

Instituto Superior de Engenharia do Porto



# Sistema de Controlo de um Veículo Autónomo Terrestre

Ivo Cláudio Pereira Costa

Tese submetida no âmbito do  
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Alfredo Manuel Oliveira Martins (Mestre)

Dezembro de 2009



# Resumo

A crescente necessidade imposta pela gama de aplicações existentes, torna o estudo dos veículos autónomos terrestres um objecto de grande interesse na investigação. A utilização de *robots* móveis autónomos originou quer um incremento de eficiência e eficácia em inúmeras aplicações como permite a intervenção humana em contextos de elevado risco ou inacessibilidade. Aplicações de monitorização e segurança constituem um foco de utilização deste tipo de sistemas quer pela automatização de procedimentos quer pelos ganhos de eficiência (desde a eficiência de soluções multi-veículo à recolha e detecção de informação). Neste contexto, esta dissertação endereça o problema de concepção, o desenvolvimento e a implementação de um veículo autónomo terrestre, com ênfase na perspectiva de controlo.

Este projecto surge pois no âmbito do desenvolvimento de um novo veículo terrestre no Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). É efectuado um levantamento de requisitos do sistema tendo por base a caracterização de aplicações de monitorização, transporte e vigilância em cenários exteriores pouco estruturados.

Um estado da arte em veículos autónomos terrestres é apresentado bem como conceitos e tecnologias relevantes para o controlo deste tipo de sistemas. O problema de controlo de locomoção é abordado tendo em particular atenção o controlo de motores DC *brushless*. Apresenta-se o projecto do sistema de controlo do veículo, desde o controlo de tracção e direcção, ao sistema computacional de bordo responsável pelo controlo e supervisão da missão.

A solução adoptada para a implementação mecânica da estrutura do veículo consiste numa plataforma de veículo todo terreno (motociclo 4X4) disponível comercialmente. O

projecto e implementação do sistema de controlo de direcção para o mesmo é apresentado quer sob o ponto de vista da solução electromecânica, quer pelo subsistema de *hardware* de controlo embebido e respectivo *software*.

Tendo em vista o controlo de tracção são apresentadas duas soluções. Uma passando pelo estudo e desenvolvimento de um sistema de raiz capaz de controlar motores BLDC de elevada potência, a segunda passando pela utilização de uma solução através de um controlador externo