícil o cálculo do binário de motor necessário para acionar o travão. Assim, optou-se por uma abordagem empírica, em que se testou a capacidade dos motores para a função *à posteriori*. O motor

de direção, quando testado, apresentou binário suficiente para a função, pelo que se decidiu usar um idêntico.

O motor usado é um servomotor PARVEX RS430H, um motor DC compacto de ímanes permanentes, de 3000 rpm a 78 V, 1,36 N m de binário máximo e corrente nominal de 6,6 A, vocacionado para pequenas aplicações robóticas [14]. O motor é fixo a uma plataforma flexível assente na forquilha traseira com recurso a duas braçadeiras semi-rígidas de metal, que permitem atenuar o esforço radial no veio resultante da oscilação do pivô. O veio do motor é ligado através de um adaptador em latão feito de raiz a um fuso que propaga o movimento e enrosca no pivô da alavanca do travão. A figura 3.9 mostra a montagem do travão na moto. O esquema elétrico do sistema é apresentado no apêndice B, esquema 4 - Travão.

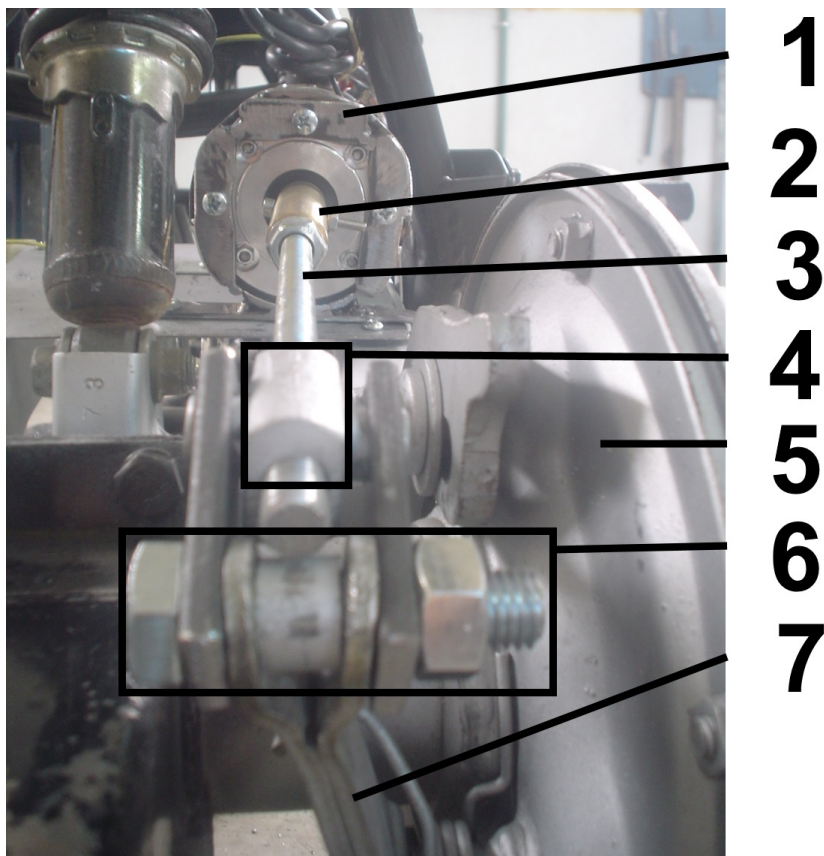


Figura 3.9: Montagem do atuador do travão. Legenda:

1: fixador frontal do motor; 2: adaptador em latão; 3: parafuso sem fim; 4: pivô do travão; 5: tambor do travão; 6: fixador do pivô à alavanca; 7: alavanca do travão.

Devido às características do travão elétrico, que ou está todo travado ou todo destravado, e aos requisitos de segurança da plataforma, optou-se por dispensar o conversor de potência e alimentar o travão diretamente da bateria. Esta opção simplifica o controlo do motor e aumenta a sua fiabilidade, já que dispensa eletrónica do estado sólido, propensa a falhar de forma não controlada quando sujeita a transientes elevados. O controlador foi construído com recurso a comutadores eletromecânicos (relés e interruptores), mais resilientes a picos de corrente e previsíveis em caso de falha, permitindo assim aumentar a tolerância a falhas.

O motor do travão é controlado através de um relé que seleciona a polaridade da alimentação, estando definido o sentido de travagem por defeito. Todos os relés usados foram equipados com um díodo de roda livre, para a bobina de acionamento poder descarregar quando desliga. O relé pode ser acionado para inverter a polaridade com recurso a dois mecanismos: um botão de pressão manual e um sinal vindo do microcontrolador. Esta

configuração não permite travar enquanto houver uma ordem de destravagem pendente, o que pode originar uma falha de segurança em caso de erro do microcontrolador. Para a mitigar, foi adicionada eletrônica adicional para que o comando de destravagem por computador dependa também do dispositivo do homem morto (ver 3.7). A ligação para a destravagem por computador encontra-se pronta a usar, mas está atualmente desligada por opção de desenho.

A alimentação para a travagem, que está ligada por defeito, passa ainda por um circuito de segurança (discutido em 3.7.1), responsável por dar a ordem de travagem. Como a destravagem é controlada deliberadamente pelo utilizador, não necessita de processamento adicional.

Os limites do curso da alavanca do travão foram transladados para uma zona mais acessível, com recurso a um adaptador especial mostrado na figura 3.10, e nele foram instalados sensores de fim de curso, por onde passa a alimentação para o motor, e que controlam a sua paragem. Deste modo, quando o travão chega a um dos limites de operação o sensor abre o circuito e o motor deixa de ser alimentado. O sinal dos interruptores do lado da destravagem foi usado para comandar dois LEDs que indicam ao utilizador a destravagem completa (verde) e a travagem, ainda que parcial (vermelho). Apesar de terem sido usados LEDs de 12 V, foi adicionada por precaução uma resistência de limitação de corrente de 1,2 kΩ. Quando um dos LEDs conduz, a sua corrente é dada pela lei de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.29)$$

Substituindo em (3.29), obtém-se a corrente em cada LED:

$$I = \frac{12}{1.2K} \quad (3.30)$$

$$= 10 \text{ mA} \quad (3.31)$$

A potência que a resistência tem que dissipar é então:

$$P = V_R \cdot I \quad (3.32)$$

$$\approx 11.3 \cdot 10m \quad (3.33)$$

$$= 113 \text{ mA} \quad (3.34)$$

Que está dentro dos seus limites.

A ação de destravagem do microcontrolador foi implementada num circuito à base de Transístores de Junção Bipolar (TJBs). Em todo este projeto foram preferidos TJBs devido à facilidade de polarização e à maior robustez para aplicações de componentes discretos. O acionador da destravagem para o modo autónomo de condução é composto por um interruptor acionado pelo microcontrolador, de ação limitada por outro interruptor em série, ligado ao dispositivo do homem morto. Em condições normais de utilização (dispositivo do homem morto colocado e botão de destravagem manual solto), a resistência R7 é alimentada a 12 V e o transístor Q2 está na condução. A sua corrente de base é calculada a partir da lei dos nós:

$$I_{R_8} + I_{B \text{ Q2}} + I_{R_6} = 0 \quad (3.35)$$

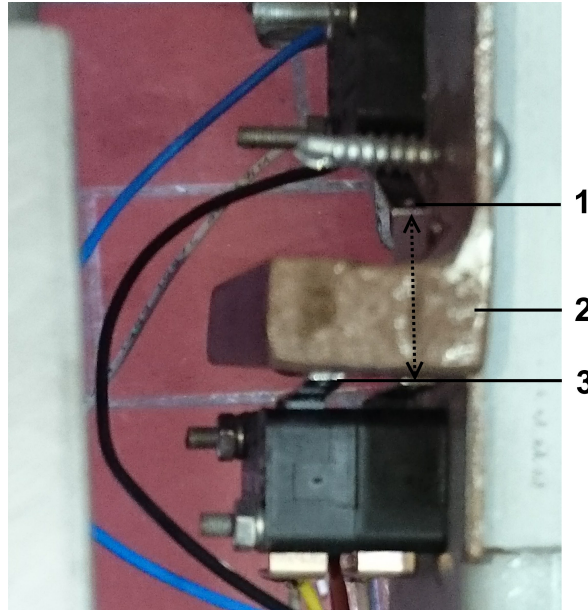


Figura 3.10: Montagem dos sensores do travão, vista de cima com o travão destravado. Legenda:
 1: patilha do fim de curso de travagem; 2: patilha solidária com a alavanca do travão, que ativa os sensores; 3: patilhas dos fins de curso de destravagem. A seta a picotado denota o curso de 2.

Substituindo em (3.35) obtém-se,

$$I_{R_8} + I_{B Q2} = I_{R_6} \quad (3.36)$$

$$\frac{V_{BE Q2}}{R_8} + I_{B Q2} = \frac{V_{Disp\ homem\ morto} - V_{BE Q2}}{R_6 + R_7} \quad (3.37)$$

$$\frac{0.7}{27k} + I_{B Q2} = \frac{12 - 0.7}{1.2K + 1.2K} \quad (3.38)$$

$$I_{B Q2} = 4.7m - 0.026m \quad (3.39)$$

$$= 4,7 \text{ mA} \quad (3.40)$$

Neste caso o relé K2 arma se for aplicada tensão em R5 e a corrente no coletor de Q1 é, assumindo que os transístores estão saturados (a resistência da bobina do relé é de 360Ω [15]):

$$I_{C Q1} = \frac{V_{VCC\ 12V} - V_{CE Q1} - V_{CE Q2}}{R_{K2}} \quad (3.41)$$

$$= \frac{12 - 0.2 - 0.2}{360} \quad (3.42)$$

$$= 32 \text{ mA} \quad (3.43)$$

E a sua corrente de base:

$$I_{B Q1} = \frac{V_{Auto\ destrv} - (V_{CE Q2} + V_{EB Q1})}{R_5} \quad (3.44)$$

$$= \frac{5 - 0.2 - 0.7}{2.7K} \quad (3.45)$$

$$= 1,5 \text{ mA} \quad (3.46)$$

De onde se pode calcular a corrente do coletor de Q2,

$$I_{C\ Q2} = I_{E\ Q1} = I_{C\ Q1} + I_{B\ Q1} \quad (3.47)$$

$$= 32m + 1.5m \quad (3.48)$$

$$= 33,5\text{ mA} \quad (3.49)$$

As condições de saturação de um transistor **TJB** podem ser aproximadas por:

$$I_C < \beta \cdot I_B \quad (3.50)$$

$$V_{CE} \approx 0,2\text{ V} \quad (3.51)$$

O valor de β para Q1 é maior que 75 [16], enquanto que para Q2 é maior que 110 [17]. Daqui se conclui que, para ambos os transístores, $I_C < \beta \cdot I_B$, pelo que a aproximação feita anteriormente é válida e ambos estão saturados e a funcionar como interruptores, como é pretendido neste caso.

Já quando o dispositivo do homem morto é retirado, Q2 não conduz e não é possível destravar o travão. O sistema foi desenhado assim para que o microcontrolador não tenha a capacidade de bloquear o controlador de travagem no caso extremo de uma falha.

Na polarização da base de Q2 foram usadas duas resistências em série, de modo manter o funcionamento do interruptor no caso de uma delas falhar e passar a um curto-circuito. A resistência R8 serve como *pull-down* da base de Q2, enquanto que C8 serve para filtrar o regime transitório na comutação do dispositivo do homem morto, de modo a proteger o transístor de picos de tensão. Q1 é um transístor de elevada corrente nominal, indicado para aplicações de comutação e ideal para conduzir o circuito da bobina do relé. O transístor Q2 deveria possuir as mesmas características, mas por falta de outros componentes, foi usado um transístor de uso geral.

Este tipo de controlo não prevê nenhum tipo de arranque suave. Embora não seja problemático para o funcionamento do circuito, a ligação do motor à alimentação cria um pico de corrente no arranque do motor que, a longo prazo, vai provocar um desgaste adicional nos componentes. Para tentar mitigar esse desgaste, foi introduzido um condensador de elevada tensão nominal em paralelo com o motor, para tentar alisar os picos de corrente.

Após a construção do circuito, mediu-se o tempo de travagem e destravagem, que é sempre inferior a 5 s.

3.6 Sistema de direção do **ROVIM**

Este sistema permite que o **ROVIM** execute trajetórias não retilíneas de forma comandada. Este subsistema não requer padrões de segurança e fiabilidade tão elevados como os da tração e travagem mas, ao nível do seu controlo, representa um tipo de problema diferente. No contexto desta aplicação, pretende-se controlar o ângulo de viragem das rodas, como um servomecanismo de um robô.

O *chassi* incorpora uma geometria de direção de Ackerman acionada através de um tubo quase vertical (a coluna da direção), solidário com o guiador. Quando o guiador é virado, o movimento é transmitido pela coluna até um pivô ao nível das rodas, que puxa os tirantes. Este sistema é perfeitamente adequado para utilizar em modo manual, pelo que se manteve, e se projetou uma solução complementar para uso em modo autónomo.

Uma análise à operação estática do sistema revelou que, quando assente num piso de azulejo, são necessários pelo menos 25 N de força aplicados na ponta do guiador para a direção vencer a força de atrito e virar até cerca

de 80 % do seu curso, e cerca de 30 N para virar o restante. O raio do guiador é de 41 cm e a sua ponta descreve a trajetória de um segmento circular que, de extremo a extremo, mede 58 cm de corda. A relação de uma corda com o segmento circular que o define é dada por:

$$\text{corda} = 2 \cdot r \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.52)$$

De onde se obtém a amplitude do ângulo de viragem da moto:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\text{corda}}{2 \cdot r}\right) \cdot 2 \quad (3.53)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{0.58}{2 \cdot 0.41}\right) \cdot 2 \quad (3.54)$$

$$\theta = 88,84^\circ \quad (3.55)$$

Aproximadamente 90° .

Com base nos valores medidos obtém-se o binário aplicado no caso testado (que é sensivelmente igual ao binário de atrito de deslizamento),

$$T = F \cdot b \quad (3.56)$$

$$= 30 \cdot 0.41 \quad (3.57)$$

$$= 12,3 \text{ N m} \quad (3.58)$$

A geometria da direção de Ackerman evita que as rodas escorreguem durante a viragem, desde que o veículo esteja em movimento, sendo neste caso o binário de atrito corresponde ao binário de rolamento do veículo. Para o cenário típico de utilização referido em 3.4, substituindo em (3.4),

$$T = 250 \cdot 10 \cdot 0.015 \cdot 0.23 \quad (3.59)$$

$$= 8,6 \text{ N m} \quad (3.60)$$

E para o cenário extremo,

$$T = 400 \cdot 10 \cdot 0.3 \cdot 0.23 \quad (3.61)$$

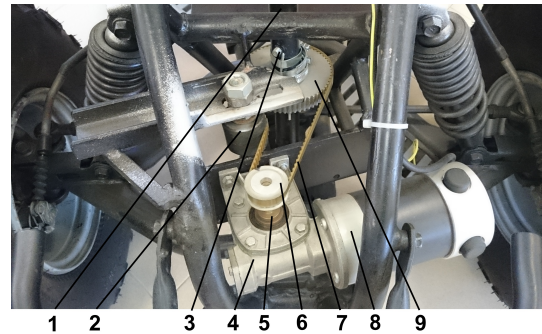
$$= 276 \text{ N m} \quad (3.62)$$

Com base nos critérios de desenho da plataforma, procurou-se dimensionar um atuador tendo em conta o pior caso, de modo a precaver modificações futuras. Com base nesta análise, foi selecionado um servomotor PARVEX RS430H, um motor DC compacto de ímanes permanentes, de 3000 rpm a 78 V, 1,36 N m de binário máximo e corrente nominal de 6,6 A, vocacionado para pequenas aplicações robóticas [14]. O motor foi ligado a um redutor, acoplado à direção através de um correia, como ilustrado na figura 3.11.

O redutor usado é um STM RMI S28, um redutor compatível com as dimensões do motor, de parafuso sem fim e coroa, com relação de redução de 49,56 % de rendimento a 1400 RPM de (velocidade máxima recomendada) e potência de entrada de 80 W [18], o que está dentro dos limites da operação do motor nesta aplicação. O redutor é apropriado devido à sua elevada relação de redução, reduzidas dimensões e especialmente porque transmite o binário unidirecionalmente, o que reduz a perturbação das irregularidades do terreno no sistema de controlo. O motor foi acoplado ao redutor e este fixado a uma estrutura no *chassi*.



(a) Montagem completa do sistema da direção.



(b) Pormenor da montagem do atuador. Legenda: 1: coluna da direção; 2: esticador; 3: fixador das duas partes da coluna; 4: redutor da direção; 5: veio do redutor; 6: polia de 30 dentes; 7: correia; 8: motor da direção; 9: polia de 60 dentes.

Figura 3.11: Montagem do atuador da direção.

Para transmitir o binário para as rodas, mantendo a funcionalidade inicial, a coluna da direção foi cortada para lhe fixar uma polia dentada de 60 dentes de 5 mm de passo e 16 mm de espessura. No redutor foi instalado um veio de latão onde fixa uma polia compatível, de 30 dentes. A distância entre os eixos das duas polias é de 77 mm, pelo que, a partir dos seus diâmetros primitivos, 103 mm e 51 mm [19] respetivamente, se calcula o perímetro mínimo de ligação entre as duas pela fórmula:

$$P_{correia} \geq \frac{dp_1}{2} + \frac{dp_2}{2} + 2 \cdot d_{eixos} \quad (3.63)$$

$$\geq \frac{103 \cdot \pi}{2} + \frac{51 \cdot \pi}{2} + 2 \cdot 77 \quad (3.64)$$

$$\geq 396 \text{ mm} \quad (3.65)$$

Com base nestes cálculos foi escolhida uma correia maleável de 460 mm (a mais aproximada), esticada através de um rolo de nylon ajustável, assente num suporte próprio. A correia, quando esticada, impede a direção de se mexer livremente, pelo que é necessário soltá-la para poder operar a direção com o guiador. No entanto, é suficientemente flexível para funcionar como fusível mecânico e limitar os danos no sistema em caso de perda de controlo do motor.

A razão de redução total do sistema projetado é de 98, que permite obter um binário nas rodas de:

$$T_{\text{máx}} = RR \cdot T_m \quad (3.66)$$

$$= 98 \cdot 1.36 \quad (3.67)$$

$$= 133,28 \text{ Nm} \quad (3.68)$$

Em que T_m representa o binário do motor. O que é insuficiente para o caso extremo de condução definido, mas

foi ainda assim considerado aceitável na fase de projeto, e permitiu escolher um redutor mais pequeno e fácil de obter, o que permitiu instalar o atuador mais abaixo na coluna da direção, e manter a zona superior livre para adições futuras.

Após a instalação do acoplador para a direção, foram detetados dois problemas relevantes: a coluna da direção ficou com uma zona morta e a correia salta para valores de binário relativamente pequenos. Devido ao corte feito na coluna da direção não foi possível aparafusar as duas partes de forma totalmente solidária, e passou a ser necessário virar o guiador numa direção cerca de 5° até que a direção comece a responder. A solução passaria por soldar as duas partes, mas optou-se por não o fazer após a deteção do problema com a correia. Devido a falhas no desenho da transmissão, a correia escolhida apresenta limitações severas na sua capacidade de transmitir binário entre os veios. Testando o atuador com a moto parada e as rodas em azulejo, verificou-se que a correia começava a saltar antes de chegar a 80% do curso da direção, o que significa que o binário que consegue transmitir é inferior a:

$$T_{\text{máx correia}} < F_{80\%} \cdot b \quad (3.69)$$

$$< 25 \cdot 0.41 \quad (3.70)$$

$$< 10,25 \text{ N m} \quad (3.71)$$

O que frustrou o dimensionamento feito para o sistema. Mesmo assim optou-se por avançar com esta configuração para prova do conceito, e guardar as modificações após uma avaliação global da performance do veículo, pelo que se restringiu a operação da direção a quando a moto está em movimento, de modo a mitigar o problema.

Para comandar o motor foram adquiridos um conversor e um controlador indicados para controlo de pequenos motores elétricos e aplicações de robótica. O conversor usado é um OSMC V4.24, uma ponte em H de elevada potência para comando de motores DC de ímanes permanentes de 12 V a 80 V, capaz de comutar até 160 A de corrente, parte de um projeto de código aberto. Para comandar esta placa foi adquirido um microcontrolador com uma interface compatível, onde se implementou o programa de controlo da posição da direção. O microcontrolador é descrito em mais detalhe em 3.8.

Para poder controlar com precisão da direção, projetou-se um programa de controlo em malha fechada, discutido em 3.6.1, e um sensor de posição para fechar a malha. O sensor, um potenciómetro de precisão de 3 voltas e 5 kΩ [20], é montado junto ao guiador (por ser a opção mais simples) e ligado ao microcontrolador por um fio de microfone blindado, e lê a posição angular da parte superior da coluna da direção com recurso a duas engrenagens acopladas: uma fixa à direção e outra ao potenciómetro, como mostrado na figura 3.12. As engrenagens foram dimensionadas para maximizar o curso do sensor, começando por definir a engrenagem mais pequena disponível, de 12 dentes, para o potenciómetro. Pretende-se que três revoluções da engrenagem pequena, 36 dentes, correspondam a aproximadamente $90/360 = 1/4$ dos dentes da engrenagem maior, o que perfaz 144. Por não haver engrenagens tão grandes, foi escolhida a maior possível, de 120 dentes. O intervalo de valores percorrido pelo potenciómetro é dado por:

$$\Delta R = R_{\text{pot}} \cdot \frac{n_{\text{engrenagem maior}}}{144} \quad (3.72)$$

$$= 5K \cdot \frac{120}{144} \quad (3.73)$$

$$= 4,17 \text{ k}\Omega \quad (3.74)$$

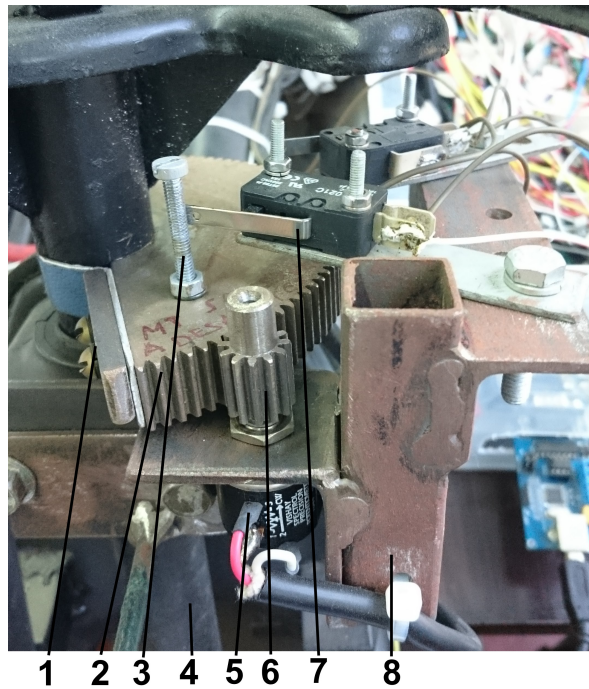


Figura 3.12: Montagem dos sensores da direção. Legenda:

1: fixador da engrenagem; 2: engrenagem solidária com a coluna da direção; 3: batente do sensor de fim de curso; 4: coluna da direção; 5: potenciômetro; 6: engrenagem do potenciômetro; 7: sensor de fim de curso; 8: suporte dos sensores.

Na prática, a gama de valores do potenciômetro é ligeiramente menor devido aos interruptores de fim de curso, discutidos adiante. Esta limitação do alcance do potenciômetro é benéfica e desejável, porque evita que este chegue ao fim do seu curso, danificando-o. Para além disso a gama de valores obtida com a engrenagem de 120 dentes é suficiente para obter leituras precisas. Ambas as engrenagens estão fixas de forma pouco firme, pelo que a montagem pode descalibrar ficar descalibrada em caso de manipulação.

As ligações elétricas do sistema da direção são apresentadas no esquema 6 - Direção do apêndice B. A alimentação para o motor provem de uma ligação a 12 V com um fusível de 6,3 A e passa por um contactor de corte geral, com uma resistência de pré-carga. À semelhança do circuito sugerido pelo fabricante do circuito de tração, incluiu-se aqui um circuito simples de pré-carga dos condensadores do conversor, de modo a alisar o pico de corrente aquando da ligação do circuito e assim aumentar a sua vida útil. A placa do conversor tem dois condensadores de capacidade elevada ligados da alimentação à massa em paralelo, C1 e C8, com um capacidade conjunta de 1200 μF . Após a ligação do contactor, o circuito dos condensadores pode ser aproximado a um circuito RC ligado a uma fonte de tensão, onde ocorre um pico de corrente dado por:

$$I_{t=0+} = \frac{V}{R} \quad (3.75)$$

Como se sabe, a constante de tempo de um circuito RC é dada por:

$$\tau = R \cdot C \quad (3.76)$$

De (3.75) e (3.76) se conclui que a resistência entre a bateria e os condensadores limita a sua corrente e tempo de carga. No caso de não existir resistência de pré-carga, a resistência é a resistência interna da bateria, 7,8 m Ω .

Substituindo em (3.75),

$$I_{t=0+} = \frac{12}{7.8m} \quad (3.77)$$

$$= 1,54 \text{ kA} \quad (3.78)$$

E em (3.76),

$$\tau = R_{BAT} \cdot (C_1 + C_8) \quad (3.79)$$

$$\approx 7.8m \cdot 1200u \quad (3.80)$$

$$= 9,36 \mu\text{s} \quad (3.81)$$

Ambos os valores são bastante elevados e provocam o desgaste prematuro dos componentes, podendo provocar a abertura do fusível sem que tenha havido algum curto-circuito. Por isso projetou-se uma resistência de pré-carga de potência a dissipar inferior a 5 W, facilmente disponível no mercado. A energia acumulada nos condensadores é de:

$$E = C \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3.82)$$

$$= 1200u \cdot \frac{12^2}{2} \quad (3.83)$$

$$= 86,4 \text{ mJ} \quad (3.84)$$

Para aproximar a potência necessária da resistência de pré-carga, assume-se que esta tem que dissipar toda a energia durante uma contante de tempo, de onde se pode obter o valor da resistência a usar:

$$P = \frac{E}{T} \quad (3.85)$$

$$= \frac{E}{R \cdot C} \equiv \quad (3.86)$$

$$R = \frac{E}{P \cdot C} \quad (3.87)$$

$$= \frac{86.4m}{5 \cdot 1200u} \quad (3.88)$$

$$= 14,4 \Omega \quad (3.89)$$

Substituindo em (3.75),

$$I_{t=0+} = \frac{12}{14.4} \quad (3.90)$$

$$= 0,83 \text{ A} \quad (3.91)$$

E em (3.76),

$$\tau = 14.4 \cdot 1200u \quad (3.92)$$

$$= 17,28 \text{ ms} \quad (3.93)$$

Conclui-se então que a resistência de pré-carga de 15 Ω e 5 W. No entanto, como não foram encontradas resistências aproximadas a essa, usou-se uma de 1,5 k Ω de 5 W. Para esta resistência, a corrente máxima de carga dos condensadores é de 8 mA, e a constante de tempo de 1,8 s, o que se traduz numa potência dissipada na resistência de 48 mW, bem dentro dos limites do dispositivo.

De forma a proteger o *hardware*, foram instalados dois interruptores de fim de curso junto ao sensor de posição, que fazem uso de batentes cravados na engrenagem maior, como mostra a figura 3.12. Os batentes e interruptores foram calibrados de modo a dispararem ligeiramente antes da direção chegar ao seu limite. Os interruptores produzem dois sinais complementares, sendo o normalmente fechado usado para cortar o contactor e o normalmente aberto para ativar o circuito de segurança (ver 3.7.1).

No caso de acontecer um erro, só é possível alimentar o motor para poder recuperá-lo através de um botão de pressão que coneta a alimentação à bobina do contactor, evitando a verificação de segurança feita pelos interruptores de fim de curso.

3.6.1 Controlo da direção

O controlo da posição da direção assemelha-se a uma aplicação típica de um controlador PID, em que o microcontrolador corre um programa que, através dos dados obtidos no sensor de posição, atua o motor em função do erro. No entanto, o problema do controlo foi severamente agravado durante a sua construção, pela zona morta (ver 3.6) e pelas limitações da correia. A zona morta apenas afeta o comportamento do sistema nas mudanças de direção, e pode ser integrada no projeto do controlador como uma dificuldade acrescida. Já a limitação do binário impede o desenho efetivo de um bom controlador e não pode ser ignorada. Perante este constrangimento optou-se por avançar com a prova do conceito, relegar a construção de um bom controlador para uma iteração posterior, e mitigar o problema temporariamente com o projeto de um controlador em banco de ensaio (com as rodas no ar) e limitando a operação da direção a quando a moto estiver em movimento.

Como demonstrado pelas medições em 3.6, a relação entre a posição da direção e o binário aplicado na coluna não é linear, mas, para efeitos de estimação dos parâmetros do controlador, considera-se como tal, de modo a poder usar as simplificações de cálculo para os Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo (SLITs). Para implementar um controlo em posição é necessário integrar no tempo a velocidade, pelo que se dispensa a parte integral do controlador, já que esta é inerente ao sistema sob controlo. Assim, o controlador a desenhar para este sistema é um Proporcional Derivativo (PD).

O projeto do controlador tipicamente requer um modelo matemático do sistema a controlar, e neste projeto tentou-se inicialmente modelar matematicamente o sistema, mas a dificuldade em calcular o momento de inércia do atuador completo e as variações do coeficiente de atrito previstas durante a operação tornam pouco exequível esta abordagem. Por isso partiu-se para o desenho de um controlador através do método de Ziegler-Nichols, mais simples, e mais fácil de realizar neste caso. Optou-se por realizar o método da curva de reação para obter os parâmetros de um controlador PID, e transformá-lo depois num PD.

O microcontrolador escolhido tem a capacidade predefinida de implementar até dois controladores PID digitais, em simultâneo, pelas interfaces para os conversores OSMC. A rotina de controlo por PID incorpora um gerador de trajetórias trapezoidal que, a partir da referência e da posição corrente, fornece a cada período de amostragem um ponto intermédio em direção ao objetivo final como referência para o controlador, que assim trabalha com erros mais pequenos e consegue desse modo uma obter uma dinâmica de movimento mais suave. O parâmetros do controlador são guardados em variáveis de 16 bit e, de modo a obter números fracionários, divididos por 1024 durante o cálculo do erro do controlador, o que se traduz numa gama de valores de $1/1024$ a $2^6 = 64$.

O período de amostragem pode variar até 255 ms (é guardado numa variável de 8 bit). Outro parâmetro importante do controlador digital é o ciclo de funcionamento mínimo do motor, necessário para vencer a inércia do sistema, que foi determinado experimentalmente com as rodas no ar. Determinou-se um valor mínimo de 16 %.

Com o motor em vazio (desacoplado da direção) foi aplicado o método de Ziegler-Nichols para obter um controlador para o sistema, mas este não apresentou resultados satisfatórios, pois o modelo ensaiado não representa a totalidade do sistema, apenas uma parte, pelo que o controlador pré-programado foi afinado manualmente e usado no programa, devido à sua razoável resposta ao escalão. Os parâmetros do controlador embarcado são:

$$K_p = 0x260 = \frac{608}{1024} = 0.594 \quad (3.94)$$

$$K_d = 0x600 = \frac{1536}{1024} = 1.5 \quad (3.95)$$

$$(3.96)$$

3.7 Sistema eletrónico desenvolvido

3.7.1 Mecanismo de segurança

Devido aos requisitos de segurança apertados deste projeto foi desenhado um mecanismo de corte da alimentação dos motores em caso de emergência. Embora não essencial à prova do conceito, a sua inclusão foi considerada indispensável, já que nesta fase o sistema está pouco refinado, e portanto sujeito à ocorrência de incidentes frequentes e graves. De modo a prevenir embates, o mecanismo controla o corte da alimentação do motor da tração e, simultaneamente, o acionamento do travão. Este foi construído à base de relés, devido à sua tolerância a tensões transientes e à previsibilidade do seu comportamento em caso de falha, que permite projetar sistemas mais robustos e tolerantes a falhas. As ligações elétricas do mecanismo são apresentadas no esquema 5 – Segurança do apêndice B.

O circuito é ativado em situação de emergência por um de vários gatilhos: um interruptor de emergência, um dispositivo de homem morto, um comando do microcontrolador ou um erro detetado pelos sensores de fim de curso (da travagem e direção). O interruptor de emergência é um botão standardizado da indústria e está localizado na traseira do veículo, para acesso mais fácil em caso de perda do controlo. O dispositivo do homem morto consiste num fusível atado com uma gaita que deve estar preso ao corpo do utilizador, caso esteja junto da moto. No caso do veículo perder o controlo e fugir, o fusível salta e o circuito dispara. O gatilho do microcontrolador serve para o programa de controlo ter poder sobre o mecanismo, e por fim os sensores de fim de curso disparam o circuito caso o atuador que monitorizam ultrapasse os limites normais de operação.

O mecanismo consiste em dois circuitos acionados de forma complementar, através de um dos gatilhos: um circuito de corte da alimentação do controlador da tração através do seu contactor, que está normalmente fechado, e outro de controlo do acionamento da travagem do travão elétrico, que está normalmente aberto. Durante a operação normal um circuito fecha a malha de alimentação do contactor e o outro abre a de alimentação da travagem. Quando ocorre uma situação de emergência e algum dos gatilhos é acionado, o respetivo relé comuta ambos os circuitos e o contactor da direção corta e o travão trava e, devido ao gatilho do fim de curso da travagem, o mecanismo permanece num estado de emergência enquanto o travão não estiver totalmente destravado. Como

o travão é alimentado diretamente da bateria, quando se desliga o interruptor de corte geral o dispositivo do homem morto deixa de ser alimentado e o travão é acionado, garantindo que o veículo encerra sempre num estado seguro.

O corte da alimentação do motor da direção não foi incluída no circuito principal por acrescentar complexidade adicional e não representar um risco elevado para a segurança dos utilizadores. Ainda assim, o contactor da direção também é cortado pelo gatilho dos seus sensores de fim de curso.

No caso em que o programa do microcontrolador falhe, pode suceder que o comando de paragem que este envie não fique ativo tempo suficiente para travar completamente o travão. Para colmatar essa possibilidade, o sinal foi passado por um circuito monoestável, responsável por garantir que o relé do gatilho é atuado tempo suficiente. De acordo com [21], o tempo do pulso gerado pelo circuito é dado por:

$$t = 1.1 \cdot R_{11} \cdot C_{10} \quad (3.97)$$

Para garantir que o travão trava completamente, o tempo do pulso projetado é superior ao tempo máximo de travagem, 5 s. A combinação de uma resistência de 220 kΩ com um condensador de 22 μF origina um tempo de pulso de:

$$t = 1.1 \cdot 220K \cdot 22\mu \quad (3.98)$$

$$= 5,324 \text{ s} \quad (3.99)$$

Que é suficiente para garantir a travagem completa.

O circuito monoestável é ativado no flanco descendente do sinal de entrada. Para inverter o gatilho para o flanco ascendente foi introduzido um inversor feito com um interruptor TJB na saturação, com uma resistência de *pull-down*. Definiu-se uma profundidade de saturação $\mu = 4$ e uma corrente de base $I_B = 0,18 \text{ mA}$ mínimos para o transistor, sendo a relação entre as correntes de base e saturação dada por:

$$I_B \geq \mu \cdot \frac{I_C}{\beta} \quad (3.100)$$

A resistência de polarização da base é dada por:

$$R_B = \frac{V_{\text{Auto parar}} - V_{BE}}{I_B} \quad (3.101)$$

$$= \frac{5 - 07}{0.18m} \quad (3.102)$$

$$= 23,89 \text{ k}\Omega \quad (3.103)$$

A partir do valor de β para o transistor BC547 usado [17] e de (3.100), é possível calcular a corrente do coletor pretendida,

$$I_C \geq \frac{I_B \cdot \beta}{\mu} \quad (3.104)$$

$$\geq \frac{0.18m \cdot 110}{4} \quad (3.105)$$

$$\geq 4,95 \text{ mA} \quad (3.106)$$

De onde se pode dimensionar a resistência de coletor do transistor,

$$R_C = \frac{V_{VCC\ 12V} - V_{CE}}{I_C} \quad (3.107)$$

$$= \frac{12 - 0,2}{4,95m} \quad (3.108)$$

$$= 2,42\ k\Omega \quad (3.109)$$

A partir de (3.103) e (3.109), escolheram-se resistências de 27 k Ω e 2,7 k Ω para polarizar o transistor, respetivamente.

3.7.2 Integração dos sistemas

Para agrupar as capacidades individuais dos vários subsistemas do módulo num conjunto coerente de funcionalidades foram desenhados e construídos vários circuitos de interface, aqui tratados.

O processamento eletrónico do ROVIM foi agrupado em várias placas eletrónicas e painéis de instrumentação, que foram, salvo raras exceções, reunidos dentro de uma caixa paralelepipedica fixada à plataforma superior de bombordo, arrumando e protegendo assim o seu interior de interferência involuntária. Na figura 3.13 é mostrado o conteúdo embarcado na caixa: um painel de instrumentos e uma placa elétrica artesanal fixos nas laterais, e a placa do microcontrolador, a do conversor de potência do motor da direção, e outras três placas protótipo fixadas em placas de acrílico assentes no fundo, para além das ligações aos vários periféricos. As placas protótipo e as ligações elétricas estão organizados de maneira confusa devido às sucessivas adições e modificações efetuadas durante o desenrolar do projeto. Contornar esta situação implicaria refazer várias vezes as ligações e as placas com materiais e técnicas de fabrico mais complexos, pelo que se aceitou esta situação durante a fase da prova do conceito.

Os circuitos eletrónicos realizados estão divididos em três partes, repartidos por quatro placas ilustradas na figura 3.14: mecanismos de corte de corrente e acionamento do travão na placa D, processamento eletrónico de sinal, originalmente na placa E e posteriormente expandido para a placa G, e corte de corrente da direção na placa F. As ligações entre as várias placas são apresentadas no circuito 9 - Ligações placas artesanais do apêndice B. Os painéis de instrumentação são ilustrados na 3.15, e estão agrupados em dois tipos: os que fixam elementos de interface que necessitam de estar numa posição específica e os restantes, que foram agrupados no painel fixado na caixa da eletrónica. As ligações dos painéis de instrumentação são apresentadas no esquema 3 - Instrumentação do apêndice B.

A placa do microcontrolador implementa o cérebro do módulo (ver 3.8) e o controlador da direção, e comanda a placa do conversor OSMC, entre outras. A placa D contém os relés K2 - K6 e as suas ligações e implementa parte do circuito de controlo do travão e do circuito de corte de corrente de segurança. As placas E e G incluem o condicionamento de sinal das entradas e saídas do microcontrolador, o monoestável, o circuito de comutação de modos de condução e o circuito do sensor de temperatura. Por fim, a placa F integra o fusível e o contactor da direção. O painel de instrumentação da caixa contém os interruptores de comando do controlador da tração, os botões de recuperação de erros, e os indicadores luminosos do estado do travão e do controlador da tração. Fora da caixa estão instalados o dispositivo do homem morto e o interruptor de emergência, o controlador da tração e o seu fusível e contactor e o acelerador de punho. Os restantes sensores e atuadores estão montados junto dos respetivos elementos.

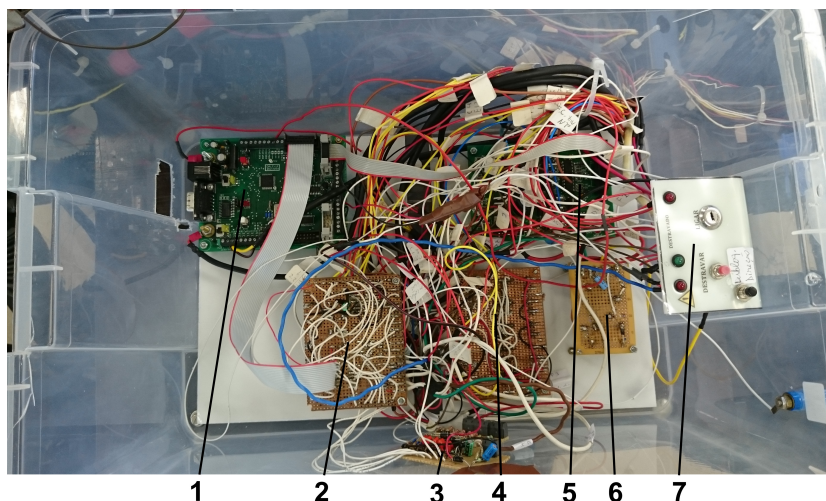


Figura 3.13: Caixa das ligações eletrônicas. Legenda:

1: placa do microcontrolador; 2: placa E; 3: placa G; 4: placa D; 5: placa OSMC; 6: placa F; 7: painel de instrumentação.

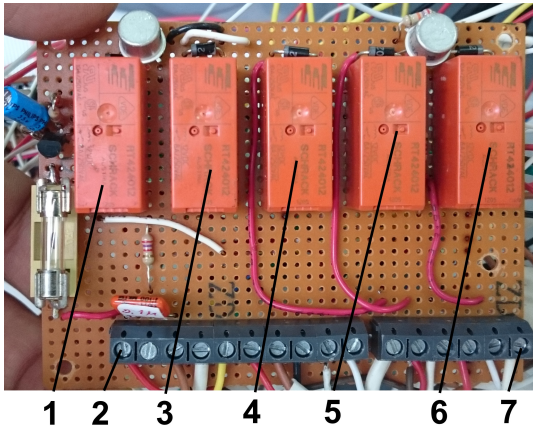
O corte geral do sistema é implementado por um interruptor de chave removível que controla a alimentação para a eletrônica de sinal. Um dos circuitos eletrônicos embarcados comuta entre os modos de condução: manual, através do *hardware* instalado na moto, e autônomo, operado através de uma interface de *software*. Os modos geram os sinais de comando do controlador da tração, que comanda a marcha do veículo, e atuam sobre a coluna da direção, que determina a posição angular das rodas da frente. A comutação entre manual e autônomo na direção é feita mecanicamente e já discutida em 3.6, pelo que se omite aqui. As ligações elétricas do circuito de comutação dos sinais do controlador é apresentado no esquema 7 - Comutação manual/autônomo.

A multiplexagem dos sinais de comando do controlador é feita com recurso a três relés comandados por um interruptor no painel de instrumentação, que comutam entre os sinais gerados pela instrumentação dos painéis de controlo (usados em modo manual) e os sinais gerados pelo microcontrolador (usados em modo autônomo). O detalhe da funcionalidade de cada sinal é explicado em [10].

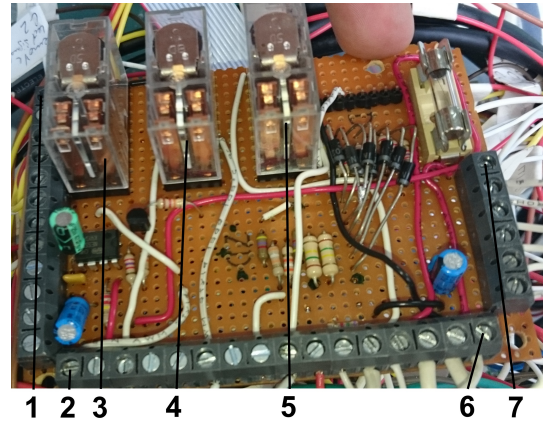
Houve uma preocupação especial em garantir uma boa ligação à massa do microcontrolador, através de um cabo de calibre médio ligado diretamente ao ponto de massa, para evitar que transientes resultantes do acionamento dos motores e comutação dos relés originem falhas no microcontrolador. Adicionalmente, os sinais de entrada para o microcontrolador foram alvo de processamento eletrónico, para garantir a fiabilidade dos valores lidos e a proteção dos circuitos eletrónicos da placa.

A maior parte dos sinais lidos pelo programa de controlo provêm de interruptores manuais e eletromecânicos (ver 3.1), alimentados a 12 V, que ressaltam durante a comutação, originando ruído e falsos positivos nas leituras do microcontrolador se não forem processados, como é ilustrado no gráfico da figura 3.16, que mostra a tensão num interruptor mecânico durante a sua comutação e em que são visíveis oscilações na tensão resultantes de ressaltos das partes mecânicas.

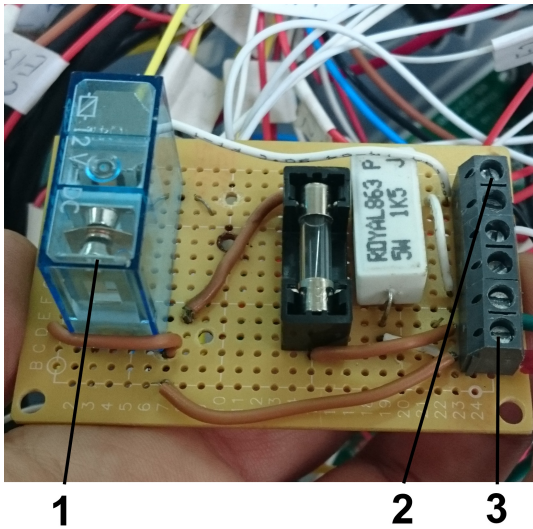
No esquema elétrico 8 - Microcontrolador do apêndice B são apresentados os circuitos de condicionamento dos sinais de entrada da placa do microcontrolador. Estes circuitos têm 3 funções: converter tensão, filtrar e limitar a corrente e tensão à entrada dos circuitos integrados. Para converter a tensão e limitar a corrente foram usados divisores resistivos de 74 k Ω e 47 k Ω à massa, que limitam a corrente a aproximadamente 0,1 mA e a tensão no ponto intermédio a 5,4 k Ω (no pior caso para a bateria carregada a 14 V), que está dentro dos limites



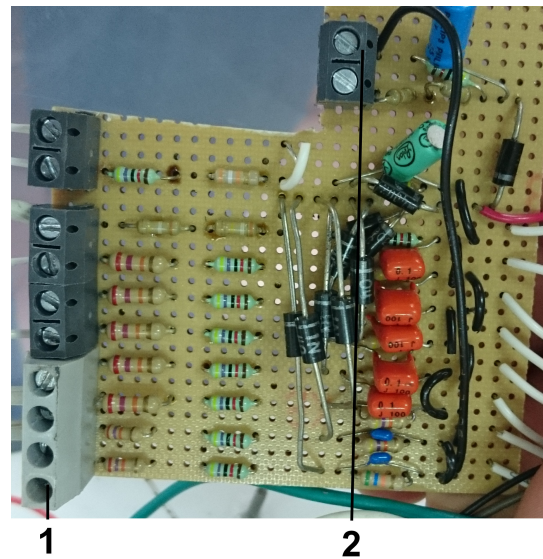
(a) Placa D. Legenda:
 1: relé K2; 2: pino 16; 3: relé K3; 4: relé K4; 5: relé K5;
 6: relé K6; 7: pino 1.



(b) Placa E. Legenda:
 1: pino 34; 2: pino 22; 3: relé K10; 4: relé K9; 5: relé K8;
 6: pino 7; 7: pino 1.

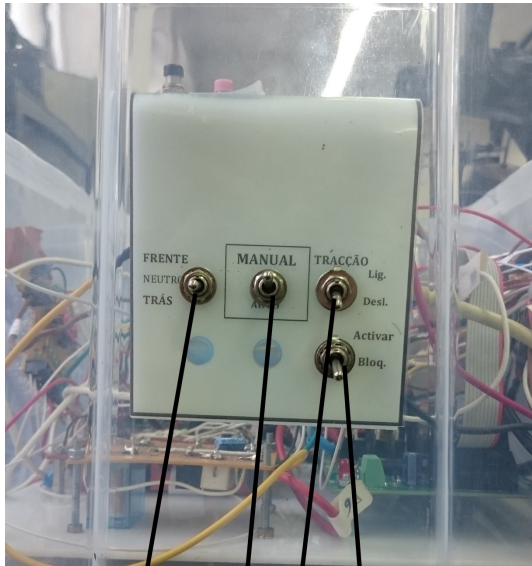


(c) Placa F. Legenda:
 1: relé K7; 2: pino 1; 3: pino 6.



(d) Placa G. Legenda:
 1: pino 1; 2: pino 12.

Figura 3.14: Placas protótipo.

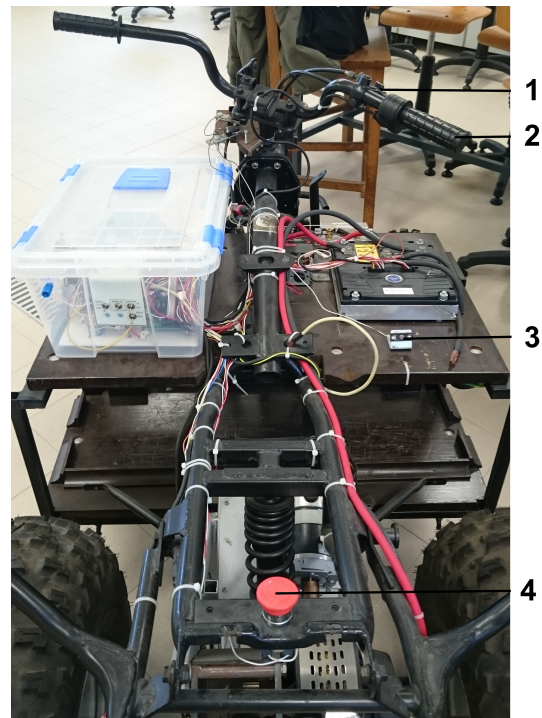


1 2 3 4

(a) Parte vertical do painel da caixa de eletrônica.

Legenda (componente):

1: seletor da marcha (Int4); 2: seletor do modo de condução (Int3); 3: interruptor geral da tração (Int2); 4: ativador da tração (Int5).



(b) Instrumentação exterior. Legenda:

1: manete do travão; 2: acelerador de punho (Pot1); 3: dispositivo do homem morto; 4: interruptor de emergência(Int6).



1 2 3 4 5 6

(c) Parte horizontal do painel da caixa de eletrônica.

Legenda (componente):

1: desbloqueador da direção (Btn2); 2: indicador de travagem (D3); 3: botão de destravar (Btn1); 4: indicador de destravagem (D2); 5: interruptor de chave (Int1); 6: indicador de erro na tração (D1).

Figura 3.15: Painéis de instrumentação. A legenda indica entre parêntesis a identificação do componente no apêndice B.

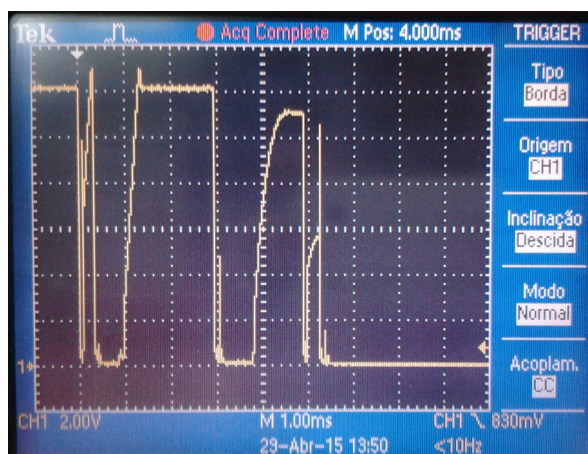


Figura 3.16: Gráfico da tensão aos terminais de um interruptor de alavanca em função do tempo, durante a sua abertura.

do circuito integrado onde ligam as entradas [22]. Para garantir que os circuitos integrados não sofrem picos de tensão foi introduzido um díodo supressor à alimentação. No entanto este díodo tem eficácia limitada já que se trata de um retificador genérico (nesta fase do projeto não houve acesso a outros componentes mais adequados) com uma tensão de condução superior à tensão máxima suportada pelo circuito. Por fim, para eliminar os efeitos dos ressaltos nos sinais lidos pelo microcontrolador foram introduzidos condensadores à massa, realizando um filtro passa-baixo com o divisor resistivo. Em regime transiente as resistências formam um paralelo de valor:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.110)$$

$$= \frac{74 \cdot 47}{74 + 47} \quad (3.111)$$

$$= 28,74 \text{ k}\Omega \quad (3.112)$$

As entradas para o microcontrolador são de sinais lentos, pelo que definiu uma frequência de corte para os filtros próxima de 50 Hz. A partir da fórmula aproximada de cálculo da frequência de corte de um filtro RC,

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (3.113)$$

$$(3.114)$$

É possível determinar o valor do condensador a usar:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_c} \quad (3.115)$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 28,74 \text{ K} \cdot 50} \quad (3.116)$$

$$= 0,11 \mu\text{F} \quad (3.117)$$

De (3.117) se conclui pela escolha de um condensador de 0,1 μF . O resultado final destes circuitos é mostrado no gráfico da figura 3.17, em que o sinal amostrado resalta três vezes durante a comutação, mas os saltos chegam filtrados à entrada do circuito integrado.

Para amostrar a tensão na bateria B6 foi necessário alterar o divisor resistivo devido ao sinal de entrada ser de 80 V neste caso, pelo que foram instaladas duas resistências de 40 k Ω e uma de 4,7 k Ω à massa para obter o mesmo resultado final.

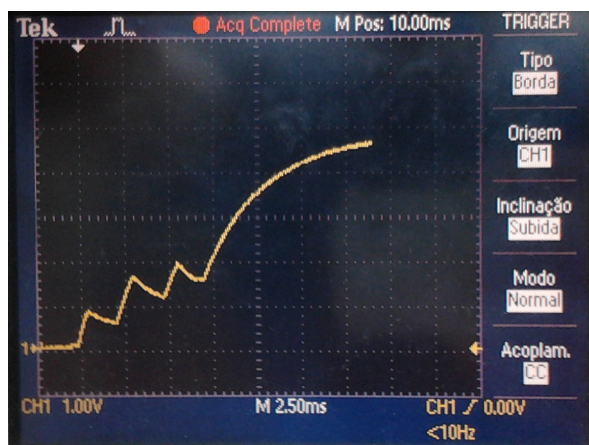
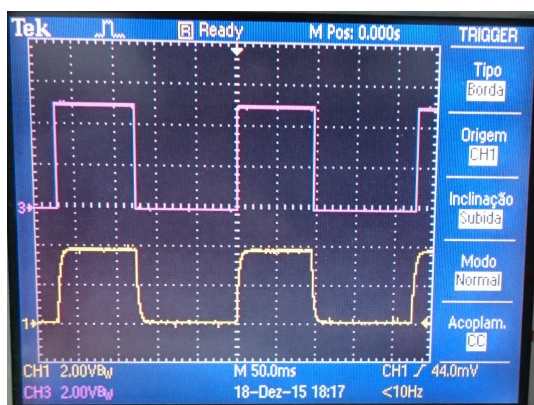
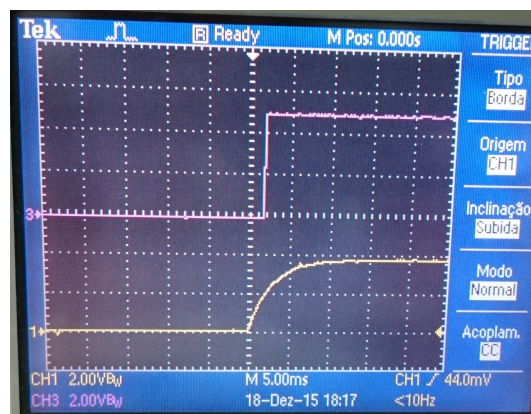


Figura 3.17: Gráfico da tensão amostrada num interruptor de alavanca durante a comutação.

Após testes no programa de controlo, verificou-se que a interrupção de contagem de impulsos (ver 3.8) não estava a funcionar corretamente com devido a problemas no sinal do sensor, por isso este foi passado por um corretor da forma de onda, de modo a aproximá-la o mais possível da do gerador, o que eliminou o problema com a interrupção. Os gráficos da figura 3.18 mostram o efeito do circuito corretor no sinal. No gráfico a) se verifica que a onda ficou com uma forma muito mais quadrada após o processamento adicional e no gráfico b) pode-se estimar o atraso introduzido pelo circuito, cerca de 2 ms, que não é relevante para as velocidades a que o sensor opera. O corretor de onda consiste num comparador simples em montagem inversora seguido de um inversor feito com um transistor TJB PNP. Comparando em retrospectiva os gráficos das figuras 3.8 e 3.18 observa-se que o condensador C20 introduz um atraso nefasto no sinal que provavelmente está na causa do problema inicial com as interrupções.



(a) Forma de onda completa.



(b) Pormenor do flanco ascendente.

Figura 3.18: Gráfico da tensão à saída do sensor de velocidade e do circuito corretor de onda em função do tempo, para uma velocidade de 0,74 km/h. Sinal de saída do sensor de velocidade no canal 1 e sinal de saída do corretor de onda no canal 3.

Para simular o acelerador potenciométrico que o controlador da tração espera à entrada dos pinos A8 e A9, os respetivos sinais de saída do microcontrolador foram modulados em largura de impulso e passados por um filtro passa-baixo, que efetivamente os converte para analógico. O sinal *Pulse Width Modulation (PWM)* gerado, discutido em mais detalhe em 3.8, tem uma frequência de 10 Hz, pelo que se projetou um filtro com uma frequência de corte uma ordem de grandeza abaixo. Seleccionando uma resistência de 4,7 k Ω por ter um

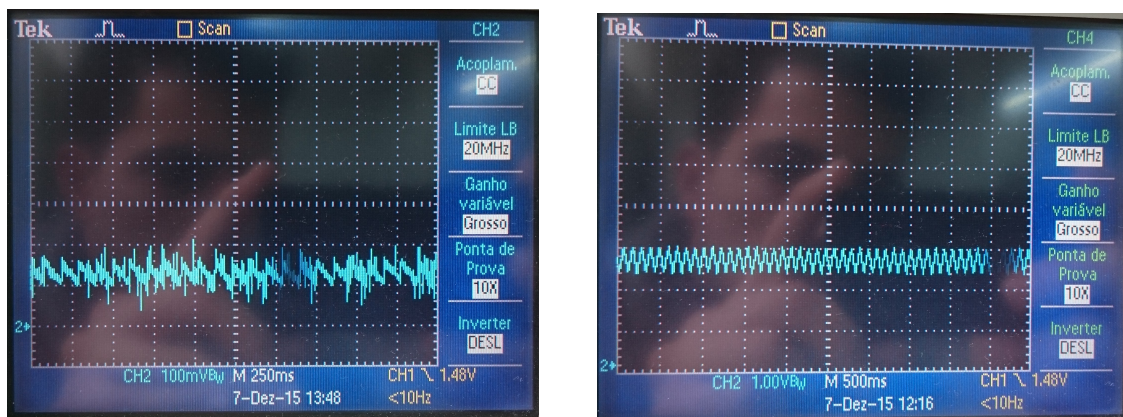
valor idêntico ao recomendado pelo fabricante do controlador [10], foi dimensionado um condensador adequado a partir de (3.113):

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_c} \quad (3.118)$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 4.7k \cdot 1} \quad (3.119)$$

$$= 33,8 \mu\text{F} \quad (3.120)$$

Devido à indisponibilidade de condensadores de 33 μF disponíveis, usaram-se de 47 μF , passando a frequência de corte do filtro para 0,72 Hz. O teste do circuito é mostrado nos gráficos da figura 3.19. O sinal filtrado apresenta uma oscilação considerável (no pior caso, cerca de 30 % da amplitude do sinal), mas que não se reflete na aceleração do motor, pois o controlador está configurado para variar a aceleração de forma bastante lenta.



(a) Ciclo de utilização de 2 %.

(b) Ciclo de utilização de 50 %.

Figura 3.19: Gráficos da tensão em função do tempo à saída do filtro conversor digital-analógico.

3.8 Programa de controlo da T2D

O programa de controlo da T2D constitui o "cérebro" do sistema, que controla os vários órgãos do veículo e onde a inteligência mais avançada se concentra. O programa, cujo código é detalhado no apêndice A, implementa os comandos que exploram as várias funcionalidades do veículo, monitoriza o estado do veículo e serve de interface com o módulo superior. Nesta iteração do protótipo optou-se por impedir o programa de destravar o veículo, limitando desta forma a autonomia da condução, mas garantindo um maior grau de confiança no sistema.

O programa corre num microcontrolador Microchip PIC 18F6722 integrado na placa Da1f 1-F, que contém as ligações aos periféricos do chip e vem pré-programada com firmware desenhado para controlo de motores e adaptado para trabalhar com a placa OSMC, e que pode ser modificado. A placa Da1f permite portanto implementar de maneira simples o controlo da direção e possui as capacidades necessárias para servir de controlador geral do módulo. A placa fornece também dois expansores de *General Purpose Input/Outputs* (GPIOs) de funcionalidade programável e várias interfaces de controlo, das quais apenas a por emulador de terminal série e por *Inter-Integrated Circuit* (I²C) são utilizadas neste projeto.

3.8.1 Arquitetura do software

Com base nas necessidades do programa de controlo da T2D, o *firmware* original foi estendido em funcionalidade e foram roteados pelo microcontrolador os sinais listados na tabela 3.1. Para além da funcionalidade original, o programa de controlo necessita de poder enviar sinais para o controlador da tração, disparar o mecanismo de segurança e ter a noção do estado dos vários componentes, para poder tomar decisões de controlo.

Pino	Nome	Direção	Função
J5 1	Desacelerador	Saída	Controla a travagem regenerativa ^{a]}
J5 2	Fim de curso de destravagem	Entrada	Deteta quando o travão destrava totalmente
J5 3	Acelerador	Saída	Controla a aceleração da tração ^{a]}
J5 4	Tensão B+	Entrada	Deteta quando o controlador da tração está a ser alimentado
J5 5	Ativar tração	Saída	Controla o interruptor "Ativar tração" ^{a]}
J5 6	Fim de curso de travagem	Entrada	Deteta quando o travão trava totalmente
J5 7	Destravagem	Saída	Destrava o travão ^{b]}
J5 8	Fim de curso da direção	Entrada	Deteta quando a direção ultrapassa o seu curso esperado
J5 9	Marcha trás	Saída	Seleciona a marcha trás no veículo ^{a]}
J5 10	Detetor de destravagem	Entrada	Deteta quando o utilizador está a destravar
J5 11	Marcha frente	Saída	Seleciona a marcha frente no veículo ^{a]}
J5 12	Modo manual	Entrada	Deteta quando o modo manual de condução é selecionado
J5 13	Travagem	Saída	Trava o travão
J5 14	Condição de emergência	Entrada	Deteta quando um dos gatilhos do mecanismo de segurança é acionado
J5 15	Travão de mão	Saída	Controla a imobilização do veículo ^{a]}
AN3	Sensor de posição	Entrada	Mede o ângulo da direção.
A1	Sensor de velocidade	Entrada	Mede a velocidade do veículo

^a Quando em modo autónomo de condução.

^b Atualmente está desligado.

Tabela 3.1: Sinais de entrada e saída do microcontrolador.

O *firmware* é extremamente veloz e tem pouca pegada de memória, e consiste num programa sem sistema operativo, em que as tarefas são despoletadas a partir das interrupções geradas por sinais de entrada ou temporizadores. As interrupções mais importantes para a extensão da funcionalidade são as geradas aquando da recepção de um comando pela porta série ou pela interface I²C. O comando recebido é depois enviado para a respetiva (consoante a interface) função despachadora, que foi expandida (a interface série apenas) para aceitar comandos adicionais. Outro recurso importante do *firmware* é o "relógio" do programa: um temporizador de 1 ms que escalona grande parte das tarefas periódicas, e onde foram instaladas duas tarefas adicionais: uma de

refrescamento dos sinais de PWM para controlar a tração e outra de monitorização do estado geral do sistema.

O *watchdog* do microcontrolador foi ativado para esta aplicação com um período de 2 s, e permite ativar indiretamente o gatilho do mecanismo de segurança, através da sequência de comandos no arranque, que ordena a travagem assim que possível.

3.8.2 Monitorização do sistema e *lockdown*

A monitorização do sistema é uma das tarefas do cérebro da T2D. Esta tarefa é responsável por garantir a coerência entre o estado do *software* e do *hardware*, detetar e processar erros e avisos e executar ações pendentes. A tabela 3.2 lista as ações tomadas por esta tarefa em resposta a modificações exteriores no estado do *hardware* ou a erros detetados. Devido à natureza não concorrential da arquitetura do programa, as tarefas que não possam ser executadas sequencialmente são escalonadas no tempo, e completadas durante a execução desta tarefa. Estas consistem na reversão da marcha, em que é necessário esperar que o veículo pare antes de voltar a acelerá-lo e na saída do estado de *lockdown*, após a destravagem do travão por parte do utilizador.

Origem	Ações tomadas	Motivo
Velocidade demasiado elevada	Vai para <i>lockdown</i>	Abrandar o veículo
Veículo imobilizado e em movimento ^a	Vai para <i>lockdown</i>	Estado incoerente
Condição de emergência ^b	Vai para <i>lockdown</i>	Coerência com o <i>hardware</i>
Travão a meio curso	Vai para <i>lockdown</i>	Garantir operação binária do travão
Fim de curso da direção ativado	Vai para <i>lockdown</i>	Coerência com o <i>hardware</i>
Tempo limite de destravagem expirado	Vai para <i>lockdown</i>	Precaução
Modo manual selecionado	Pára motores	Evitar arranques inesperados em modo autónomo

^a Esta condição só se aplica em modo autónomo de condução.

^b Um dos gatilhos do mecanismo de segurança foi acionado.

Tabela 3.2: Ações tomadas pela tarefa de monitorização em função dos parâmetros monitorizados.

No arranque do programa, quando este deteta um erro grave ou quando acontece uma paragem de emergência, o *software* do ROVIM entra em *lockdown*, um estado especial que oferece a maior segurança possível para o veículo. Em *lockdown* o travão está travado, os motores parados e todas as ações não necessárias à recuperação do erro são proibidas pelo programa, e é requerida a ação do utilizador para consumir a recuperação.

3.8.3 Condução e utilização

Para a condução, foi configurado o controlo do motor da direção através da funcionalidade pré-fornecida de controlo em malha fechada, com recurso a um sensor analógico de posição como mecanismo de retroação, o potenciómetro detalhado em 3.6. O sinal do sensor é convertido pelo *Analogue to Digital Converter (ADC)* da

placa num sinal digital de 8 bit de resolução e passado por um filtro digital, programado com uma frequência de corte de cerca de 25 Hz, e é expresso em *ticks* (a contagem de bit do conversor). Através do sensor, foi medido o curso da direção, de 0x13 ticks a 0xC8 ticks. A partir de (3.55) calcula-se a resolução do sensor:

$$Res = \frac{ticks}{\theta_{viragem}} \quad (3.121)$$

$$= \frac{0xC8 - 0x13}{88.84} \quad (3.122)$$

$$= 2,04 \text{ ticks}/^\circ \quad (3.123)$$

De forma a facilitar o uso da direção pelo utilizador, foi criada uma função de controlo em graus, que abstrai o utilizador da relação entre a leitura do sensor e o ângulo medido, bastando ao utilizador conhecer a forma de representação do ângulo da direção, ilustrada no esquema da figura 3.20. De modo a garantir que a direção não toca nos interruptores de fim de curso durante a operação normal, foi restringido por *software* o curso da direção em 2° de cada lado. A função é também responsável por alinhar a direção que, devido a um desvio entre o ponto intermédio do potenciómetro e o da direção, não é óbvio para o utilizador.

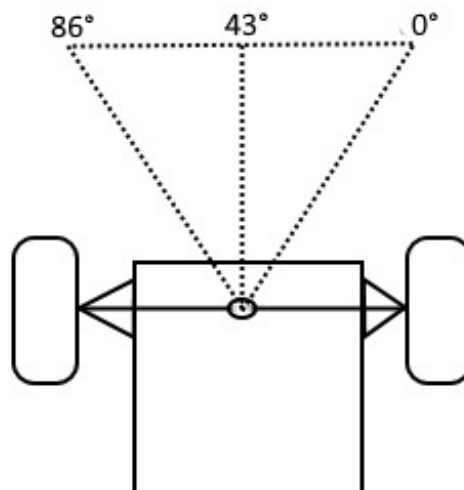


Figura 3.20: Forma de representação do ângulo da direção. Esquema da parte frontal do veículo, visto de cima. Os 0° correspondem à viragem total a estibordo.

Para o motor da tração, a funcionalidade foi agrupada em dois tipos de comandos: seleção da marcha e aceleração/desaceleração. O primeiro comando configura o sentido da marcha de uma das seguintes formas:

Frente seleciona a marcha frente;

Trás seleciona a marcha trás;

Ponto morto não seleciona nenhum sentido de marcha nem limita a movimentação do veículo;

Imobilização ativa o equivalente a um travão de mão implementado pelo controlador da tração, em que o veículo permanece imóvel e resiste ao movimento.

Para além do sentido da marcha, o comando recebe também a velocidade desejada (para a marcha frente ou marcha trás). A partir destes valores configura a marcha do controlador e executa, se necessário, um dos

comandos de aceleração/desaceleração. A velocidade é controlada em malha aberta, e limitada entre 0,5 km/h e 4,5 km/h, pois após o teste do sistema considerou-se que a velocidade do requisito R2 era demasiado elevada. Os comandos de aceleração e desaceleração controlam, respetivamente, o acelerador e a travagem regenerativa do controlador da tração, e são gerados pela tarefa de geração do PWM, e alisados à saída da placa do microcontrolador por um filtro passa baixo. Existe também um comando específico de paragem controlada dos motores, disponível para o da tração e da direção.

Para ler o sinal do sensor de velocidade, o *firmware* original foi alterado, pois só contemplava montagens de sensores analógicos ou digitais em quadratura. Originalmente os sinais em quadratura de um codificador são ligados a uma porta XOR, gerando um interrupção em cada transição. O sinal em quadratura foi substituído por uma ligação à massa, cortando em metade o número de interrupções geradas, pelo que a interrupção de contagem teve que ser calibrada. Devido à dificuldade em obter leituras exatas do sensor de velocidade a velocidades muito baixas (inerente à tecnologia usada), e de modo a garantir que o veículo se move suficientemente depressa para que a direção consiga mover as rodas, foi definida uma velocidade mínima para o veículo, de 0,5 km/h.

De forma a facilitar o processo de depuração foram criados um comando de acesso aos GPIOs e um de controlo de depuração em tempo real, e foi adicionada verbosidade à execução do programa, enviada através da porta série e controlada através de quatro níveis de importância que podem ser ligados e desligados pelo utilizador:

FATAL ERROR corresponde a uma mensagem de erro irrecuperável. Esta mensagem não pode ser bloqueada;

ERROR corresponde a uma mensagem de erro recuperável;

WARNING corresponde a uma mensagem de aviso;

STATUS corresponde a uma mensagem informativa sobre o estado do programa;

DEBUG corresponde a uma mensagem usada para depuração e desenvolvimento, e não é importante para o utilizador.

4

Utilização da T2D

Este capítulo descreve a interface e as funcionalidades da T2D. O veículo é aqui apresentado em detalhe do ponto de vista da sua utilização, enquanto que o capítulo 3 se foca na sua concepção. Armado com este conhecimento, o leitor pode agora compreender a explicação das várias funcionalidades acessíveis ao utilizador.

Este capítulo pretende mostrar ao leitor o resultado final do protótipo. No seu final o leitor deve conseguir operar o veículo com confiança e em segurança.

4.1 Interface com o utilizador

A interface com o utilizador é composta por vários elementos de dois tipos: físicos e de *software*.

Os elementos físicos correspondem aos vários LEDs, interruptores, botões e outros controlos embarcados no veículo, que requerem interação presencial com um utilizador humano. Estes elementos foram já descritos no capítulo 3, mas são aqui agrupados e abordados de outra perspetiva. É possível controlar o veículo recorrendo apenas a este tipo de interface, ainda que com funcionalidades limitadas.

A interface de *software* consiste num conjunto de comandos que permitem, em conjunto com os elementos físicos, interagir e controlar todas as funcionalidades do sistema. A interface de *software* é acessível por dois canais distintos, um dos quais pode também ser utilizado por outros programas de computador.

4.1.1 Interface física

A tabela 4.1 apresenta os interruptores, botões e outros mecanismos físicos de controlo do ROVIM acessíveis pelo utilizador.

A tabela 4.2 apresenta os indicadores visuais presentes no ROVIM.

Id.	Fig.	Elemento	Tipo	Função	Estados
Int1	3.15	Chave	Interruptor de chave	Corte geral do sistema	Ligar Desligado
Int2	3.15	Tração	Seletor de 2 posições	Liga/desliga o controlador da tração	Lig. Desl.
Int3	3.15	M/A	Seletor de 2 posições	Seleciona condução manual ou automática	Manual Auto
Int4	3.15	F/N/T	Seletor de 3 posições	Seleciona a direção da marcha, quando em modo manual	Frente Neutro Trás
Int5	3.15	Ativar tração	Seletor de 2 posições	Sinaliza que o veículo está pronto a andar, quando em modo manual	Activar Bloq.
Btn1	3.15	Destruar	Botão de pressão	Ordena a destravagem do travão de emergência	Pressionado Solto
Btn2	3.15	Desbloquear direção	Botão de pressão	Permite mover a direção em <i>lockdown</i>	Pressionado Solto
Int6	3.15	Interruptor de emergência	Interruptor de emergência	Envia o ROVIM para <i>lockdown</i>	Pressionado Solto
	3.15	Dispositivo do homem morto	Dispositivo de homem morto	Envia o ROVIM para <i>lockdown</i>	Colocado Retirado
Pot1	3.15	Acelerador	Acelerador elétrico de punho	Controla a velocidade da tração, quando em modo manual	
	3.15	Travão de mão	<i>Manete</i> de travão	Trava as rodas da frente	
	3.11	Esticador da correia da direção	Rolo esticador de contacto	Permite desengatar a direção	Apertado Solto
	3.13	<i>Reset</i>	Botão de pressão	Reinicia o <i>software</i> do microcontrolador	Pressionado Solto
	3.13	BTN	Botão de pressão	Reinicia os parâmetros de origem do <i>software</i> , em conjunto com o botão <i>Reset</i>	Pressionado Solto
	3.13	ICD	Seletor de 2 posições	Configura o microcontrolador para arrancar a partir do <i>debugger</i>	ICD Oposto ICD
	3.13	PGM	Seletor de 2 posições	Configura o microcontrolador para ser programado por porta série	PGM Oposto PGM

Tabela 4.1: Elementos físicos de comando acessíveis pelo utilizador.

4.1.1.A Código de cores do estado do veículo

Os indicadores MTR1, MTR2, LED1, LED2 e LED3 estão programados para fornecerem uma indicação visual básica do estado do veículo. A tabela 4.3 apresenta os vários estados dos LEDs e o seu significado.

Id.	Fig.	Elemento	Cores	Indicação
D2	3.15	Indicador de destravagem	Verde	Indica que o travão está destravado, quando o botão de destravagem está pressionado
D3	3.15	Indicador de travagem	Vermelho	Indica que o travão não está destravado
D1	3.15	Erro na tração	Vermelho	Indica um erro no controlador da tração
		Erro na tração 2	Vermelho	Idêntico ao D1, mas encapsulado no controlador
	Luz de presença tração	Verde	Indica que o controlador da tração está ligado	
		Verde	Indica que o controlador da direção está ligado	
	3.13	Luz de presença controlador	Verde	Indica que o microcontrolador está ligado
	3.13	PGM	Amarelo	Indica que o microcontrolador está em modo de programação
	3.13	ICD	Amarelo	Indica que o microcontrolador está em modo de depuração
	3.13	MTR1	Verde	Indica a direção e intensidade da alimentação do motor da tração
			Vermelho	
	3.13	MTR2	Verde	Indica a direção e intensidade da alimentação do motor da direção
Vermelho				
3.13	LED1	Verde	Indica o estado do motor da tração	
3.13	LED2	Verde	Indica o estado do motor da direção	
3.13	LED3	Vermelho	Indica a existência de erros no sistema	
		Indicador de marcha	Vermelho	Indica que o veículo está em movimento

Tabela 4.2: Indicadores visuais (LEDs) do ROVIM.

LED	Estado	Significado
LED1 ^a	Ligado	Motor da tração ligado e sem erros
	Desligado	Motor da tração não está pronto a andar
MTR1 ^a	Desligado	Motor da tração não está a ser acelerado
	Verde	Motor da tração está a acelerar
	Vermelho	Motor da tração está a desacelerar
LED2 ^{ab}	Ligado	Motor da direção está estagnado
	Pisca rápido	Motor da direção controlado em velocidade
	Pisca lento	Motor da direção controlado em posição
	Desligado	Motor da direção está desligado
MTR2 ^{ab}	Desligado	Motor da direção está desligado
	Verde	Motor está a mover a direção para bombordo
	Vermelho	Motor está a mover a direção para estibordo
LED3	Ligado	Bateria fraca
	Pisca rápido	ROVIM em <i>lockdown</i>
	Desligado	Não há erros no sistema

^a A informação dada pelo LED só é válida em modo autónomo.

^b A intensidade do brilho do LED depende do ciclo de utilização do motor.

Tabela 4.3: Código visual de cores dos LEDs do μC .

4.1.1.B Programador do controlador da tração

O controlador da tração possui um dispositivo de programação e diagnóstico removível. A sua utilização é descrita em [10].

Este dispositivo é apenas usado na fase de desenvolvimento e em funções avançadas de depuração e é referido para assegurar a integralidade da informação, mas não é usado durante a utilização normal do ROVIM.

4.1.2 Interface série

A interface série é uma de duas interfaces disponibilizadas pelo programa de controlo da T2D, em conjunto com a interface I²C.

A interface série do ROVIM é uma extensão da interface *Terminal Emulator (TE)* do *firmware* dalf para servir os objetivos desta plataforma. A principal diferença de concepção entre as duas é que a extensão do ROVIM foi pensada para transmitir muito mais informação ao utilizador do que a versão original. A interface original dalf foi, na medida do possível, inalterada. A sua documentação está disponível no manual do utilizador do dalf [23], secção 10, e será aqui apenas complementada para a extensão do ROVIM.

A interface série é a interface preferencial para desenvolvimento e depuração do módulo e para condução do ROVIM por humanos. Ao contrário da interface I²C, permite comunicar assincronamente com o utilizador e pode ser usada para controlar a T2D independentemente dos outros módulos do ROVIM, sendo que de momento, apenas esta interface disponibiliza todas as funcionalidades do programa. Esta é estabelecida através de uma

ligação RS232 em modo *American Standard Code for Information Interchange (ASCII)*, configurada para 57600 baud/s, 8 bit, sem paridade, e com 1 bit de paragem, que pode ser usada com recurso a uma aplicação de emulador de terminal num *Personal Computer (PC)*. Os parâmetros estão formatados em formato hexadecimal.

4.1.2.A Sintaxe dos comandos ROVIM T2D

Cada comando original da interface TE do *firmware* dalf é invocado através de uma sequência de caracteres formatada, em que o primeiro *byte* é o identificador, que consiste numa letra do alfabeto, seguido depois pelos parâmetros do comando, em número variável. Nesta abordagem apenas estão disponíveis 26 comandos base, dos quais apenas 2 não são já usados (G e H).

A interface do ROVIM usa o comando da letra G para estender a funcionalidade. Cada comando da extensão da interface é diferenciado dos comandos originais pelo prefixo G, seguido de um identificador numeral único. O comando da letra H é usado para mostrar uma mensagem de ajuda.

A tabela 4.4 apresenta resumidamente os comandos específicos da extensão da interface para o ROVIM, assim como os comandos da interface original dalf mais úteis para esta aplicação, servindo como listagem rápida dos comandos disponíveis.

Comando	Descrição	Sintaxe
G10	Ir para <i>lockdown</i>	G10
G11	Sair de <i>lockdown</i>	G11
G12	Parar motores, sem perder a sua configuração	G12 <mtr#>
G13	Controlar os GPIOs	G13 <opção><gpio#>
G14	Acelerar	G14 <%>
G15	Desacelerar	G15 <%>
G16	Definir marcha	G16 <dir><vel>
G17	Virar	G17 <ang>
G18	Controlo de depuração	G18 <op><val1><val2><val3>
H	Ajuda	H
O	Parar motores, perdendo a sua configuração	O <mtr#>
X	Comandar motor em velocidade (malha aberta)	X <mtr#> <dir><%>

Tabela 4.4: Resumo dos comandos úteis para o ROVIM.

Identificação dos motores

Alguns comandos da interface série exigem a identificação do motor sobre o qual atuar. Existem dois motores registados no *software*: o motor da tração e o motor da direção. O motor da tração é identificado pelo número 1, enquanto que o da direção é o número 2. Quando a identificação do motor é facultativa, o comando atua sobre

ambos se esta não for especificada.

4.1.2.B Especificação dos comandos **ROVIM**

G10 – Ir para *Lockdown*

Sintaxe: "G10"

Este comando envia o **ROVIM** para o estado de *lockdown*. O estado de *lockdown* é descrito em 3.8.

Enquanto estiver em *lockdown*, o **ROVIM** só pode executar comandos de leitura e recuperação de erros. A tabela 4.5 lista os comandos que podem ser executados em *lockdown*.

Comando	Descrição	Motivo da permissão
G10	Ir para <i>lockdown</i>	Ações que aumentem a proteção do sistema estão sempre disponíveis
G11	Sair de <i>lockdown</i>	Consumar a recuperação
G12	Parar motores, sem perder a sua configuração	Ações que aumentem a proteção do sistema estão sempre disponíveis
G14	Acelerar	Uso pelos mecanismos internos do programa
G15	Desacelerar	Uso pelos mecanismos internos do programa
G16	Definir marcha	Uso pelos mecanismos internos do programa
G18	Controlo de depuração	Facilitar deteção de erros
H	Ajuda	Não interfere com o sistema
O	Para motores, perdendo a sua configuração	Ações que aumentem a proteção do sistema estão sempre disponíveis
X	Comandar motor em velocidade (malha aberta)	Recuperar de erros na direção

Tabela 4.5: Comandos permitidos em *lockdown*.

Se o utilizador tentar usar um comando que não esteja na lista de comandos permitidos, este é abortado e é mostrada uma mensagem de erro no terminal.

Para sair de *lockdown*, o utilizador deve seguir o procedimento descrito em 4.2.5.

Exemplo:

```
G10          Entra em modo de segurança
```

G11 – Sair de *Lockdown*

Sintaxe: "G11"

Este comando é usado para sair do estado de *lockdown*.

Ao invocar o comando o **ROVIM** verifica o estado do sistema, e se não existirem erros informa o utilizador para proceder à destravagem manualmente. Após detetar que o travão está destravado, finaliza o procedimento. O **ROVIM** fica então pronto a ser utilizado.

Exemplo:

Limite de tempo para desbloquear o travão

O procedimento de saída de *lockdown* está equipado com um temporizador de segurança. Após indicar ao utilizador que já pode desbloquear o travão, este tem 20 segundos para o fazer. Caso contrário, o *software* reativa os procedimentos internos de segurança e não vai ser possível sair com sucesso do estado de *lockdown*.

Tempo de espera após a travagem

A travagem e destravagem do travão de emergência não é instantânea. Para assegurar a consistência dos seus estados, o programa espera 6 segundos após começar a travar até prosseguir com a sua execução. Se nesse período o utilizador contrariar esta acção, destravando o travão com recurso ao painel de controlo, vai criar uma inconsistência temporária entre o *software* e o *hardware*. O sistema recupera revertendo para o estado mais seguro, o de *lockdown*. Por isso o utilizador deve fazer este compasso de espera de cada vez que o **ROVIM** entra em *lockdown* até tentar destravá-lo.

No caso da travagem após a destravagem este problema não se coloca.

G12 – Parar motores

Sintaxe: "G12 D0"

D0 = Motor# (1=Tração, 2=Direção)

Se o argumento não for especificado, este comando pára ambos os motores.

Este comando serve para parar os motores de forma controlada e sem perder a sua configuração, ao contrário do comando O. Este é o comando preferencial de paragem dos motores.

Exemplo:

G12 01	Pára o motor da tração
G12	Pára ambos os motores

G13 – Controlar os **GPIO**

Sintaxe: "G13 D0 D1"

D0 = Opção (1=Set, 2=Reset, 3=Toggle, 4=Get)

D1 = GPIO#

Este comando permite aceder aos pinos programáveis de entrada e saída do microcontrolador. É usado principalmente pelas funções internas do *software* do **ROVIM**, mas está acessível aos utilizadores.

Não é necessário nem recomendado usar este comando durante a utilização normal do veículo.

Exemplo:

G13 01 0D	Trava o travão de emergência	1
G13 01 0E	Erro - não é possível definir valor de pinos de entrada	1
G13 02 09	Liga a marcha trás em modo autónomo	1
G13 03 0F	Alterna a ativação do travão de mão	1
G13 04 0E	Retorna 1 se o interruptor de emergência estiver pressionado, ou 0, se estiver solto	1
G13 04 09	Retorna 0 se a marcha atrás estiver ligada em modo autónomo, 1, em caso contrário	1

G14 – Acelerar

Sintaxe: "G14 D0"

D0 = % do acelerador (0-100)

Este comando controla o acelerador do motor da tração do **ROVIM**, em modo autónomo de condução, de modo semelhante ao acelerador de punho.

Outros parâmetros necessários para movimentar o veículo são controlados pelo comando G16 pelo que este comando deve ser usado apenas após definir o tipo de marcha. Em condições normais de condução este comando não é necessário, mas pode ser usado sem restrições.

Exemplo:

G14 0	Coloca o acelerador a 0 %
G14 32	Coloca o acelerador a 50 %

G15 – Desacelerar

Sintaxe: "G15 D0"

D0 = % do desacelerador (0-100)

Este comando controla a recuperação de energia do motor da tração do **ROVIM**, que funciona como mecanismo de travagem controlada em modo autónomo de condução. É usado para diminuir a velocidade do veículo em condições normais de condução. Para manter o veículo imóvel ou travagens de emergência devem ser usados os comandos apropriados, respetivamente G10 e G16.

Exemplo:

G15 0	Desativa o desacelerador
G15 64	Liga o desacelerador ao máximo

G16 – Definir marcha

Sintaxe: "G16 D0 D1"

D0 = Direção (0=Marcha frente, 1=Marcha trás, 2=Ponto morto, 3=Imobilização)

D1 = velocidade (5-45)

Este comando define o tipo e a intensidade do movimento da tração. Existem quatro tipos de movimento: imobilização, em que o veículo pára e se mantém parado; ponto morto, em que o motor não atua no seu movimento e este pode rolar livremente; e marcha frente e marcha trás, em que o motor move o veículo na direção selecionada.

Se nenhum argumento for especificado, o veículo imobiliza-se.

O ponto morto pode ser selecionado especificando apenas o tipo de movimento. Para a marcha trás e marcha frente é necessário especificar também a velocidade desejada.

A velocidade é especificada em décimas de km/h, e não pode ser superior a 4,5 Km/h (45 Km/h/10), nem inferior a 0,5 Km/h (5 Km/h/10). O seu controlo é feito em malha aberta, pelo que, consoante as condições do terreno e de carga, pode apresentar um erro considerável. Nesse caso os comandos de aceleração (G14) e desaceleração (G15) podem ser usados para fazer ajustes.

Caso se selecione um tipo de movimento contrário ao atual, o veículo pára a marcha antes de a inverter.

Exemplo:

G16 0 20	Coloca o veículo a andar para a frente a cerca de 3,2 Km/h
G14 40	Ajusta o acelerador para 64 %
G16 1 4	Erro - não é permitida uma velocidade tão baixa
G16 1 10	Inverte a marcha a 1 Km/h
G16 2	Coloca o veículo em ponto morto
G16 3 0	Pára e imobiliza o veículo
G16	Pára e imobiliza o veículo

G17 – Virar

Sintaxe: "G17 D0"

D0 = Ângulo (0-86)

Este comando permite virar a direção em modo autónomo. Se nenhum argumento for especificado, o motor é desativado e a direção mantém-se na sua posição atual.

O ângulo de viragem é definido em 3.8, e varia entre 0° (tudo a estibordo) e 86° (tudo a bombordo), sendo 43° o ponto central, em que a direção está alinhada (a moto segue em frente).

Devido à fragilidade do acoplamento mecânico (a correia salta se o binário for muito elevado), o **ROVIM** só aceita comandos de viragem se o veículo estiver em movimento.

Exemplo:

G16 0 A	Coloca o veículo a andar a cerca de 1 Km/h
G17 2B	Alinha a direção
G17 56	Vira tudo a bombordo
G16	Pára o veículo
G17	Pára o motor da direção
G17 2B	Erro - o ROVIM não está em movimento

G18 – Controlo de depuração

Sintaxe: "G18 D0 D1 D2 D3"

D0 = Opção (1-9)

D1 = Param#1

D2 = Param#2

D3 = Param#3

Este comando é usado para manipulação, depuração e monitorização do estado do sistema em tempo real.

Foi desenhado para ajudar ao desenvolvimento do *software*, mas pode também ser usado para tentar resolver problemas que ocorram durante a utilização do [ROVIM](#). as funcionalidades deste comando não são necessárias em condições normais de utilização do [ROVIM](#).

O número de argumentos varia consoante o comando a usar. A seguir são apresentadas as várias funcionalidades deste comando.

1=Imprimir nível de verbosidade

Apresenta o nível de verbosidade no ecrã. A secção [3.8](#) descreve em maior detalhe os níveis de verbosidade disponíveis.

2=Definir nível de verbosidade

Define o novo nível de verbosidade. O nível de verbosidade a definir é passado no argumento **D1**. A secção [3.8](#) descreve em maior detalhe os níveis de verbosidade disponíveis.

3=Controlar execução da tarefa de monitorização do sistema

Alterna o modo de repetição da tarefa de monitorização do sistema entre automático (situação por defeito) e manual (iniciada pelo utilizador). Esta funcionalidade é útil para depurar o programa.

4=Correr a tarefa de monitorização

Inicia uma repetição da tarefa de monitorização do sistema, se possível (se estiver configurada para correr em modo manual). Esta funcionalidade é útil para depurar o programa.

5=Ligar a depuração da tarefa de geração de PWM

Liga o modo de depuração da tarefa de geração do sinal de [PWM](#) dos sinais de acelerador e desacelerador de modo autónomo.

O argumento **D1** é obrigatório e define o número de períodos em que a depuração está ativada. Os argumentos **D2** e **D3** definem o sinal de [PWM](#) a gerar e são facultativos. Se este comando for usado para gerar um sinal, este continuará ativo após terminar a depuração.

6=Controlar o *watchdog*

Consoante o argumento **D1**, reinicia o contador do *watchdog*, ou o sistema completo.

7=Bloquear/Desbloquear comandos interditos em *lockdown*

Alterna a limitação à execução dos comandos interditos em *lockdown*. Esta interdição pode também ser manipulada durante o funcionamento normal.

8=Calibrar a conversão da velocidade

Esta funcionalidade não está disponível de momento.

9=Mostrar de novo mensagens de erro

O *software* mostra uma mensagem para cada erro, quando é detetado. A mensagem de erro é mostrada apenas uma vez até este ser resolvido. Esta funcionalidade reinicia o limitador interno do programa para que seja mostrada de novo. É útil para ajudar a determinar as causas de um erro.

Exemplo:

G18 01	Mostra o nível de verbosidade
G18 02 0F	Repõe o nível de verbosidade predefinido
G18 03	Alterna o modo de repetição da tarefa de monitorização do sistema
G18 04	Corre a tarefa de monitorização
G18 05 05 01 14	Estabelece o acelerador a 20 % e arranca a depuração da tarefa de geração de PWM durante 5 períodos do sinal
G18 06 01	Reinicia a sistema
G18 07	Alterna a limitação à execução dos comandos interditos em <i>lock-down</i>
G18 09	Mostra informação sobre os erros atuais

H – Ajuda

Sintaxe: "H"

O comando de ajuda apresenta a seguinte mensagem:

```
Dalf ROVIM T2D Help.
```

```
Usage: H
```

```
Available help topics:
```

C	Read ADC.
E	Show encoder count.
G [cmd code] [args...]	Custom Commands. See below.
H	Show this message.
I	Reset software.
U	Show motor status.
V	Show motors velocity.
X2 [dir] [duty cycle]	Move direction motor in open loop.

[dir] can be: '0' - move to port, or '1' - move to starboard.

```
Custom commands:
```

G10 Go to lockdown.

G11 Release from lockdown, if the system is good to go.

G12 [mtr] Stop motor [mtr]. If [mtr] is omitted, both motors are stopped.

G14 [PWM] Set the decelerator (braking energy recovery) to [PWM]%%.

G15 [PWM] Set the accelerator to [PWM]%%.

G16 [type] [speed] Set the vehicle to move in direction [type] at speed [speed].

Possible directions are:

- 0 - Forward;
- 1 - Reverse;
- 2 - Neutral (coast);
- 3 - Hill hold (maintain position).

Speed is expressed in tenths of Km/h (km/10/h) and varies between 0 and 45.

G17 angle turn direction to [angle].

Do not forget that all inputs through this interface are in hexadecimal and all outputs of the sta

Example usage:

X2 00 30 - Moves the direction to port at 48% of full power

G16 00 20 - Moves the vehicle forward at ~3.2 Km/h

G17 1B - Turn the vehicle 16^Å to starboard.

GPIO pin count on Dalf board J5 and J6 expanders:

(male socket seen from above)

```

-----
|1 3 5 ..... 15|
|2 4 6 ..... 16|
-----

```

GPIOs are:

- 1, decelerator
- 2, brake unclamp switch
- 3, accelerator
- 4, traction voltage sensor
- 5, activate traction
- 6, brake clamp switch
- 7, brake unclammer
- 8, direction error switch
- 9, engage reverse
- 10, brake unclamp command
- 11, engage forward
- 12, auto mode switch
- 13, brake clamper
- 14, emergency stop condition

15, engage handbrake

Direction angle representation (motorcycle seen from above):

```
      43°
86°  \ \ --- | --- / 0°
      \ \ | /
      \ \ | /
      \ \ | /
      _ (FRONT) _
|_ | --- | --- | _ |
  |     |
(PORT) |     | (STARBOARD)
  |     |
  _ |     | _
|_ | ----- | _ |
      (REAR)
```

The direction angle (the argument for command G17) starts at full starboard - 0° and goes until full

Motor 1 is the traction motor and motor 2 is the direction motor. However, motor 1 must be controlled

Dalf board led blinking information:

LED1 ON - traction motor is either moving or ready to move through auto mode.

LED1 OFF - traction motor is not ready to move with auto mode.

LED2 ON or blinking - direction motor is either moving or being powered.

LED2 OFF - direction motor is not being powered.

LED3 OFF - No errors.

LED3 blinking - ROVIM is in lockdown mode.

MTR1 ON green - traction motor is being accelerated on auto mode.

MTR1 ON red - traction motor is being decelerated on auto mode.

MTR2 ON green - direction is moving to port.

MTR2 ON red - direction is moving to starboard.

MTR1 and MTR2 intensity depends on the PWM duty cycle.

For further reference please consult the users manual.

4.1.3 Interface I²C

A interface I²C é uma interface binária implementada em cima do protocolo I²C e destina-se a comunicar com um dispositivo externo.

O dalf está configurado como escravo. O protocolo de comunicação é definido em [24].

Esta interface não suporta troca assíncrona de informação. Para além disso, o formato binário do protocolo de comunicação dificulta a interpretação da informação por humanos, ao contrário da interface série. Assim, é especialmente útil para interagir com o módulo SeN, e é esta a sua principal utilidade.

A interface I²C é funcionalmente idêntica à interface série, que está documentada em 4.1.2.

A interface I²C não está ainda preparada para operar o ROVIM.

4.2 Funcionalidades

4.2.1 Chave dos fluxogramas

Os símbolos dos fluxogramas deste capítulo são apresentados na figura 4.1 e são os seguintes:

Processo Retângulo que representa uma ação do utilizador;

Entrada/saída Paralelograma que representa uma tarefa executada pelo ROVIM que o utilizador pode ouvir ou observar;

Decisão Losango que representa um pedido ao utilizador, para validar um teste ou escolher entre várias opções;

Início/fim Retângulo de cantos arredondados que indica o início e o fim do processo representado pelo fluxograma;

Sentido de execução Seta, de um símbolo de um fluxograma para outro, que representa a transferência de controlo, e a sequência da leitura.

O nome de cada símbolo indica a sua ação no fluxograma.

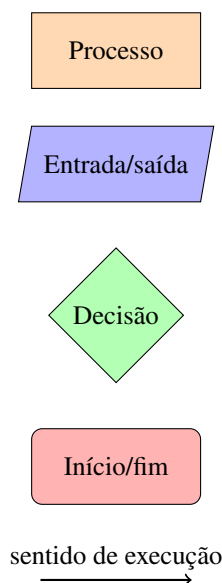


Figura 4.1: Chave dos fluxogramas deste capítulo.

4.2.2 Ligar

O fluxograma da figura 4.2 apresenta o procedimento a seguir para ligar o ROVIM.

4.2.2.A Verificações de segurança

Antes de ligar o ROVIM, o utilizador deve passar em revista o estado do veículo, para se assegurar que os sistemas se encontram operacionais e assim evitar acidentes. Os pontos a ter em atenção são:

1. O sistema de travagem, por ser o subsistema fundamental para a segurança do veículo, é importante verificar que está tudo bem, nomeadamente que os componentes estão apertados;

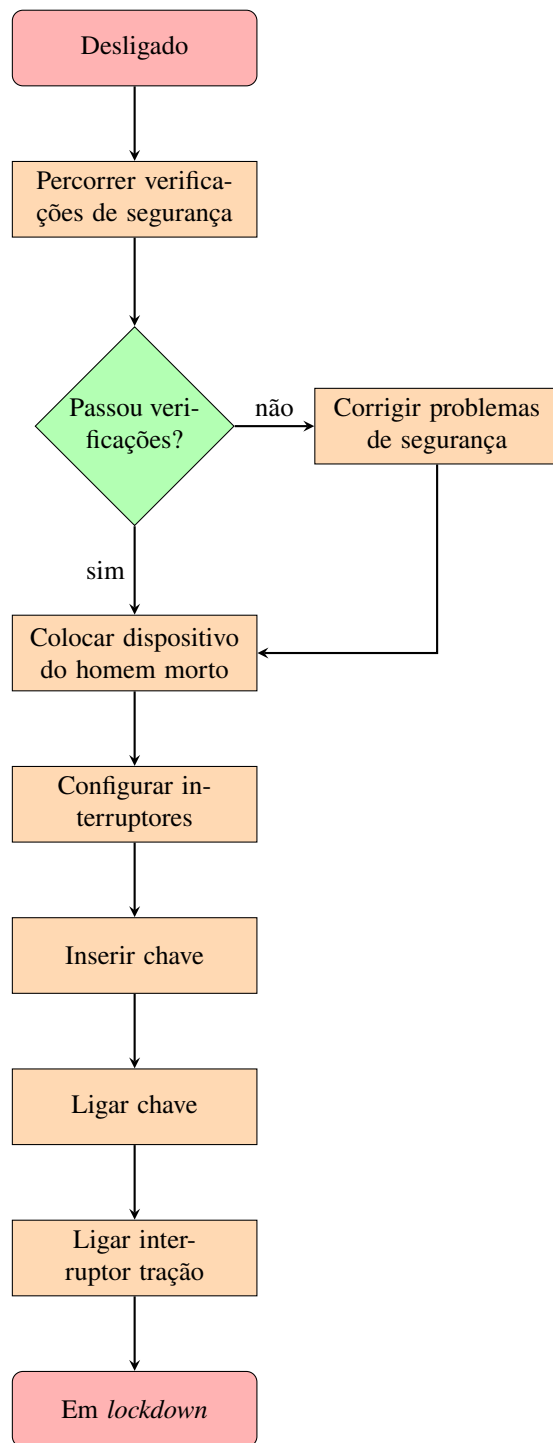


Figura 4.2: Fluxograma do processo de ligar.

2. Garantir que os pneus estão cheios;
3. Garantir que a correia da direção se encontra bem apertada, caso se pretenda condução autónoma;
4. Garantir que não os componentes não estão molhados;
5. As baterias, garantir que não estão deslocadas, e que as suas ligações estão desimpedidas.

Em condições normais estas verificações serão sempre passadas com sucesso, mas é importante estar ciente delas, especialmente após longos períodos de inatividade ou após utilização do veículo por outros utilizadores.

4.2.2.B Configuração inicial dos seletores

A fim de assegurar que o arranque se processa sem erros, o utilizador deve garantir que o interruptor de emergência e os seletores do painel de controlo do **ROVIM** se encontram no seguinte estado:

Tração Desl.;

M/A Manual;

F/N/T Neutro;

Ativar tração Bloq.;

Interruptor de emergência Solto.

4.2.3 Desligar

O fluxograma da figura 4.3 apresenta o procedimento para desligar o **ROVIM**.

4.2.4 Travagem de emergência/Ir para *lockdown*

O **ROVIM** está preparado para entrar automaticamente em *lockdown* quando detetar um erro grave, mas o utilizador pode também enviá-lo deliberadamente, das seguintes formas:

- Ativando o interruptor de emergência;
- Retirando o dispositivo do homem morto;
- Enviando um comando pela porta série (G10).

O estado de *lockdown* é descrito com mais detalhe em 3.8.

4.2.5 Sair de *lockdown*

O **ROVIM** arranca e termina sempre no estado de *lockdown* apesar de não ter ocorrido nenhum erro, por razões de segurança.

O fluxograma da figura 4.4 apresenta o procedimento para sair deste modo.

Nas situações em que aconteça um erro e o programa entre neste modo de segurança, é necessário primeiramente recuperar do erro. Só quando o programa não detetar erros é que sai com sucesso deste estado.

4.2.6 Alternar modos de condução

Para poder comutar entre modos de condução é necessário que a moto esteja ligada e pronta. O fluxograma da figura 4.5 apresenta o procedimento para comutar entre modo manual e autónomo. O fluxograma da figura 4.6 apresenta o procedimento para comutar entre modo autónomo e manual.

Alternar o modo de condução implica alterar o modo de controlo do motor da tração e o modo de acionamento da direção.

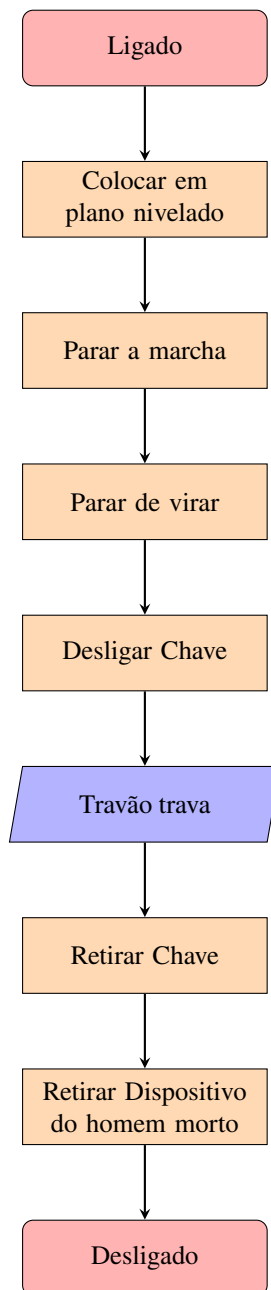
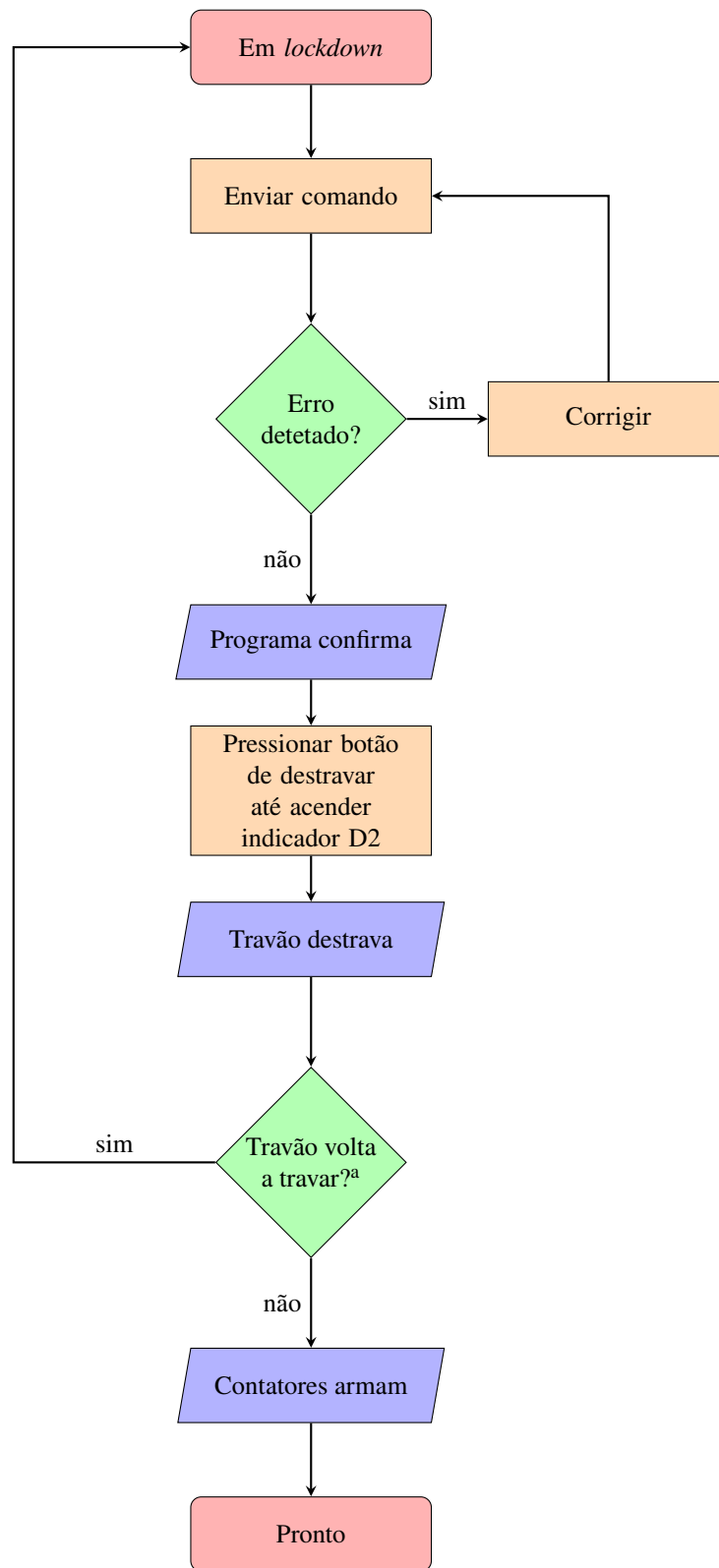


Figura 4.3: Fluxograma do processo de desligar.

O modo de controlo da tração pode ser escolhido através de um seletor no painel de controlo. Já para alterar o modo de acionamento da direção é preciso acoplar ou desacoplar a correia do sistema, consoante se queira, respetivamente, transitar do modo manual para o autónomo ou vice-versa.

Na figura 3.11 estão identificados os componentes do atuador da direção. Para desacoplar a correia é necessário desacoplar o seu esticador, com recurso a duas chaves de bocas. Depois disso a correia fica larga e cai livremente, deixando de haver transmissão de binário entre o redutor e a coluna da direção. Acoplar a correia consiste no processo inverso: colocar a correia no sitio e aconchegar o esticar, e depois apertar bem.

É importante que a correia esteja o mais esticada possível e que o esticador esteja bem apertado. A correia é o ponto mais frágil do acoplamento e, quanto mais solta estiver, mais salta e impede a transmissão de binário.



^aO travão volta a travar após soltar o botão de destravagem se tiver passado o limite de 20s para a destravagem, ou se ocorrer outro erro durante a destravagem

Figura 4.4: Fluxograma do processo de sair do estado de *lockdown*.

4.2.6.A Arranque em modo manual

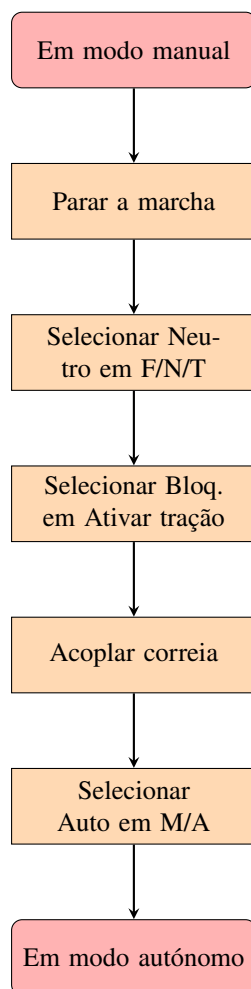


Figura 4.5: Fluxograma do processo de comutação para modo autónomo de condução.

Para evitar erros no *software* é necessário ligar a moto sempre como o seletor M/A em modo Manual. Tal não implica que se mude o modo de condução e que se desacople a correia da direção – trata-se apenas de uma limitação do sistema. Portanto, para prosseguir no modo de condução autónomo após reiniciar o veículo, basta omitir o passo de acoplar a correia ao procedimento da figura 4.5.

4.2.7 Selecionar marcha

Só após selecionar a marcha do veículo é possível controlar o motor da tração para gerar movimento. Existem dois tipos de marcha: marcha frente e marcha trás.

O seletor F/N/T seleciona, quando em modo manual, nas posições Frente e Trás, as marchas para a frente e para trás, respetivamente. Depois de selecionada a marcha, a velocidade do veículo é controlada com recurso ao acelerador.

Em modo autónomo o comando G16 permite selecionar o tipo de marcha e a velocidade desejada, permitindo efetivamente mover o veículo. Não é possível selecionar a marcha sem colocar o veículo em movimento em modo autónomo.

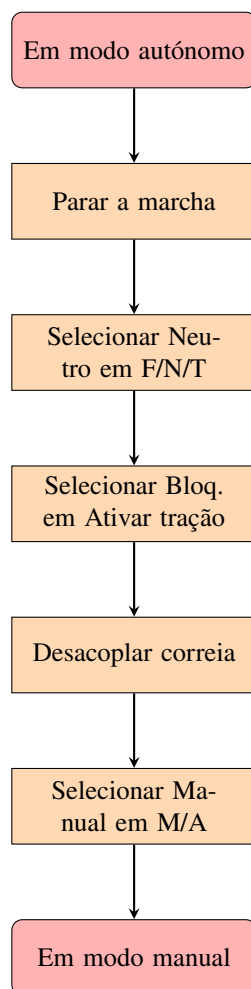


Figura 4.6: Fluxograma do processo de comutação para modo manual de condução.

4.2.8 Acelerar

O acelerador funciona de modo diferente para os dois modos de condução. Em modo manual é um tradicional acelerador analógico de punho, enquanto que em modo autónomo este é controlado pelo comando G14.

O controlo do acelerador só tem efeito após selecionar a marcha, como explicado em 4.2.7.

4.2.9 Desacelerar

Desacelerar o **ROVIM** consiste em reduzir deliberadamente a sua velocidade, sem recorrer ao travão elétrico. A forma de o fazer apresenta bastantes diferenças entre os dois modos de condução.

Em modo de condução manual é o travão das rodas da frente, controlado pela *manete* no guiador, que cumpre essa função.

Em modo de condução autónomo é acionada a travagem regenerativa do controlador da tração, controlada pelo comando G15.

4.2.10 Virar

Em modo de condução manual a direção é controlada no guiador, como em qualquer moto-quatro. Em modo autónomo o ângulo de viragem é especificado através do comando G17. Devido às limitações do atuador, o veículo tem que estar em movimento para se poder virar em modo autónomo. Ao alternar entre modos de condução é necessário ajustar a correia, como indicado em 4.2.6.

4.2.11 Colocar em ponto morto

Em ponto morto, o veículo move-se livremente, sem a interferência do motor. Em modo manual, o modo Neutro do seletor F/N/T corresponde à funcionalidade do ponto morto. Em modo autónomo, esta é ativada com recurso ao comando G16.

4.2.12 Imobilizar

É possível imobilizar o veículo sem atuar o travão de emergência e entrar em *lockdown*. O veículo não está efetivamente travado – apenas é ligada a travagem regenerativa, que resiste ao movimento. Esta capacidade é suficiente para manter o veículo imóvel em terrenos ligeiramente inclinados. Caso esta funcionalidade seja ativada com o veículo em movimento, este será desacelerado com recurso à travagem regenerativa até parar, mantendo-se depois imóvel.

Em modo manual esta funcionalidade é ativada em ponto morto, ao bloquear a tração com recurso ao seletor "Ativar tração". Em modo autónomo, o comando G16 permite selecionar esta funcionalidade.

4.3 Exemplo típico de utilização

Uma situação típica de utilização da T2D consiste em três fases principais: arrancar, conduzir e desligar.

O arranque consiste em ligar a moto (ver 4.2.2), sair de *lockdown* (ver 4.2.5), selecionar o modo de condução (ver 4.2.6) e selecionar a marcha (ver 4.2.7). O ROVIM está então pronto a ser conduzido.

A condução consiste em acelerar (ver 4.2.8), desacelerar (ver 4.2.8), virar (ver 4.2.8) e alterar a tipo de movimento (ver 4.2.7, 4.2.11, 4.2.12). Estas operações permitem ao utilizador seguir uma determinada trajetória, por si definida.

Ocasionalmente, o sistema pode detetar um erro e entrar em *lockdown*. Nesse caso é necessário identificá-lo e resolvê-lo (ver 4.4). Só depois é possível sair de *lockdown* e retomar a condução normal.

Quando terminar o turno de condução, é necessário desligar o ROVIM (ver 4.2.3) e acondicioná-lo num local seguro até à próxima utilização.

4.4 Resolução de problemas

O utilizador está sujeito a gerar erros durante a utilização do ROVIM. Quando acontecem é necessário detetá-los e corrigi-los. As maneiras de detetar erros no ROVIM, por ordem de utilidade, são:

- Inspeção ao *hardware*. A inspeção visual permite detetar muitas situações de erro. Casos como botões ou seletores de controlo mal configurados, indicações visuais dos LEDs, interruptores de fim de curso ativados são comuns e podem ser detetados através da inspeção visual;

- Mensagens de erro do *software*. O *software* imprime uma mensagem quando deteta um erro. Esta mensagem contém informação útil para a sua correção;
- Códigos de erro do controlador da tração. O controlador da tração tem a capacidade de detetar erros. Em caso de erro, este faz piscar os LEDs de erro na tração com um padrão que varia consoante o seu código. Os códigos dos erros do controlador, e as suas causas e soluções podem ser consultadas no manual técnico, [10];
- Controlo de depuração da interface série. As funcionalidades do comando G18 da interface série permitem ajudar a identificar erros desconhecidos. Em condições normais de condução não é necessário recorrer a este comando;
- Programador do controlador da tração. O programador do controlador permite obter informação adicional de estado e diagnóstico relacionada com o controlador da tração. Em condições normais de condução não é necessário recorrer a este comando;
- Consulta dos autores do projeto. Se todas as restantes técnicas falharem, os autores do projeto podem ajudar a identificar e resolver erros.

4.4.1 Problemas conhecidos

Os problemas conhecidos da T2D são:

1. A velocidades baixas (menos de 0,5 Km/h) o sensor de velocidade não tem exatidão;
2. É possível o motor da direção continuar ligado após a paragem do veículo.

5

Conclusão

O objectivo principal deste projeto, a construção de um protótipo funcional de um veículo autónomo, foi atingido. Este apresenta limitações relevantes, mas aceitáveis para primeira uma iteração, que estão identificadas e com propostas de melhoria.

Deficiências no domínio *à priori* de conhecimento e intuição técnica apropriados originaram algumas soluções pouco refinadas, nomeadamente no dimensionamento do acoplador mecânico da direção, mas foram os constrangimentos práticos sentidos na fase de construção a principal dificuldade do projecto, que impediu correções eficazes das deficiências de planeamento. A nível logístico, a dificuldade de mover o veículo entre laboratórios e oficinas forçou à realização em avanço de todas as modificações do *chassi*, e impediu uma correção da zona morta da direção, por exemplo. A nível de material, limitações no acesso aos componentes disponíveis impediram pontualmente a seleção de componentes idealizados em dimensionamento, como por exemplo na escolha da resistência de pré-carga do contactor da direção. Deram-se também limitações nos métodos de fabrico disponíveis, que impediram por exemplo uma fixação mais sólida das baterias e um melhor isolamento dos seus contactos. Daqui se conclui que projetos com uma forte vertente prática e fora da área de especialização da instituição que os acolhe (nomeadamente o trabalho mecânico deste projeto) colocam restrições tão ou mais relevantes que as considerações tecnológicas.

O *chassi* usado revelou-se perfeitamente adequado às necessidades do projeto, e permitiu acomodar uma distribuição bastante inteligente dos componentes. Nomeadamente, a planificação da localização das baterias, e dos atuadores da tração e da travagem permitiu:

- agrupar dois motores num espaço compacto;
- libertar toda a area central para as baterias;
- proteger de forma elegante as baterias de interferência acidental;
- manter aproximadamente o centro de gravidade original da moto;

A tecnologia escolhida para as baterias revelou-se fiável, tendo um exemplar sido sujeito acidentalmente a uma situação de sobrecarga sem falhar catastroficamente. No entanto não foi possível fixar devidamente as baterias ao *chassi*, o que limita as possibilidades de condução a terrenos pouco acidentados e inclinados. Embora esta limitação não seja aceitável num veículo para utilizações militares, justifica-se aqui à luz das limitações de métodos de fabrico e da iteração inicial do protótipo.

O atuador da tração demonstrou até ora robustez na sua atuação, não tendo sido detetado até esta data nenhum erro imprevisto durante o seu funcionamento. O motor (e consequentemente o controlador) da tração está exageradamente sobredimensionado, mesmo para uma versão inicial de um protótipo. Já o sensor de velocidade, apesar de apresentar um bom desempenho (a necessidade de corrigir a sua forma de onda deve-se à introdução, incorretamente, de um filtro passa-baixo no circuito de condicionamento de sinal), não apresenta resolução suficiente para uma aplicação com uma velocidade pretendida tão reduzida. Dado que se desenvolveu o redutor da tração, a montagem de um sensor óptico a uma das suas engrenagens deveria ter sido contemplada.

A combinação dos vários sistemas de travagem permite disponibilizar para qualquer situação de condução um dispositivo redundante de redução da velocidade. Através de um relé e dois interruptores de fim de curso é (embora na solução usada tenho sido incluídos componentes adicionais) possível controlar o funcionamento de um sistema de vital importância para a segurança do sistema, o que permite ao mesmo tempo uma implementação mais simples e mais fiável.

A direção é o subsistema com o resultado final menos satisfatório apresentado, devido principalmente à limitação da correia. Esta deve-se em parte a uma falha de conhecimento técnico para projetar um acoplamento mais adequado, mas também à dificuldade em esticá-la suficientemente com o esticador usado. A montagem dos sensores deveria também ser fixada de forma mais sólida para evitar o risco de os descalibrar.

A eletrónica realizada apresenta um aspecto bastante precário, mas permitiu um desenvolvimento mais rápido e simples dos circuitos do que seria possível recorrendo a placas não configuráveis e, uma vez fixada e isolada de interferência externa, cumpre bem o seu papel. As ligações elétricas concentradas na placa de eletrónica estão bastante confusas, devido às várias vezes em que foram modificadas.

Em suma, o resultado final cumpre de forma bastante satisfatória os requisitos e critérios de desenho definidos à partida em relação à viragem e à tração, ficando a direção aquém do resultado esperado. Na tabela 5.1 são apresentados em forma de resumo as especificações técnicas do veículo.

5.1 Trabalhos futuros

O protótipo construído e aqui apresentado apresenta largo potencial de melhoramento e permite tirar muitas lições a aplicar em iterações futuras.

No protótipo atual, três problemas principais impedem que se explore todo o potencial do veículo: o acoplamento na direção, a fixação das baterias e isolamento dos contactos expostos. O primeiro problema limita as capacidades de condução, enquanto que os dois últimos apresentam riscos de segurança. Dado que a transmissão mais maleável por correia se revelou ineficaz, a sua substituição por outro tipo de acoplamento não maleável, como por exemplo uma corrente e carretos de bicicleta, resolve o problema atual. O esticador atual pode ser reaproveitado para manter esticada (devido aos dentes mais pronunciados deste tipo de carretos, o esticador não precisa de fazer um esforço tão grande) uma corrente suficientemente larga para se poder soltar caso se pretenda

virar através do guiador. A fixação das baterias representa um problema mais difícil de resolver, mas passará por uma montagem fixadora que envolva as baterias, como usado nos veículos comerciais. Aqui provavelmente será necessário procurar um fornecedor especializado para conseguir obter uma solução satisfatória. Isolar os contactos expostos passa por refazer as placas protótipo com ferramentas industriais (agora que os circuitos estão validados, faz sentido passar para uma construção mais robusta) e isolar os bornes e outros pontos elétricos ao ar livre. Com estes três problemas resolvidos, o grau de confiança no protótipo aumenta significativamente, o que permite explorar melhor as suas capacidades.

Outros aspetos de melhoria no protótipo atual são refinações, nomeadamente um programa de testes estruturado e abrangente, e adição de funcionalidades interessantes, como interface I²C e/ou por rádio controlo, e aumento do grau de autonomia da condução (como a adição da destravagem por *software*).

Numa iteração posterior do protótipo, é possível reduzir significativamente os custos na escolha de componentes mais adequados. Pode também ser ponderado o uso de tecnologias mais recentes, nomeadamente ao nível das baterias, mas dado o potencial de evolução do protótipo atual, este caminho deve ser relegado para segundo plano.

Especificações elétricas		
Parâmetro	Valor	Unidades
Tensão das baterias em início de vida	81	V
Tensão das baterias em fim de vida	71,6	V
Tensão de descarga das baterias	72	V
Corrente máxima nas baterias	250	A

Especificações mecânicas		
Parâmetro	Valor	Unidades
Velocidade máxima teórica	32,2	Km/h
Velocidade máxima	4,5	Km/h
Velocidade mínima	0,5	Km/h
Binário máximo de tração	1080	N m
Binário máximo de viragem teórico	133,3	N m
Binário máximo de viragem	<10,25	N m
Peso	250	Kg
Brecagem máxima teórica	88,8	°

Especificações de <i>software</i>		
Parâmetro	Valor	Unidades
Brecagem	86	°
Limite de tempo para destravagem	20	s
Tempo de espera após a travagem	6	s
Tempo de reinicialização	<100	ms
Período do <i>watchdog</i>	2048	ms
Taxa máxima de símbolos da ligação série	57,6	kbaud/s

Tabela 5.1: Especificações técnicas do [ROVIM](#).

Bibliografia

- [1] C. C. Chan, “The state of the art of electric and hybrid vehicles [prolog],” *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 245–246, Feb 2002.
- [2] “Introduction to gears,” guía, KOHARA GEAR INDUSTRY CO., LTD., 2006.
- [3] N. Hashemnia and B. Asaei, “Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles,” in *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, Sept 2008, pp. 1–5.
- [4] S. M. A. Sharkh and M. T. N. Mohammad, “Axial field permanent magnet dc motor with powder iron armature,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 3, pp. 608–613, Sept 2007.
- [5] J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, “Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 475–484, Feb 2012.
- [6] (2016) Saietta Group. [Online]. Available: <http://www.saiettaengineering.com/motors/>
- [7] K. Yiu, “Battery technologies for electric vehicles and other green industrial projects,” in *Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2011 4th International Conference on*, June 2011, pp. 1–2.
- [8] B. Shamah, M. D. Wagner, S. Moorehead, J. Teza, D. Wettergreen, and W. R. L. Whittaker, “Steering and control of a passively articulated robot,” in *SPIE, Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems IV*, vol. 4571, October 2001.
- [9] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers, 1992.
- [10] *Sigmadrive PM Traction Technical Manual*, PG Drives Technology, 2008.
- [11] *Agni Motor Thermistor Information*, nota técnica, EV Power.
- [12] *KTY81 series*, manual técnico, NXP B.V., 2008.
- [13] (2016). [Online]. Available: <http://thumperfi.com/wp-content/uploads/2014/02/magnetic-pickup-rpm-sensor-graph.png>
- [14] *RS DC Servomotors*, manual técnico, PARVEX SAS, 2003.
- [15] *General Purpose Relays*, manual técnico, Tyco Electronics Corporation, 2011.
- [16] *2N2219; 2N2219A NPN switching transistors*, manual técnico, Philips Electronics N.V., 1997.

- [17] *BC546/547/548/549/550*, manual técnico, Fairchild Semiconductor Corporation, 2002.
- [18] *Worm gearboxes*, manual técnico, S.T.M., S.p.a.
- [19] “Catálogo de polias,” Eurocorreias, Lda., 2012.
- [20] *Model 533, 534, 535*, manual técnico, Vishay Intertechnology, Inc., 2012.
- [21] *NE555 SA555 - SE555*, manual técnico, STMicroelectronics, 2008.
- [22] *16-Bit I/O Expander with Serial Interface*, manual técnico - modelos MCP23017/MCP23S17, Microchip-Technology Inc., Feb. 2007.
- [23] *DALF-1; Rev F Motor Control Board*, Owner’s Manual, Embedded Electronics, LLC., Aug. 2008.
- [24] *DALF-1; Rev F Motor Control Board*, I2C2 Interface, Embedded Electronics, LLC., Jun. 2007.
- [25] *ALCAD XHP Range*, manual técnico, Alcad limited.
- [26] “Modelação e simulação,” 2008.
- [27] “Controlo,” 2007.
- [28] K. Rajashekara, “History of electric vehicles in general motors,” in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1993.*, *Conference Record of the 1993 IEEE*, Oct 1993, pp. 447–454 vol.1.
- [29] *Saietta Motors Workshop Manual*, Saietta Group, 2015. [Online]. Available: http://www.saiettaengineering.com/se_website/wp-content/uploads/2015/11/Saietta-Motors-Workshop-Manual_Nov-2015.pdf
- [30] S. Lloyd, M. McFadden, D. Jennings, and R. L. D. C. Baron, *OSMC project documentation v4.25*, documentação técnica, 2002.
- [31] D. Moeller, *Simplified OSMC motor control*, esquema elétrico, Nov. 2001.
- [32] (2016) Lynch Motor Company Ltd. [Online]. Available: http://lynchmotors.co.uk/technical-reports/vehicles/electric-vehicle_drive.html
- [33] *PIC18F8722 Family Data Sheet*, MicrochipTechnology Inc., 2004.
- [34] “Genesis NP range overview,” brochura, EnerSys Inc., Feb. 2005.
- [35] *Genesis NP55-12/NP55-12FR*, manual técnico, EnerSys Inc., May 2003.
- [36] “Standard metric keys and keyways for metric bores with one key • couplings,” tabelas com as dimensões da norma ISO/R773, The Falk Corporation, Jul. 1996.
- [37] Catálogo de engrenagens, Eurocorreias, Lda., 2012.
- [38] “Bearings specification tables,” catálogo, JTEKT Corporation, 2009.



Apêndice A - código do programa

O código fonte usado na programação da placa de controlo da T2D é demasiado extenso para ser aqui listado, pelo que é fornecido num ficheiro complementar a esta dissertação. Uma cópia exata destes ficheiros, assim como outros ficheiros usados no projeto está acessível em: <https://github.com/ROVIM-T2D/ROVIM-T2D-Brain/tree/v1.0>.

Os ficheiros `main.c` e `dalf.h` são alterações aos ficheiros originais fornecidos com a placa Dalf para esta aplicação, e são licenciados pela *Embedded Electronics, LLC*.

A biblioteca `dalf.lib` é também necessária para gerar o programa, mas não é listada aqui por não ter sido alterada da versão original, por estar em formato binário, e por regras de licenciamento restritas. A licença destes ficheiros pode ser consultada no site do fornecedor, em: <http://www.embeddedelectronics.net/documents/Ver160/EULA.pdf>.

Os ficheiros listados no ficheiro são:

- `main.c`
- `dalf_ext.c`
- `dalf.h`
- `config.h`
- `p18f6722.h`
- `rovim_t2d.c`
- `rovim_t2d.h`
- `rovim.h`
- `rovim_config_t2d_development.h`

B

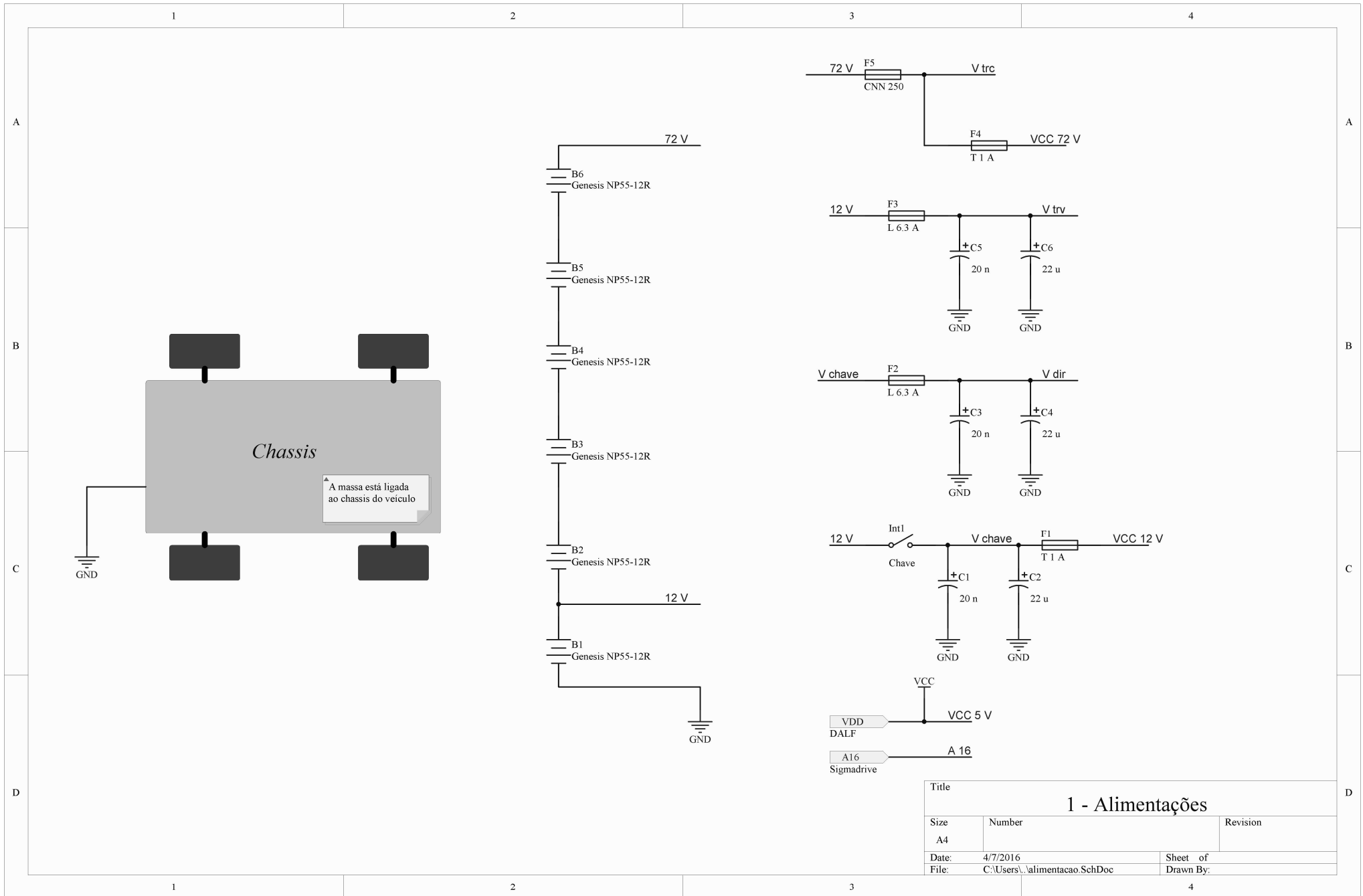
Apêndice B - Esquemas elétricos

Este apêndice inclui os esquemas elétricos dos componentes da **T2D**, que estão organizados em dois conjuntos: o sensor de velocidade e os restantes circuitos.

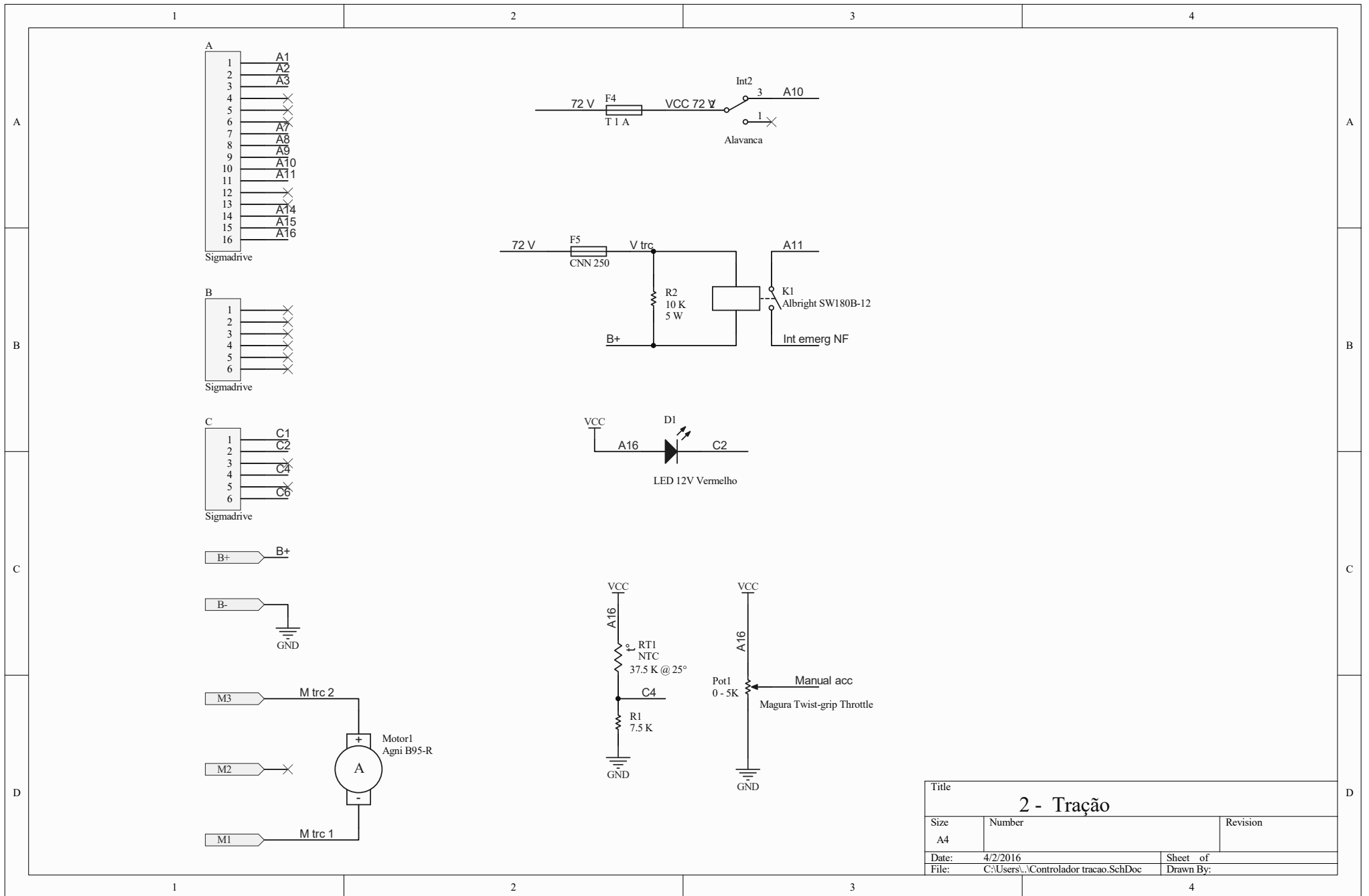
Os circuitos (à exceção do sensor de velocidade, que é uma peça única e independente) estão divididos em partes lógicas de acordo com a sua função no veículo, da seguinte forma:

- 1 - Alimentações** Baterias e outras fontes de alimentação, e sua divisão nas diferentes alimentações dos circuitos;
- 2 - Tração** Ligações do controlador da tração;
- 3 - Instrumentação** Indicadores e comandos discretos;
- 4 - Travão** Ligações de controlo do travão;
- 5 - Segurança** Circuitos de controlo do corte da alimentação dos controladores dos motores;
- 6 - Direção** Ligações do controlador da direção;
- 7 - Comutação manual/autónomo** Circuitos de seleção do modo de condução;
- 8 - Microcontrolador** Ligações de e para o controlador da **T2D**;
- 9 - Ligações placas artesanais** Ligações entre as placas dos circuitos desenvolvidos para a **T2D**.

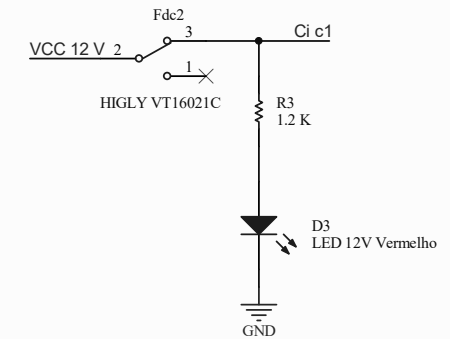
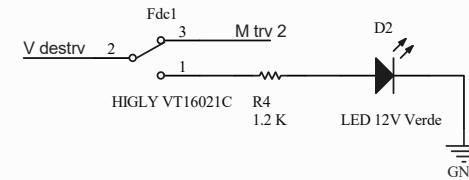
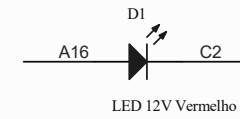
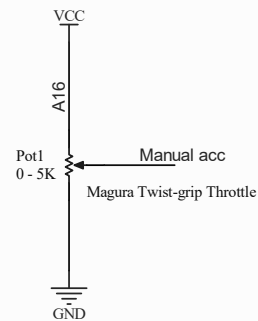
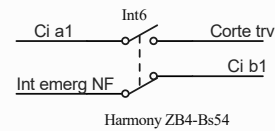
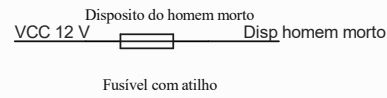
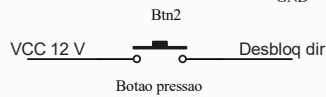
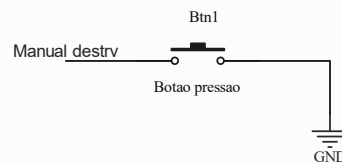
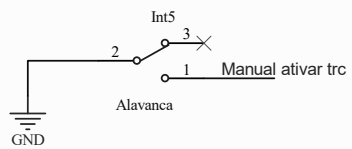
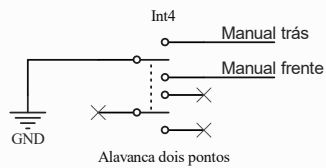
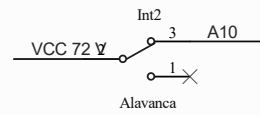
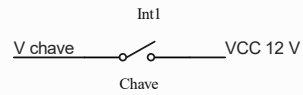
Cada nó e componente de cada conjunto de circuitos tem um identificador único, mas estes podem aparecer repetidos em mais que um esquema, de modo a facilitar a interpretação das funções desenhadas.



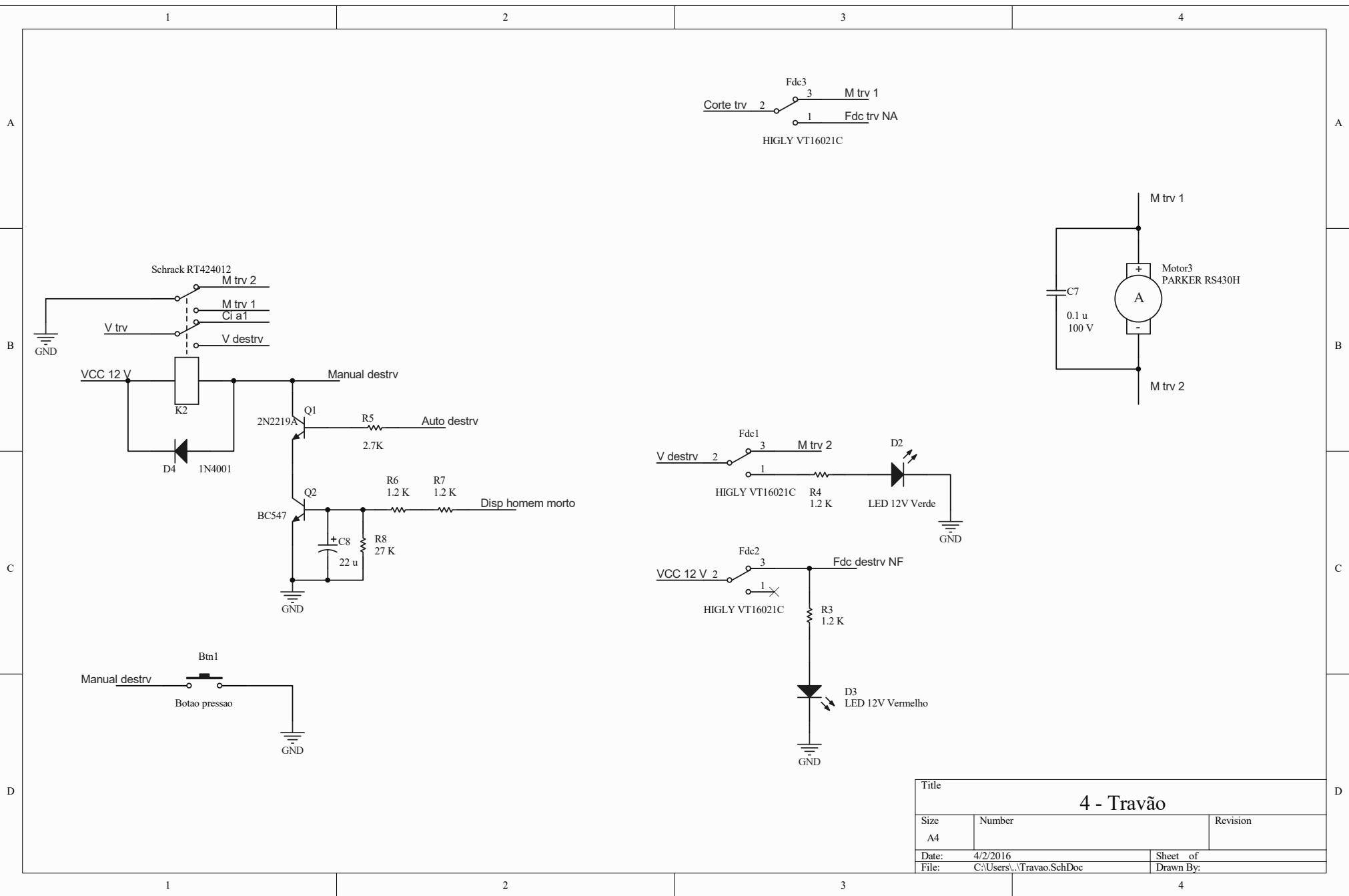
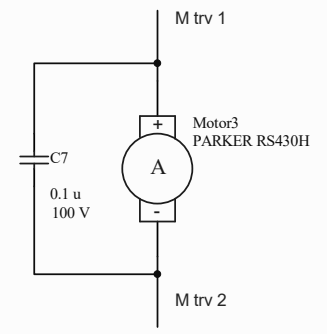
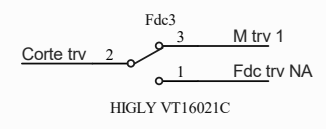
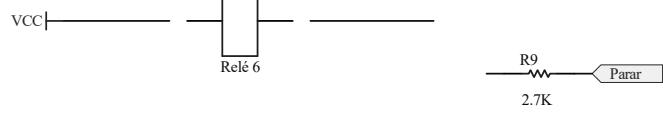
Title		
1 - Alimentações		Revision
Size A4	Number	Sheet of
Date: 4/7/2016	File: C:\Users\...alimentacao.SchDoc	Drawn By:



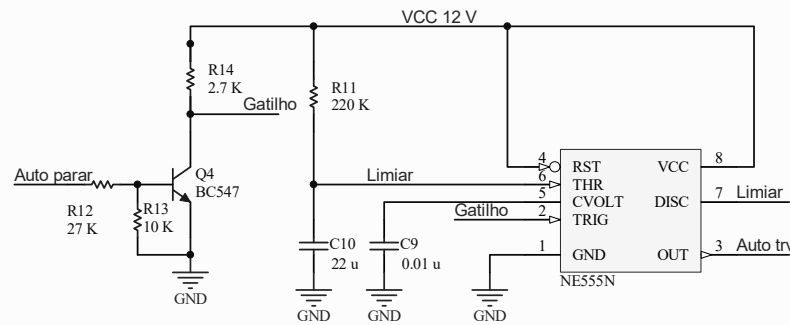
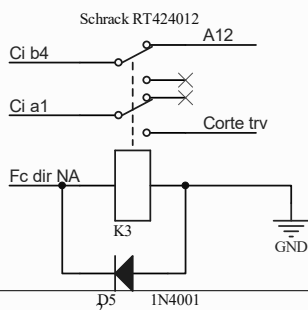
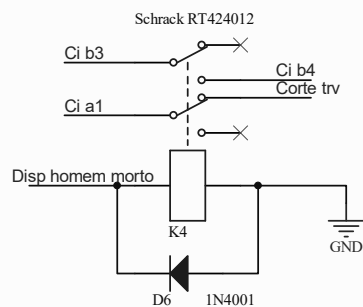
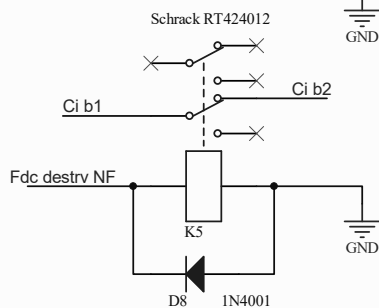
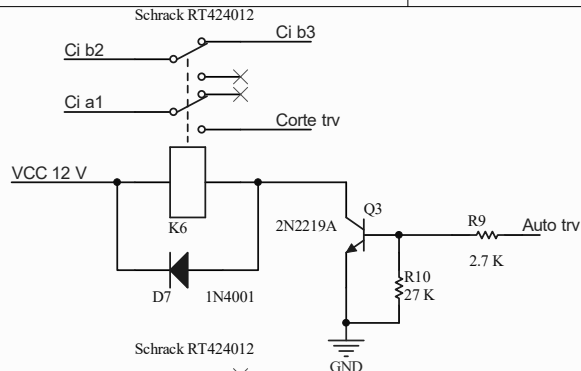
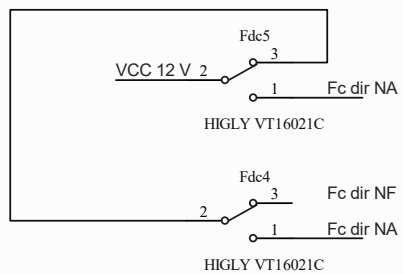
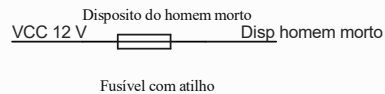
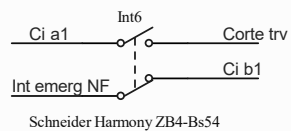
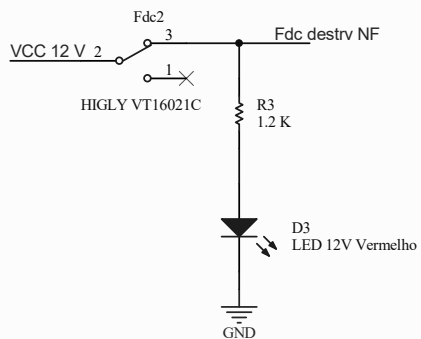
Title		
2 - Tração		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/2/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...Controlador tracao.SchDoc	Drawn By:



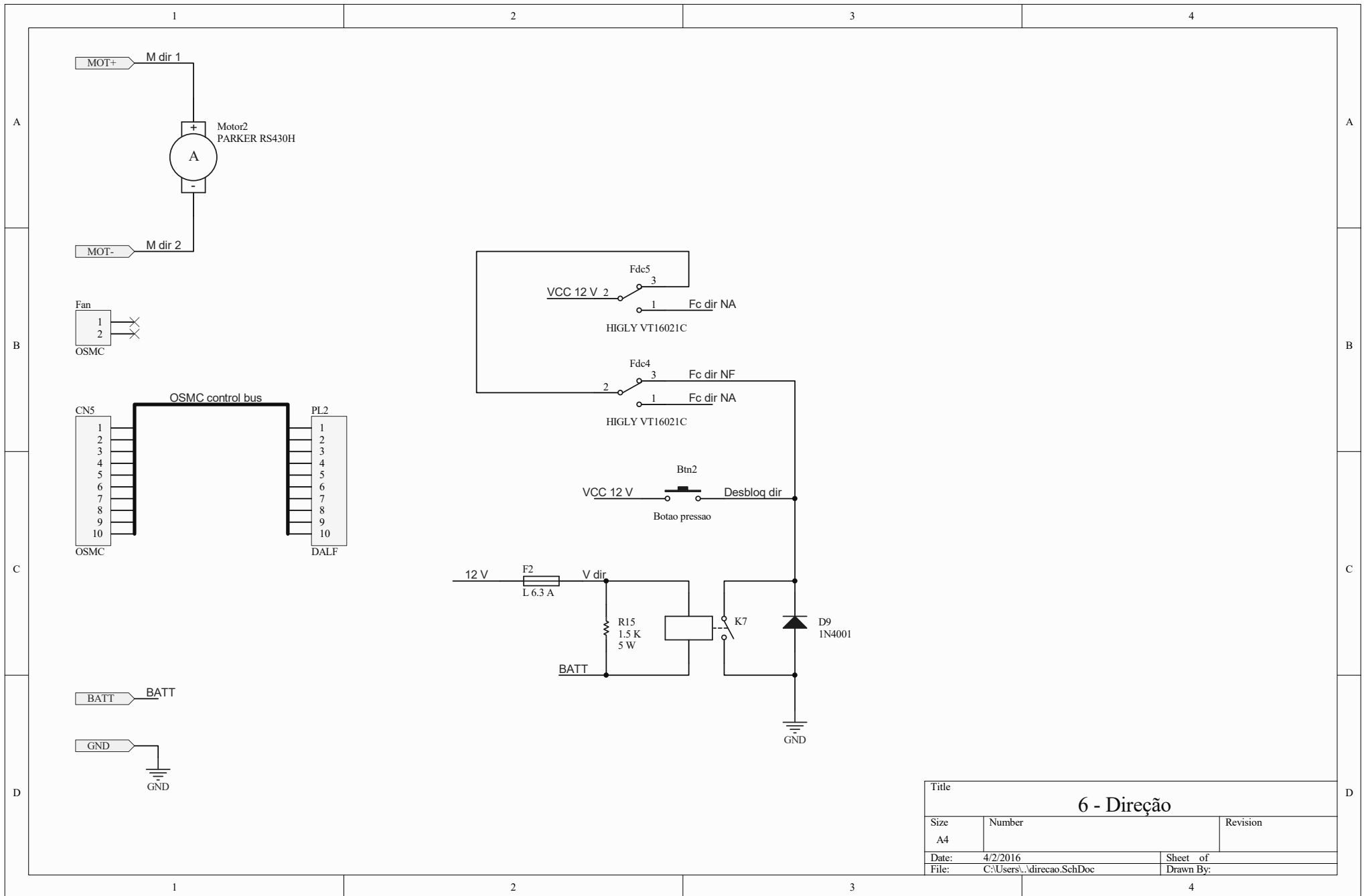
Title		
3 - Instrumentação		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/11/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...Instrumentacao.SchDoc	Drawn By:



Title		
4 - Travão		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/2/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...Travao.SchDoc	Drawn By:



Title		
5 - Segurança		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/11/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...Seguranca.SchDoc	Drawn By:



Title		
6 - Direção		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/2/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...direcao.SchDoc	Drawn By:

1

2

3

4

A

B

C

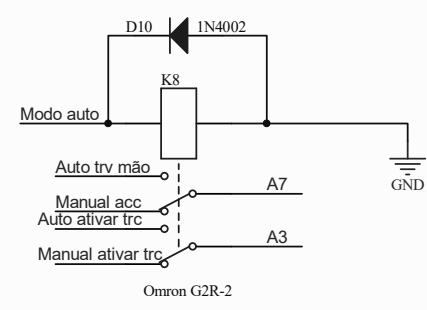
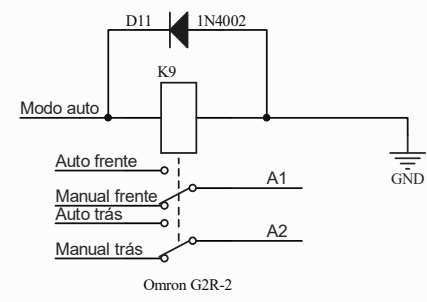
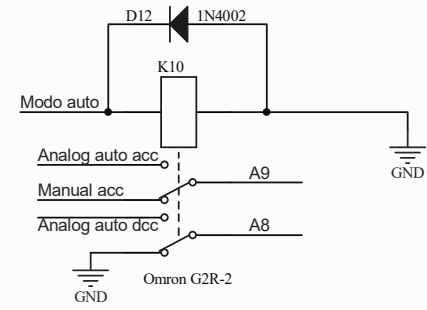
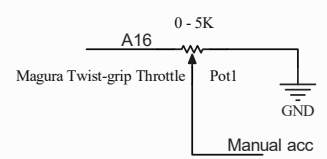
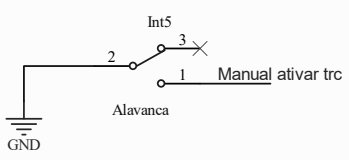
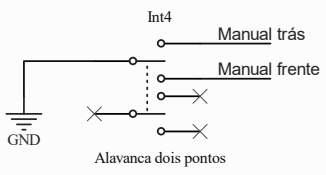
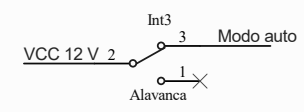
D

A

B

C

D



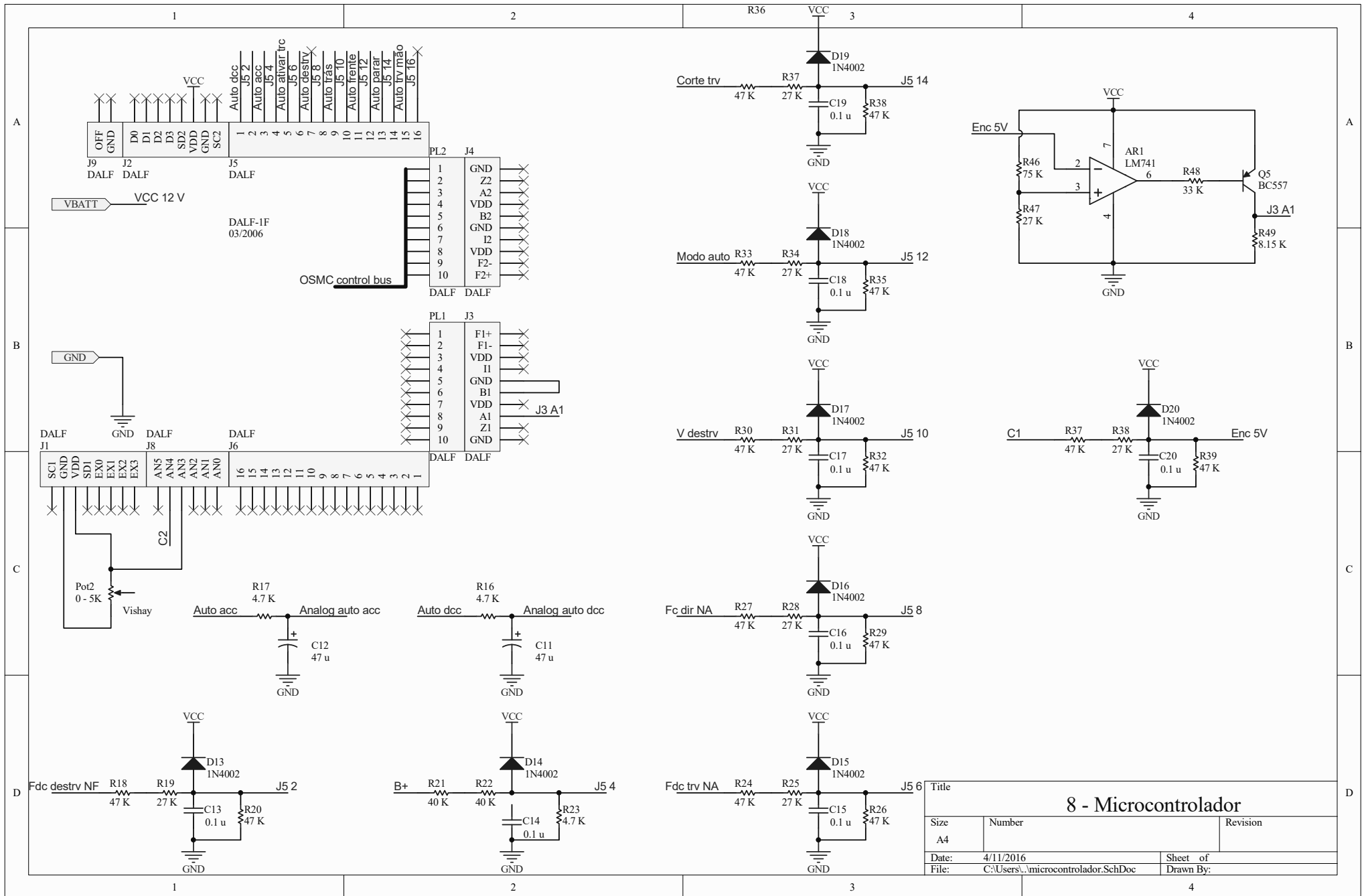
Title		
7 - Comutação manual/autônomo		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/11/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...manual auto.SchDoc	Drawn By:

1

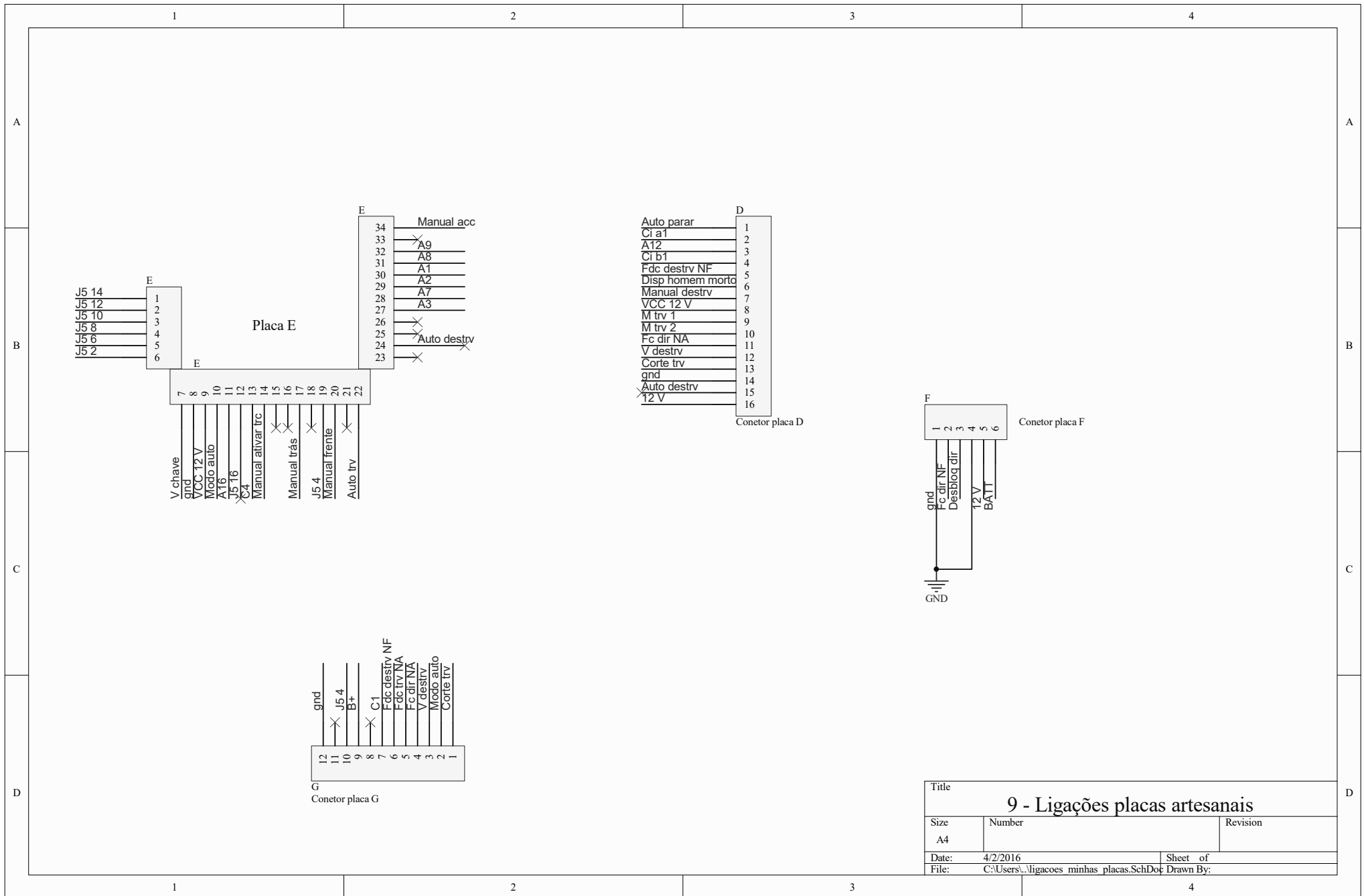
2

3

4

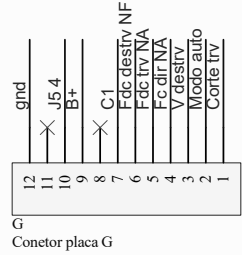
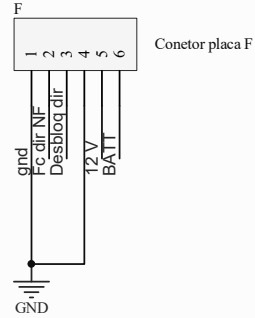


Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/11/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...microcontrolador.SchDoc	Drawn By:

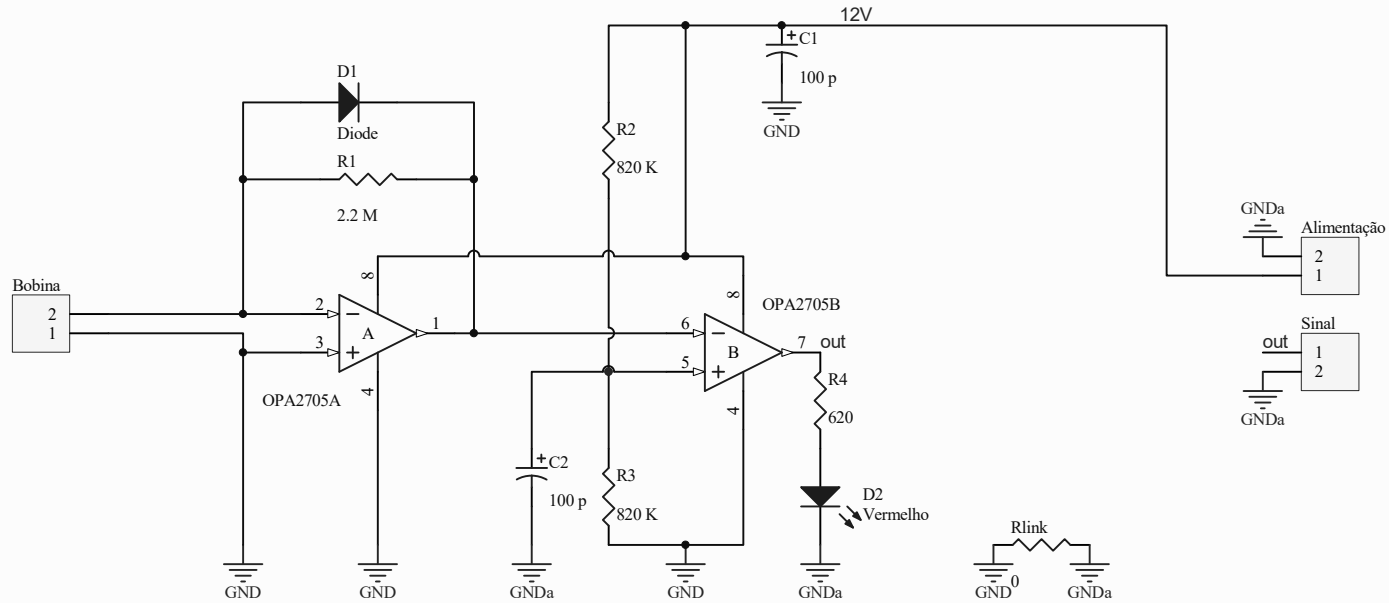
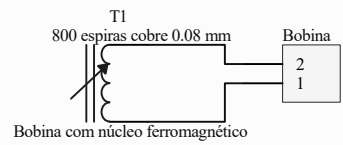


Pin	Label
1	Auto parar
2	Ci a1
3	A12
4	Ci b1
5	Fdc destrv NF
6	Disp homem morto
7	Manual destrv
8	VCC 12 V
9	M trv 1
10	M trv 2
11	Fc dir NA
12	V destrv
13	Corte trv
14	gnd
15	Auto destrv
16	12 V

Conetor placa D



Title		
9 - Ligações placas artesanais		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/2/2016	Sheet of
File:	C:\Users\...ligacoes_minhas_placas.SchDoc Drawn By:	



Title		
Encoder		
Size A4	Number	Revision
Date: 4/8/2016	Sheet of	
File: C:\Users\...\Encoder PCB.SchDoc	Drawn By:	

C

Apêndice C - Configurações

Este apêndice lista a configuração embarcada dos parâmetros configuráveis dos componentes da T2D. Estes incluem o programa do controlador da tração e o programa original do *firmware* dalf. Apenas os parâmetros alterados do *firmware* dalf são aqui listados; os restantes podem ser consultados em [23].

Os parâmetros *adjustments* do Sigmadrive PMT835M [10, capítulo 2] e o seu valor final são listados na tabela C.1.

Código	Texto programador	Valor programado
1.1	Accel	3,5 s
1.2	Decel	1,0 s
1.3	Creep	0,0 %
1.4	SpdMaxF	20,0 %
1.5	SpdMaxR	20,0 %
1.6	Sp1/Inch	50,0 %
1.7	Sp2/Time	50,0 %
1.8	Sp3	0,0 %
1.9	DBrake	150,0 A
1.10	NBrake	10,0 A
1.11	FBrake	150,0 A
1.12	DBrkRamp	3,0 s
1.13	DBrkEnd	0,5 s
1.14	NBrkRamp	3,0 s
1.15	NBrkEnd	0,0 s
1.16	RegSpd	15,0 %
1.17	MaxCurr	50,0 A
1.18	BattV	78,0 V
1.19	PStrDly	5,0 s
1.20	EBrkDly	0,5 s
1.21	AccMin	0,0 V
1.22	AccMax	5,0 V
1.23	AuxMin	0,0 V
1.24	AuxMax	5,0 V
1.25	MotMin	0,2 V
1.26	MotMax	4,8 V
1.27	VmaxSpd	32,0 km/h
1.28	BDIreset	75,0 V
1.29	BDIempty	72,0 V
1.30	BDIwarn	50,0 V
1.31	BDIcut	25,0 %
1.32	BDIspeed	100 %
1.33	DMcut	10,0 %

1.34	DMrev	75,0 %
1.35	DMspeed	75,0 %
1.36	StdByDly	0,0

Tabela C.1: Parâmetros ajustáveis do controlador Sigmadrive PMT835M.

As configurações do controlador Sigmadrive PMT835M [10, capítulo 4] e o seu valor final são listados na tabela C.2.

Código	Texto programador	Valor programado
3.1	Lin/Curv	8
3.2	Spd/Torq	0
3.3	Bpro/Off	0
3.4	Arol/Off	0
3.5	Spd/Inch	0
3.6	Spd3/Hbk	1
3.7	PsF/FR/S	0
3.8	Ride/Wlk	0
3.9	Key/Drv	0
3.10	Of/M/M&W	2
3.11	Of/D/V/K	2
3.12	InitDisp	0
3.13	MTempTyp	0
3.14	Accel 8/9	1
3.15	Si/DL/DR	0
3.16	- n/a -	0
3.17	CAN node	0

Tabela C.2: Configurações do controlador Sigmadrive PMT835M.

As configurações do motor programadas no controlador Sigmadrive PMT835M [10, capítulo 5] e o seu valor final são listados na tabela C.3.

Os campos do *parameter block* do *firmware* dalf alterados para o *software* do ROVIM e o seu valor final são listados na tabela C.4. O prefixo 0x indica que o valor está formatado em hexadecimal.

Código	Texto programador	Valor programado
4.1	TempStrt	90°
4.2	SpdRatio	201,5
4.3	SpdTeeth	36
4.4 – 4.29	- n/a -	
4.30	CurrTh	200 A
4.31	ImaxLow	130 A
4.32	IthTime	10 s
4.33	Oset1R +	10 bit
4.34	- n/a -	
4.35	Oset3F +	10 bit
4.36	Gain1R	100 %
4.37	- n/a -	
4.38	Gain3F	92 %

Tabela C.3: Configurações do controlador Sigmadrive PMT835M.

Endereço	Nome	Razão da alteração	Valor final
0x0029	VBWARN	Calibrar a alimentação usada	12000
0x002C	MAXERR	Limitar o erro do controlador à amplitude da direção	0x95
0x0037	VSP1	Maximizar o período de amostragem, devido à fraca resolução a baixas velocidades	250
0x0040	TPR1	Calibrar o sensor de velocidade	36
0x0046	MTR2_MODE1	Ativar o indicador para sensor analógico	0x32
0x0048	MTR2_MODE3	Desativar a deteção de sobrecorrente (não usada)	0x21
0x004D	VSP2	Aumentar a resolução da amostragem da posição	20
0x0054	VMIN2	Calibrar o limiar de movimentação do motor	30
0x0056	TPR2	Indicar a presença de um sensor analógico	0x0100
0x0058	MIN1	Calibrar o fim de curso de bombordo da direção	0x23
0x005A	MAX1	Calibrar o fim de curso de estibordo da direção	0xB8
0x006D	nBR	Maximizar a velocidade de transmissão da ligação série	5
0x0075	DMAX	Não é importante neste aplicação	255
0x0076	FENBL	Ativar a filtragem para AN3 e AN4	0x54
0x0077	DECAY	Frequência de corte \approx 25 Hz	80

Tabela C.4: Alterações ao *parameter block* no *software* do ROVIM.

D

Apêndice D - Lista de componentes

Id. ¹	Qt. ²	Componente	Descrição	Subsistema ³
C1	1	Chassis	Chassis, rodas, eixo traseiro com carroto de transmissão e sistemas de travagem e viragem de uma moto-quatro Suzuki quadsport It-160	Chassis
C2	Indef. ⁴	Ferro sortido	Ferro usado nas estruturas de fixação de componentes ⁵ e outras adaptações soldadas ao Chassis	Chassis
C3	Indef.	Material de fixação	Porcas, parafusos, anilhas, anilhas de mola, cavilhas e outros materiais não discriminados de diversas medidas, usados na fixação rígida dos componentes, entre si, ou ao chassis	
C4	1	Plataforma inferior	Plataforma de madeira MDF cortada, furada e escareada, à medida para a estrutura inferior	Chassis
C5	1	Mini-plataforma inferior	Plataforma de madeira MDF cortada, furada e escareada, entre a estrutura inferior e a coluna da direção	Chassis
C6	2	Tábuas de madeira	Tábuas de madeira, cortadas à medida, fixadas verticalmente à parte frontal da estrutura de suporte das plataformas, para contenção das baterias	Chassis
C7	1	Plataforma superior bombordo	Plataforma de madeira MDF cortada, furada e escareada, à medida para o lado de bombordo da estrutura superior	Chassis
C8	1	Plataforma superior estibordo	Plataforma de madeira MDF cortada, furada e escareada, à medida para o lado de estibordo da estrutura superior	Chassis
C9	7	Cantoneiras de madeira	Cantoneiras de madeira, de tamanhos diversos, coladas à plataforma inferior, para contenção das baterias ao nível da base	chassis
C10	6	Baterias NP55-12R	Baterias recarregáveis seladas de ácido-chumbo, de 12 V	Baterias
C11	4	Elásticos de retenção de cargas	Elásticos, de tamanhos diversos, com ganchos de ferro nas pontas, para abraçar e conter as baterias ao nível do topo	
C12	1	Carregador de baterias 12 V	Carregador de baterias de ácido-chumbo de 12 V	
C13	1	Carregador de baterias 72 V	Carregador de baterias de ácido-chumbo de 72 V	
C14	1	Agni B-95R	Motor DC com escovas	
C15	1	Carreto de 11 dentes	Carreto compatível com o carreto instalado no veio traseiro	Redutor da tração
C16	2	Engrenagens dentes	42 Engrenagens cilíndricas, de módulo 2, ângulo de pressão de 20°, material C 43 UNI 7847, de acordo com o catálogo eurocorreias 2012 [37]	Redutor da tração
C17	1	Engrenagem dentes	21 Engrenagem cilíndrica, de módulo 2, ângulo de pressão de 20°, material C 43 UNI 7847, de acordo com o catálogo eurocorreias 2012 [37]	Redutor da tração
C18	1	Engrenagem dentes	14 Engrenagem cilíndrica, de módulo 2, ângulo de pressão de 20°, material C 43 UNI 7847, de acordo com o catálogo eurocorreias 2012 [37]	Redutor da tração
C19	2	Rolamentos Koyo 6001	Rolamentos ranhurados de esferas, como especificação do catálogo Koyo [38]	Redutor da tração

¹Identificação

²Quantidade

³Peça a que o componente pertence, se aplicável

⁴Quantidade indefinida

⁵Que são: 1) Estrutura central de fixação das plataformas; 2) estrutura de suporte do redutor da direção; 3) estrutura de fixação do motor da tração; 4) estrutura de fixação do sensor de velocidade; 5) estrutura de fixação do sensor de posição

C20	2	Rolamentos Koyo 6003	Rolamentos ranhurados de esferas, como especificação do catalogo Koyo [38]	Redutor da tração
C21	1	Chave de veio	Chave para fixação de engrenagem ao veio do motor de tração, de acordo com a norma ISO/R773 [36]	Redutor da tração
C22	1	Espaçador para veio	Espaçador para segurar engrenagem no veio do motor	Redutor da tração
C23	1	Fixador para carreto	Bolacha com furo para fixar carreto acoplado ao redutor no veio	Redutor da tração
C24	1	Chapa motor	Chapa estrutural de fixação dos componentes do redutor do motor, de acordo com o desenho "chapa motor" do apêndice D	Redutor da tração
C25	1	Chapa corrente	Chapa estrutural de fixação dos componentes do redutor do motor, de acordo com o desenho "chapa corrente" do apêndice D	Redutor da tração
C26	1	Veio 16 mm	Veio de fixação de engrenagens do redutor do motor, de acordo com o desenho "veio 16.12" do apêndice D	Redutor da tração
C27	1	Veio 17 mm	Veio de fixação de engrenagens do redutor do motor, de acordo com o desenho "20.23" do apêndice D	Redutor da tração
C28	Indef.	Material de fixação do redutor	Freio, parafusos, anilhas e anilhas de mola de diversas medidas usadas na fixação dos componentes do redutor do motor de tração	Redutor da tração
C29	1	Corrente	Corrente original da moto-quatro	
C30	1	PCB sensor	Placa eletrônica, de cerca de 11 mm por 22 mm com o circuito do esquema Encoder impresso (exceto bobina e núcleo)	Svel. ⁶
C31	1	OPA 2705 Surface Mount Device (SMD)	Amplificador operacional <i>rail-to-rail</i>	Svel.
C32	2	C 100 pF SMD	Condensadores de polímero	Svel.
C33	1	R 2,2 MΩ SMD	Resistência	Svel.
C34	2	R 820 kΩ SMD	Resistências	Svel.
C35	1	R 620 Ω SMD	Resistência	Svel.
C36	1	LED vermelho SMD	LED	Svel.
C37	1	Díodo SMD	Díodo de retroação	
C38	4	Pinos SMD	Pinos conetores para soldar em placa SMD	Svel.
C39	1	Bobina artesanal	Bobina em fio de cobre de 0,08 mm com 800 espiras	Svel.
C40	1	Enrolador bobina	Enrolador oco, de cerca de 10 mm de diametro exterior, onde assemam espiras de uma bobina	Svel.
C41	1	Ímã neodímio	Ímã permanente cilíndrico, de cerca de 10 mm de diametro, para sensor de relutância variável	Svel.
C42	1	Núcleo ferromagnético	Material ferromagnético cilíndrico para sensor de relutância variável	Svel.
C43	1	Tubo PVC	Tubo de PVC com cerca de 5 cm de comprimento, oco, de cerca de 12 mm de diametro interior	Svel.
C44	1	Cabo de fita	Cabo de fita, de 3 fios, com ≈ 5 cm de comprimento	Svel.
C45	1	Adaptador velocidade sensor	Adaptador de ferro, feito sob medida, para fixar o sensor de velocidade no suporte	
C46	1	Braçadeira mangueira	Braçadeira para mangueira de jardim	

⁶Sensor de velocidade

C47	1	Plataforma travão		Plataforma em chapa de 2 mm para fixar em cima da forquilha traseira, onde assenta o motor do travão
C48	4	Anilhas borracha		Anilhas com cerca de 3 mm de espessura, para fixar na plataforma do travão
C49	2	Parker RS430H		Servomotores DC
C50	1	Braçadeira topo motor		Fixador em chapa, feito sob medida, para fixar o topo do motor do travão à forquilha e à plataforma
C51	1	Braçadeira trás motor		Braçadeira em chapa, feita sob medida, para fixar o corpo do motor do travão à forquilha traseira e à plataforma
C52	1	Adaptador parafuso	veio-	Adaptador cilíndrico em latão com rosca concêntrica M10 de um topo e furo $\varnothing 11$ mm concêntrico do outro, e furo radial $\varnothing 4$ mm alinhado com furo no veio do motor onde prende
C53	1	Varão roscado M10		Parafuso sem fim do travão, com cerca de 40 cm de comprimento
C54	1	Pivô travão		Peça, feita sob medida, com rosca longitudinal M10, com duas saliências laterais, para prender ao parafuso sem fim do travão
C55	1	Fixador travão-pivô		Conjunto agregador do pivô e alavanca do travão, constituído por: parafuso e porca M12x50 mm, espaçador $\varnothing 12$ mm, duas barras ferro 40x5 mm furadas em ambas as pontas
C56	1	Guia do travão		Peça feita sob medida que engata no fixador travão-pivô e corre ao longo do suporte dos sensores de fim de curso e os ativa
C57	5	HIGLY VT16021C		Sensores de fim de curso de alavanca
C58	Indef.	Material travão	fixação	Parafusos, rebites, anilhas, anilhas de mola e porcas de diversas medidas usados na fixação dos componentes do travão
C59	1	STM RMI S28		Redutor de parafuso sem fim e coroa, de relação de redução de 49
C60	1	Polia 27 T 5 30 [19]		Polia dentada passe métrico "T5" – DIN 7721–2, material alumínio UNI 9006 – T6, 30 dentes, 16 mm espessura
C61	1	Polia 27 T 5 60 [19]		Polia dentada passe métrico "T5" – DIN 7721–2, material alumínio UNI 9006 – T6, 60 dentes, 16 mm espessura
C62	1	Correia T5 460 mm		Correia dentada de passe métrico "T5", de 460 mm de perímetro
C63	1	Veio para redutor		Veio em latão, feito sob medida, para acoplar ao redutor da direção, e onde fixa a polia C60
C64	1	Engrenagem dentes	120	Engrenagem cilíndrica, de módulo 1, ângulo de pressão de 20°, material C 43 UNI 7847, de acordo com o catálogo eurocorreias 2012 [37]
C65	1	Engrenagem dentes	12	Engrenagem cilíndrica, de módulo 1, ângulo de pressão de 20°, material C 43 UNI 7847, de acordo com o catálogo eurocorreias 2012 [37]
C66	1	Potenciómetro 5 k Ω		Potenciómetro de três voltas, 5 k Ω Vishay
C67	2	Parafusos M4x35		Parafusos para batente de fim de curso
C68	Indef.	Material direção	fixação di-	Parafusos, porcas, anilhas, anilhas de mola, barras de metal e cavilhas de diversas medidas usados na fixação dos componentes da direção
C69	1	Sigmadrive PMT835M		Controlador de motor DC de 4 quadrantes
C70	1	Agni B95-R		Motor DC de ímãs permanentes de fluxo axial
C71	1	Albright SW180B-12		Contator de DC de 80 V

C72	1	Fusível ANL	CNN250	Fusível de encaixe ANL de 250 A	
C73	1	Porta fusível ANL		Encaixe ANL para fusível	
C74	1	Resistência 5 W	10 k Ω	Resistência de pré-carga	
C75	1	Acelerador punho		Acelerador de punho direito potenciométrico, de 5 k Ω	
C76	1	Schneider BS54	ZB4	Botão de emergência com contacto normalmente fechado	
C77	1	Schneider BZ105	ZB4	Contacto normalmente aberto para botão Schneider ZB4 BS54	
C78	2	Fusíveis 6,3 A	5 \times 20	Fusíveis de 6,3 A, de 5 mm \times 20 mm	
C79	2	Fusível 522.717	ESKA	Fusível cerâmico de 1 A, de 5 mm \times 20 mm, I ² S=1,10	
C80	1	Fusível 6 \times 32	1 A	Fusível de 1 A, de 6 mm \times 32 mm	H.morto ⁷
C81	3	Guita		Guita de \approx 3 m para acionamento do dispositivo do homem morto	H.morto
C82	1	Encaixe para fusível 6 \times 32		Engate do dispositivo do homem morto	H.morto
C83	1	Caixa de arrumação		Caixa de arrumação de plástico transparente, de cerca de 25 cm \times 25 cm \times 50 cm com tampa	
C84	1	Painel de instrumentação		Cantoneira em chapa para fixagem de instrumentação de painel	
C85	2	Placas de acrílico		Placas de acrílico para fixação das placas eletrônicas	
C86	1	Dalf 1-F		Placa de microcontrolador	Micro Controlador (μ C)
C87	1	OSMC v4.24		Ponte em H para comando de motores DC	
C88	1	Cabo de fita 10 fios		Cabo de fita, de 10 fios, com cerca de 20 cm, fêmea-fêmea	
C89	1	Cabo de fita 16 fios		Cabo de fita, de 16 fios, com cerca de 20 cm, com conector fêmea numa ponta	
C90	4	PCB 115x160		PCB de 115 mm \times 160 mm	
C91	2	LEDs vermelhos		LEDs <i>through-hole</i> de 12 V vermelhos	
C92	1	LED verde		LED <i>through-hole</i> de 12 V verde	
C93	6	Díodos 1N4001		Díodos retificadores <i>through-hole</i>	
C94	11	Díodos 1N4002		Díodos retificadores <i>through-hole</i>	
C95	4	R 1,2 k Ω		Resistências <i>through-hole</i> 1/4 W	
C96	1	R 1,5 k Ω 5 W		Resistência de potência <i>through-hole</i>	
C97	3	R 2,7 k Ω		Resistências <i>through-hole</i> 1/4 W	
C98	2	R 4,7 k Ω		Resistências <i>through-hole</i> 1/4 W	
C99	1	R 7,5 k Ω		Resistência <i>through-hole</i> 1/4 W	
C100	1	R 8,15 k Ω		Resistência <i>through-hole</i> 1/4 W	
C101	1	R 10 k Ω		Resistência <i>through-hole</i> 1/4 W	
C102	10	R 27 k Ω		Resistências <i>through-hole</i> 1/4 W	

⁷Dispositivo do homem morto

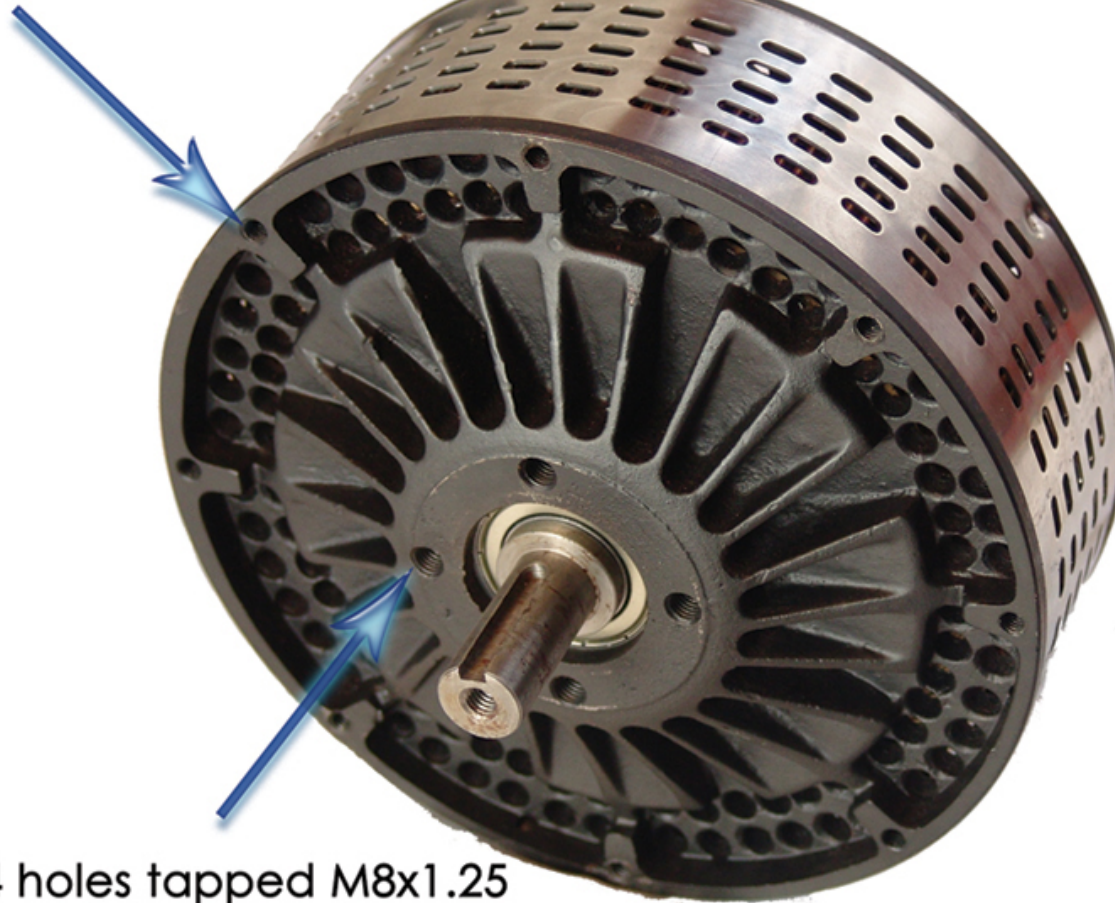
C103	1	R 33 kΩ	Resistência <i>through-hole</i> 1/4 W
C104	2	R 40 kΩ	Resistências <i>through-hole</i> 1/4 W
C105	15	R 47 kΩ	Resistências <i>through-hole</i> 1/4 W
C106	1	R 75 kΩ	Resistência <i>through-hole</i> 1/4 W
C107	1	R 220 kΩ	Resistência <i>through-hole</i> 1/4 W
C108	1	C 0,01 μF 100 V	Condensador polímero <i>through-hole</i>
C109	1	C 0,01 μF	Condensador eletrolítico <i>through-hole</i>
C110	3	C 20 nF	Condensadores eletrolíticos <i>through-hole</i>
C111	6	C 0,1 μF	Condensadores eletrolíticos <i>through-hole</i>
C112	3	C 20 μF	Condensadores eletrolíticos <i>through-hole</i>
C113	2	C 22 μF	Condensadores eletrolíticos <i>through-hole</i>
C114	3	C 47 μF	Condensadores eletrolíticos <i>through-hole</i>
C115	1	LM741	Amplificador operacional <i>through-hole</i>
C116	1	NE555	Temporizador <i>through-hole</i> de uso genérico
C117	2	2N2219A	TJBs NPN <i>through-hole</i> de elevada corrente
C118	2	BC547	TJBs NPN <i>through-hole</i> para comutação e amplificação
C119	2	BC557	TJBs PNP <i>through-hole</i> para comutação e amplificação
C120	6	Schrack RT424012	Relés PCB <i>Double Pole Double Throw (DPDT)</i> de 12 V 8 A
C121	3	Omron G2R-2	Relés PCB <i>DPDT</i> de 12 V
C122	1	Interruptor chave	Interruptor com chave unipolar 1 A de painel
C123	2	Botões de pressão	Botões unipolares <i>Single Pole Single Throw (SPST)</i> 1 A de painel
C124	3	Interruptores alavanca	Interruptores de alavanca de painel <i>DPDT ON-ON</i> 3 A
C125	1	Interruptor alavanca	Interruptor de alavanca de painel <i>Single Pole Triple Throw (SP3T) ON-OFF-ON</i> 3 A
C126	Indef.	Manga termoretrátil	Manga termoretrátil de várias dimensões
C127	Indef.	Cabo de corrente preto	Cabo elétrico de elevado calibre , preto
C128	Indef.	Cabo de corrente vermelho	Cabo elétrico de elevado calibre , vermelho
C129	Indef.	Fio de microfone	Fio para microfone, blindado
C130	Indef.	Fio elétrico diverso	Fio elétrico de diversos calibres e cores, unifilar e multifilar, usado nas ligações elétricas
C131	Indef.	Etiquetas autocolantes	Etiquetas autocolantes
C132	Indef.	Bornes diversos	Bornes de diversas medidas e feitios usados nas ligações elétricas
C133	3	Fichas microfone	Pares de fichas fêmea e macho blindadas, para cabo de microfone
C134	1	Ficha 16 pinos	Ficha Molex <i>SMD</i> Micro Fit 3.0 fêmea, de 16 pinos
C135	1	Ficha 6 pinos	Ficha Molex <i>SMD</i> Micro Fit 3.0 fêmea, de 6 pinos

E

Apêndice E - desenhos técnicos das peças do redutor do motor de tração

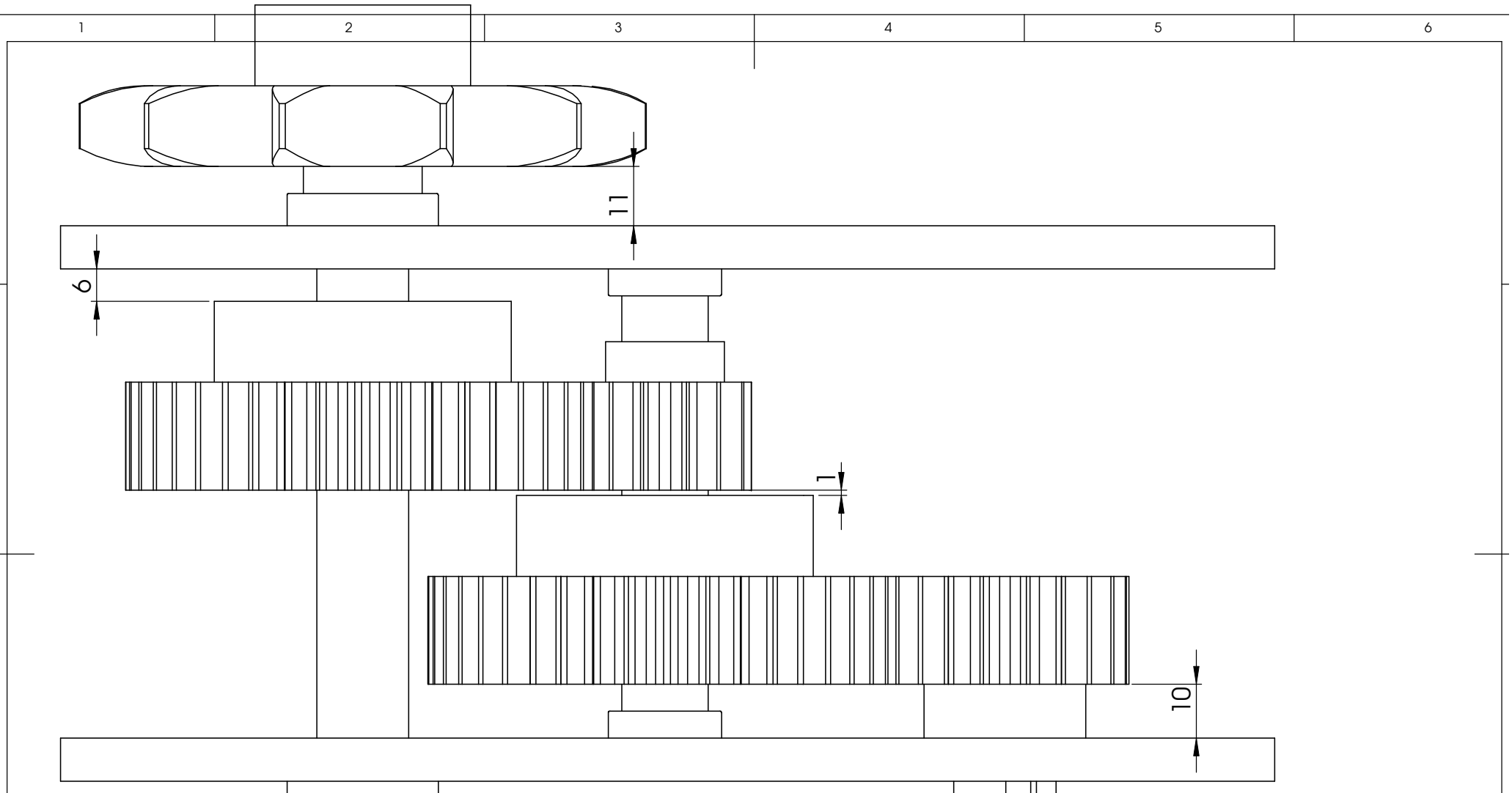
INSTALLATION DIMENSIONS

8 holes tapped M6x1.0
on 194mm PCD



4 holes tapped M8x1.25
on 60mm PCD

Shaft - 19mm diameter x 40mm long
with ISO keyway & centre
hole tapped M8x1.25



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

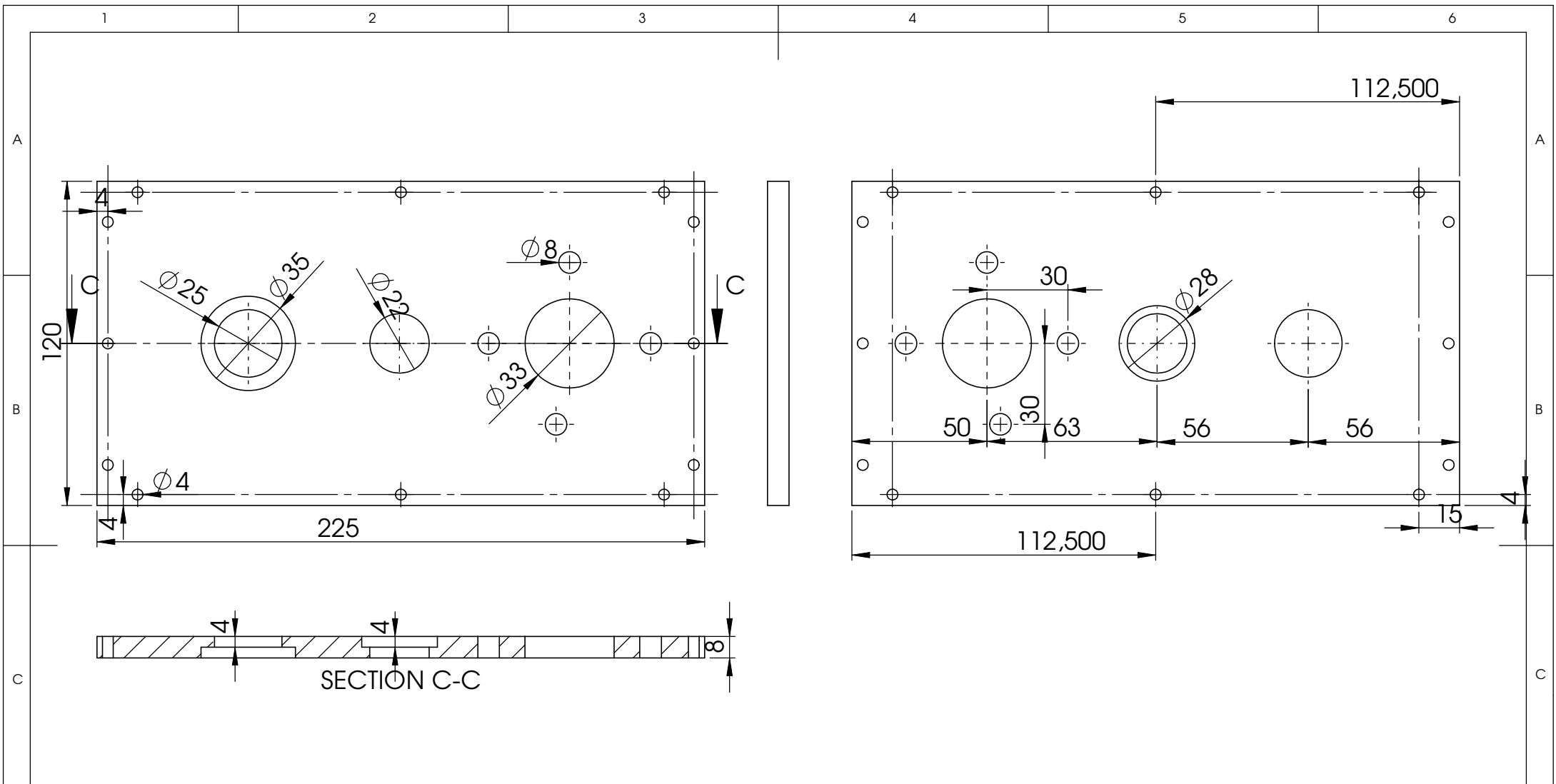
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

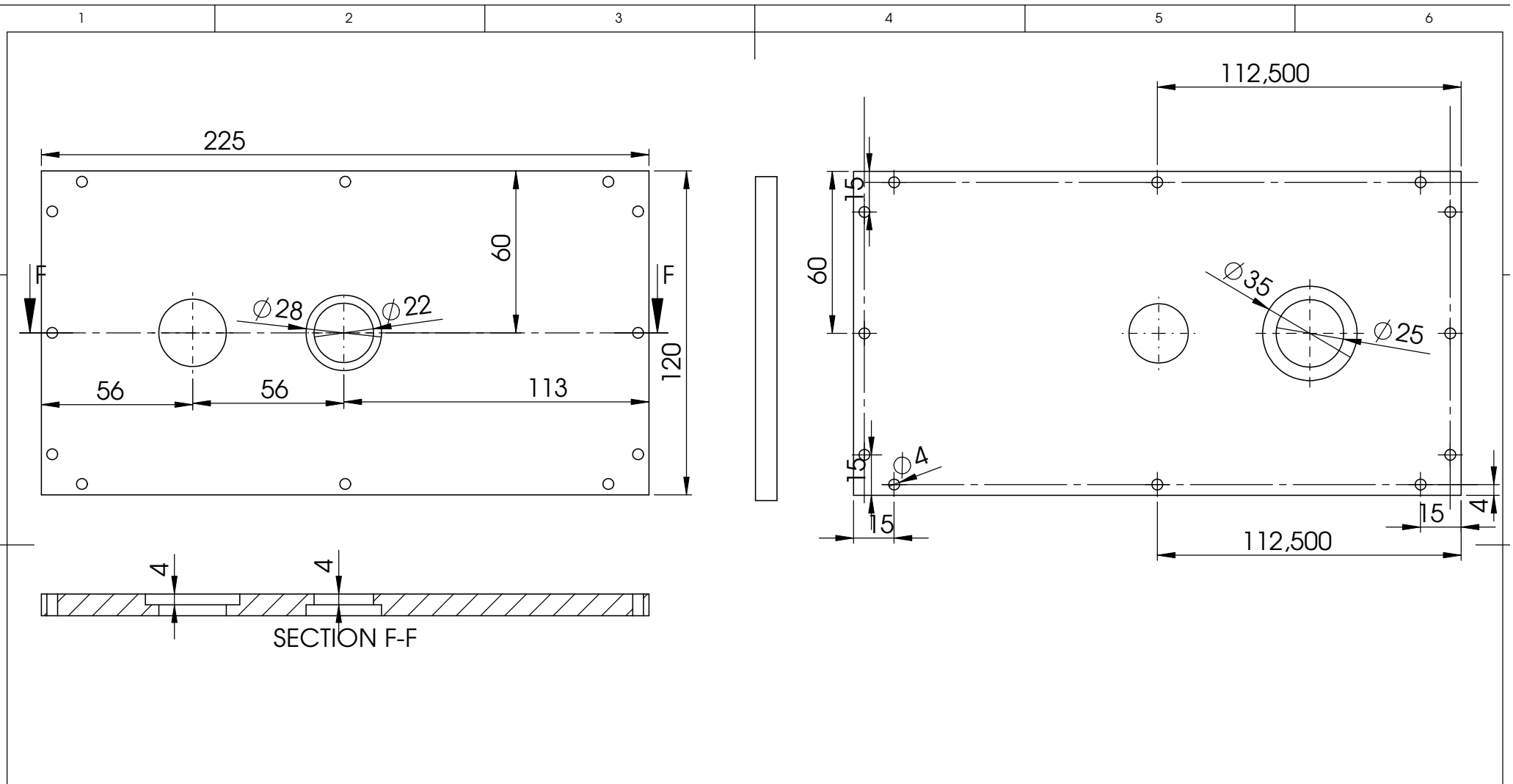
	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN						
CHKD						
APPVD						
MFG						
Q.A						
					MATERIAL:	
					WEIGHT:	

TITLE:

DWG NO. **montagem** A4
 SCALE:1:5 SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
		NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHKD											
APPV'D											
MFG											
Q.A					MATERIAL:			DWG NO.		A4	
								chapa motor			
					WEIGHT:			SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A						MATERIAL:		DWG NO. chapa corrente A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:2 SHEET 1 OF 1	

1 2 3 4 5 6

A

A

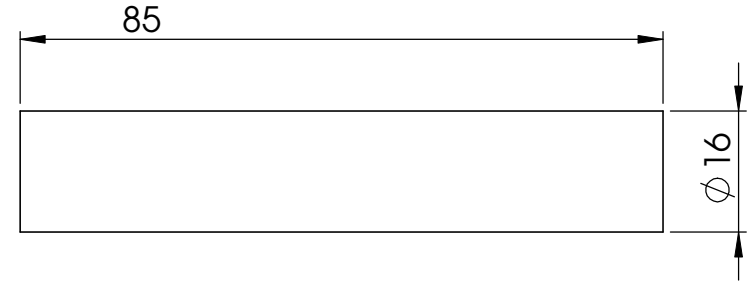
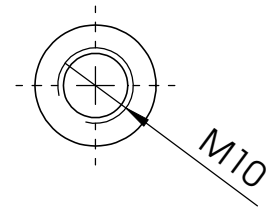
B

B

C

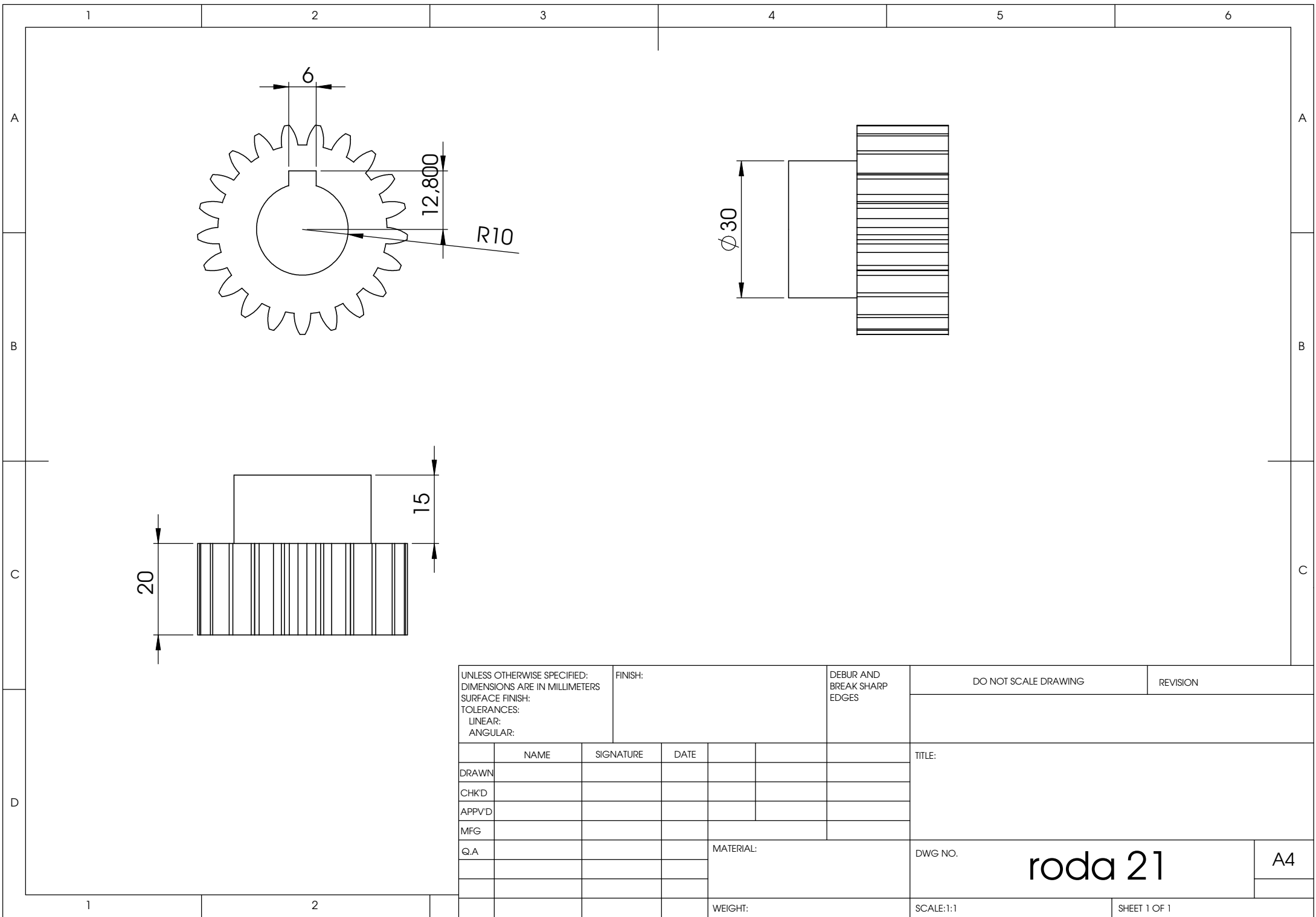
C

D

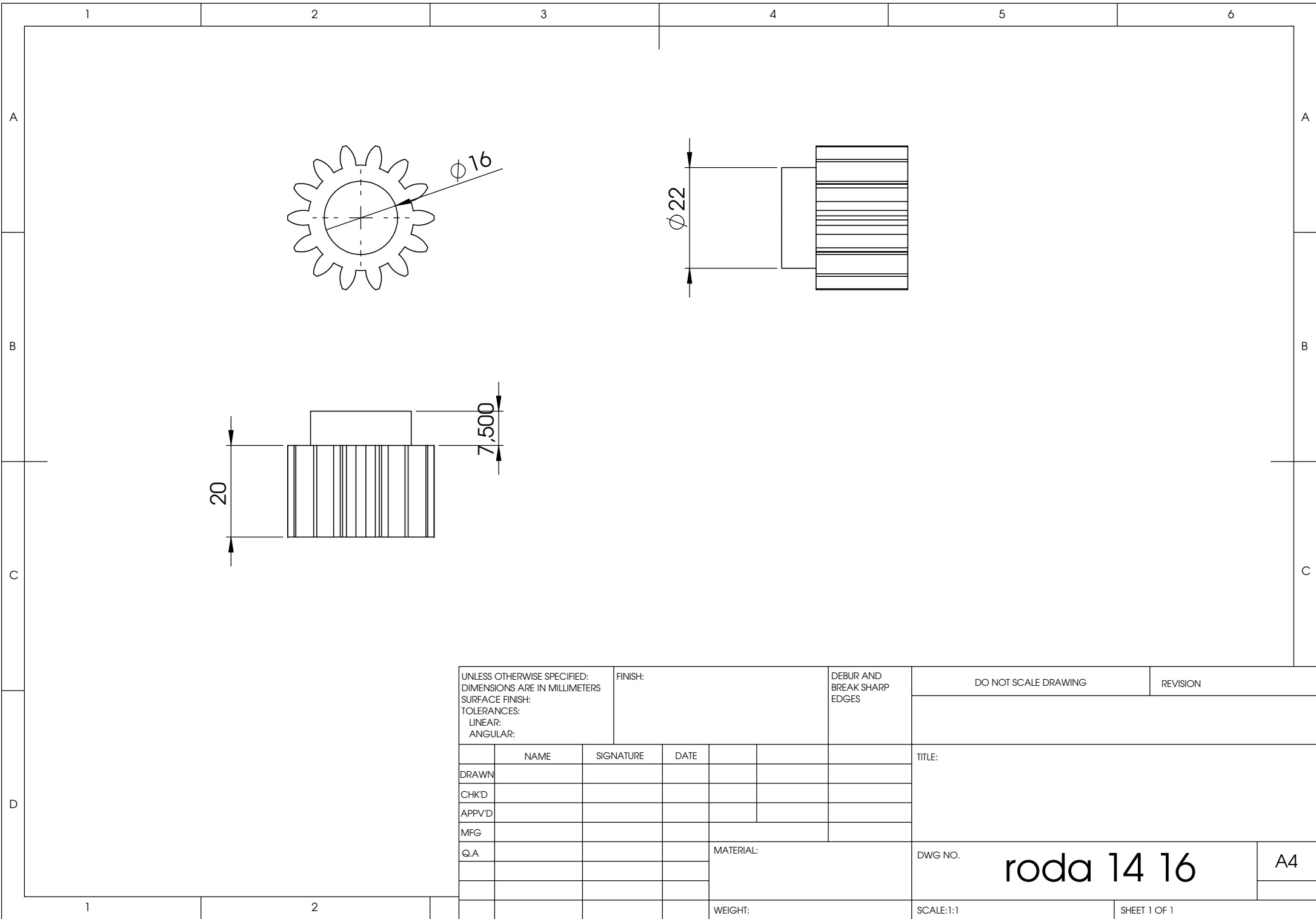


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN									
CHKD									
APPV'D									
MFG									
Q.A					MATERIAL:	DWG NO.		5	
						espaçador chapa		A4	
					WEIGHT:	SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	

1 2



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:					
DRAWN											
CHKD											
APPV'D											
MFG											
Q.A											
					MATERIAL:	DWG NO.		roda 21			A4
						SCALE:1:1					
					WEIGHT:						



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHKD					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

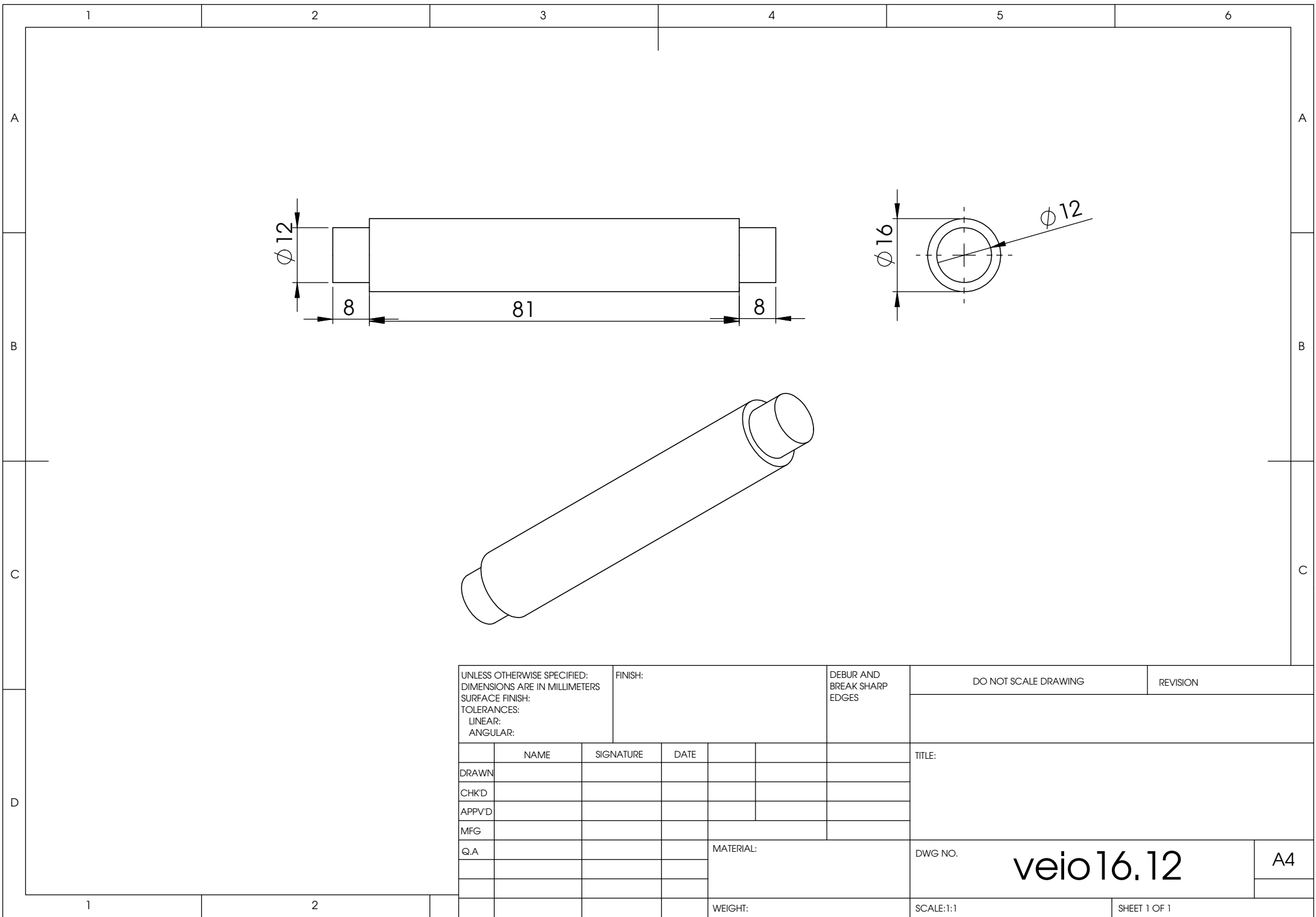
TITLE:

DWG NO. **roda 14 16** A4

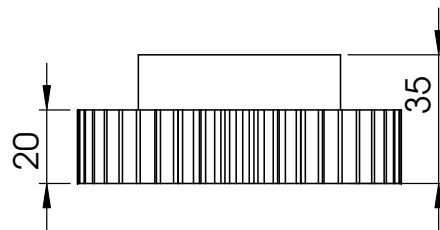
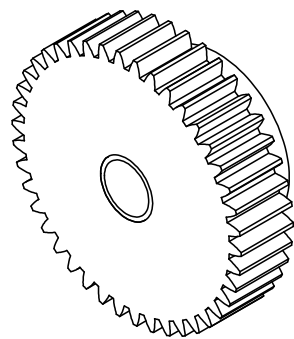
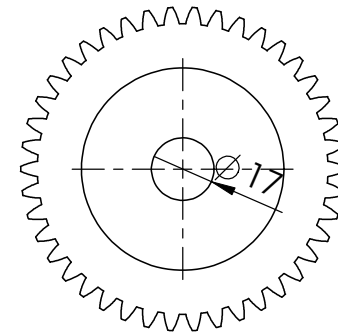
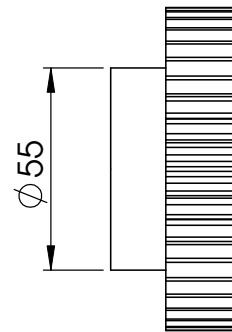
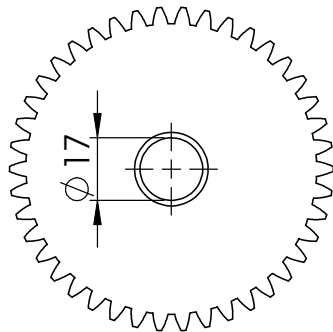
WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN									
CHKD									
APPV'D									
MFG									
Q.A					MATERIAL:	DWG NO.		veio16.12	
								A4	
					WEIGHT:	SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

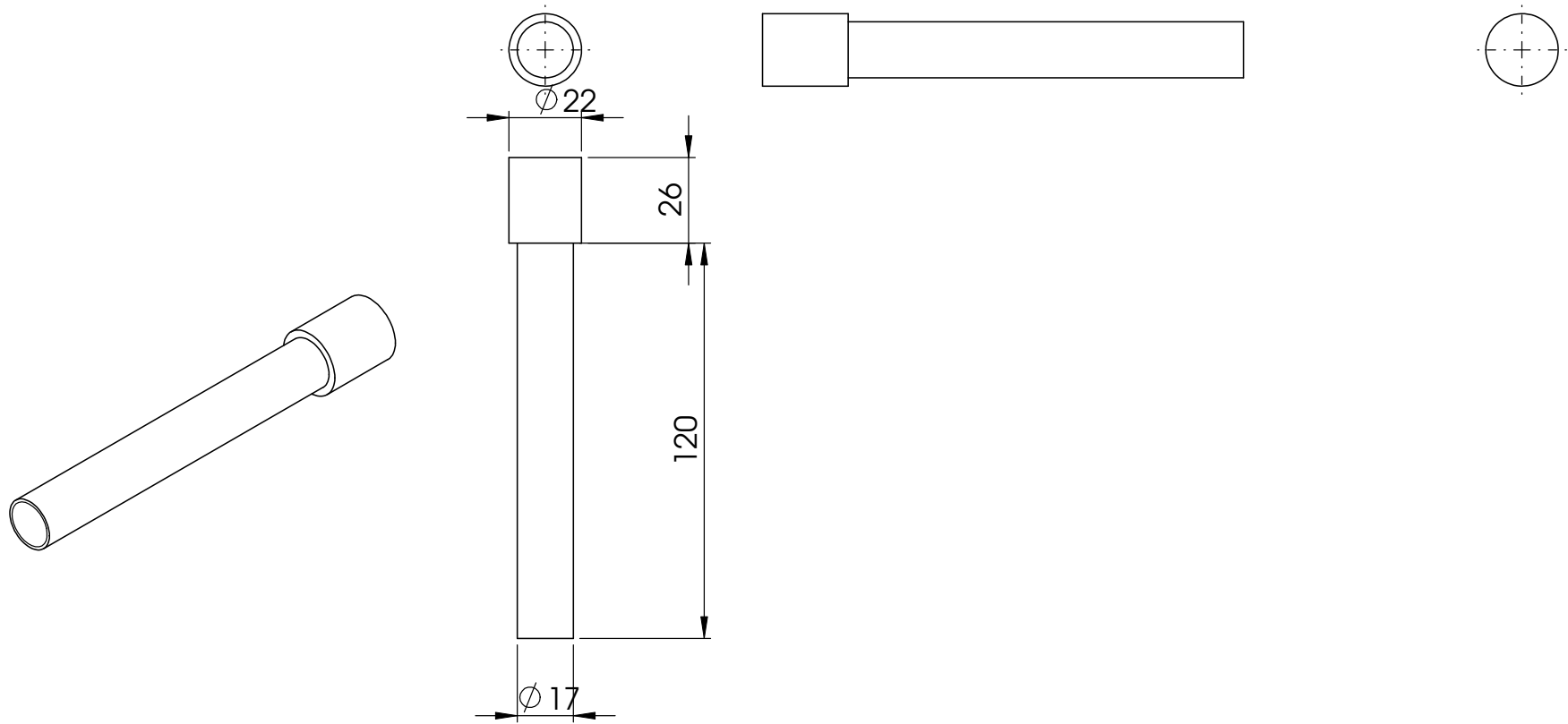
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

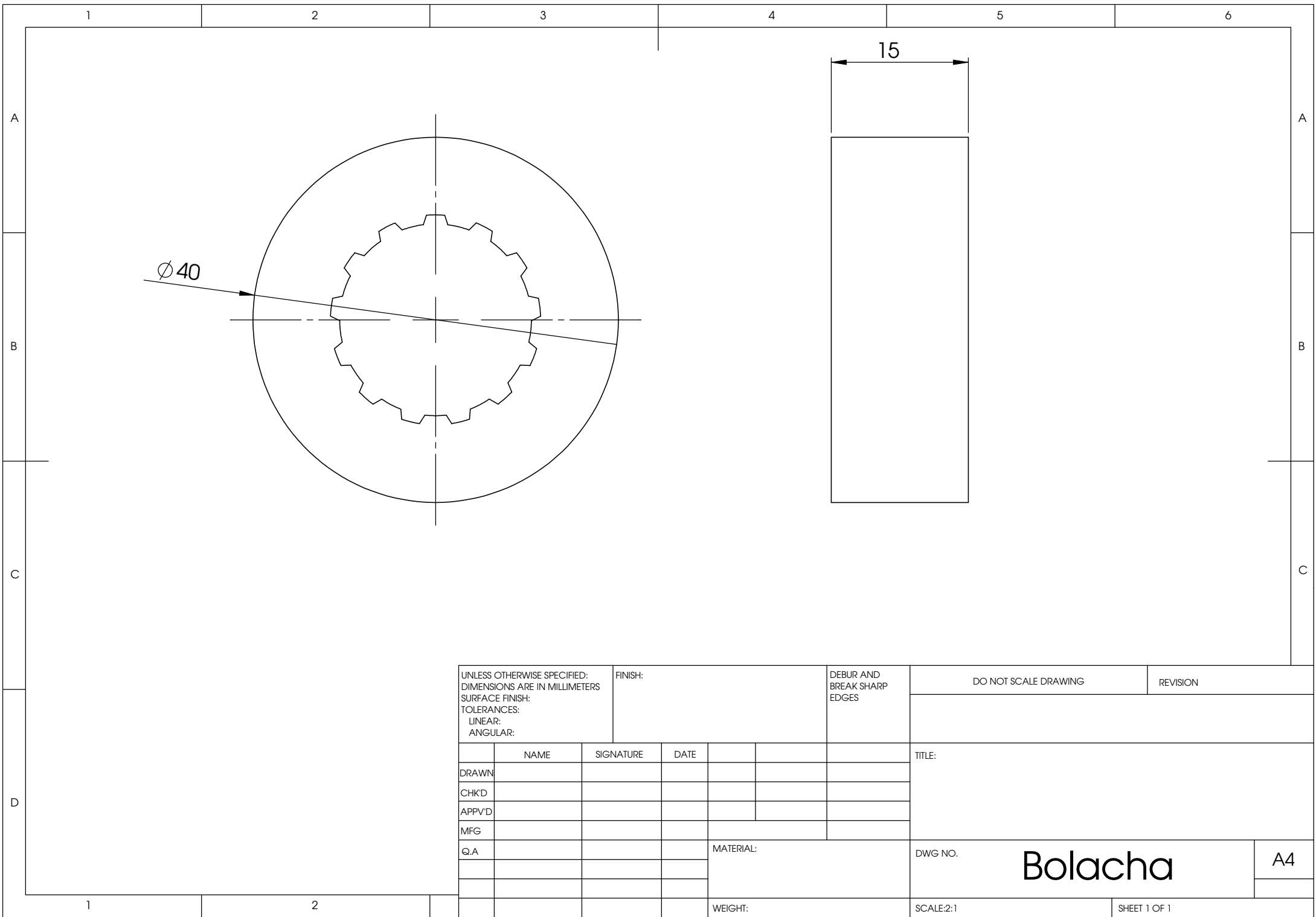
	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN						
CHKD						
APPVD						
MFG						
Q.A						
					MATERIAL:	
					WEIGHT:	

TITLE:	
DWG NO.	roda 42 20
SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

A4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN									
CHKD									
APPVD									
MFG									
Q.A					MATERIAL:	DWG NO.		20.23	
						SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	
					WEIGHT:			A4	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:					
DRAWN											
CHKD											
APPV'D											
MFG											
Q.A											
					MATERIAL:	DWG NO.		Bolacha			A4
					WEIGHT:	SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1			

Os desenhos deste anexo são uma especificação aproximada do redutor *à priori*, com as limitações inerentes à falta de experiência do projetista. Não contemplam alguns pormenores técnicos avançados, como tolerâncias nos encaixes, materiais a usar, e mecanismos de fixação. Como tal, o fabricante fez algumas modificações, discutidas na errata

Informações sobre o fabricante

Vitor Ferreira & Filhos, Lda

Rua Particular à Rua Arco do Carvalhão, Letras J.F.C, 1070 Lisboa

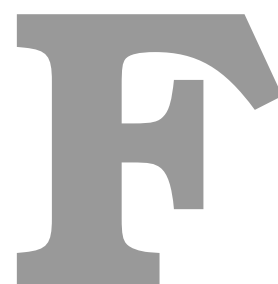
Telefone: 213884764

www.mestredosmotores.com

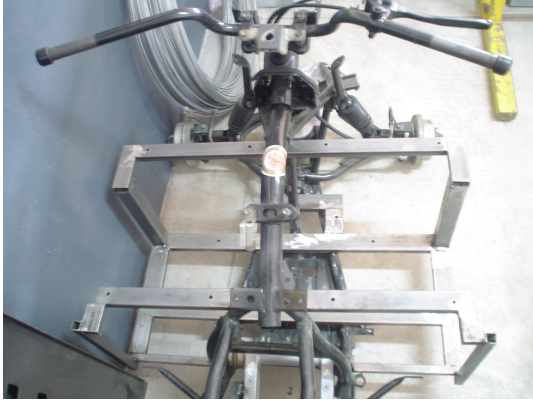
Errata

Errata referente aos desenhos das peças do redutor do motor de tração

Desenho	Onde se lê/vê	Deve lêr-se/vêr-se
espaçador chapa	85	87
roda 21	R10	R9.5
roda 21	12.800	12.300
roda 21		Chave (paralelepípedo quadrangular com 6 mm de lado, cantos arredondados e 35 mm de comprimento) para prender engrenagem de 21 dentes ao veio do motor, de acordo com a norma ISO/R773 [36].
20.23	Face do veio $\varnothing 22$ liso	Face do veio $\varnothing 22$ liso até 11mm após o $\varnothing 17$. Daí até ao topo, veio maquinado para encaixe no buraco da bolacha do desenho "bolacha".
20.23	Topo do veio $\varnothing 22$ liso	Topo do veio $\varnothing 22$ com rosca M8 concêntrica.
20.23	120	115, medidos a partir do veio $\varnothing 22$. Ranhura para freio após a medida.
bolacha		Um dos topos do cilindro tapado, com um furo M8 concêntrico.
chapa corrente	12 furos de 4 mm	4 furos M10 próximos dos cantos da placa.
chapa motor	12 furos de 4 mm	4 furos M10 próximos dos cantos da placa, à mesma distância dos da errata do desenho "chapa corrente".
montagem	Veio do motor	Espaçador cilíndrico com furo concêntrico de 19 mm e cerca de 3 mm de largura, montado no veio, antes da engrenagem.



Apêndice F - Fotografias



(a) Estrutura das plataformas no *chassi*, vista de cima.



(b) Estrutura das plataformas no *chassi*, vista de lado.



(c) Plataformas de madeira cortadas à medida, vistas de cima. Note-se os furos escareados.



(d) Plataformas inferior e superior de bombordo assentes na estrutura.



(e) Plataforma inferior (das baterias) com os batentes colados. Note-se que os parafusos de fixação ficam abaixo do nível da plataforma.



(f) Conjunto das baterias à carga, fora do veículo. Note-se o carregador dedicado, à direita.



(g) Bateria danificada após carga fora da vida útil. Note-se que apesar de ter "inchado", a bateria não explodiu.



(h) Plataforma do motor do travão. Note-se o espaço entre a plataforma e a forquilha traseira, ocupado por anilhas de borracha.



(i) Pormenor do tambor do travão e da alavanca de acionamento.



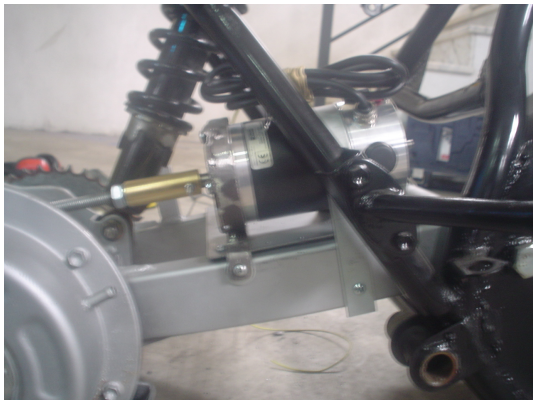
(j) Montagem de fixação da alavanca do travão ao pivô. Apesar de não ser visível na imagem, as duas barras de ferro paralelas estão furadas em ambas as pontas.



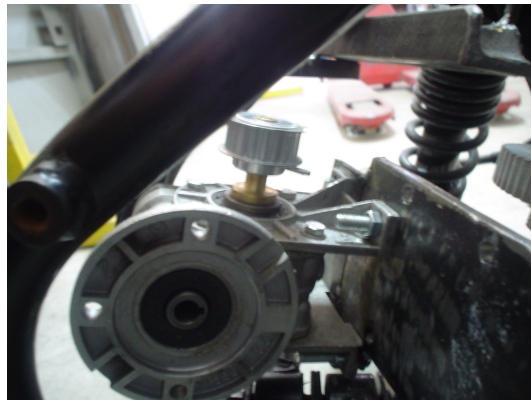
(k) Pivô do travão traseiro. As saliências cilíndricas encaixam no fixador da alavanca, e o furo no topo é a rosca onde entra o parafuso sem fim.



(l) Adaptador de latão instalado no veio do motor do travão, e braçadeira frontal de fixação do motor.



(m) Motor do travão instalado no veículo, visto de lado. Note-se as duas braçadeiras de fixação do motor, e a porca e anilha de mola de fixação do parafuso sem fim ao adaptador.



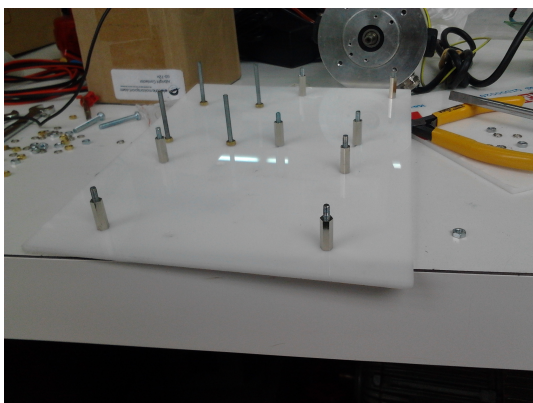
(n) Redutor da direção instalado na estrutura de suporte. A projeção inicial saiu errada e a plataforma teve que ser alterada. Note-se também no cima da imagem o suporte do esticador.



(o) Veio do redutor da direção com polia instalada. O veio prende no redutor através dos bocados de chapa inseridos na ranhura longitudinal, e fica com recurso ao parafuso e chapa de batente.



(p) Interruptor de fim de curso da direção com a patilha dobrada, devido à descalibração da roda dentada fixa na coluna da direção.



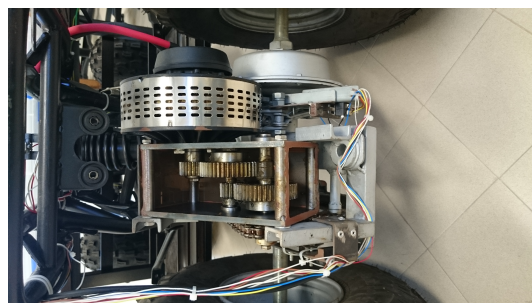
(q) Uma das duas placas acrílicas onde fixam as placas eletrônicas presentes na caixa.



(r) Microcontrolador instalado no veículo com ligação por porta série.



(s) Placa de circuito impresso do sensor de velocidade.



(t) Redutor da tração, instalado.



(u) Alinhamento da montagem dos motores da tração e do travão.



(v) Veículo, visto de trás.

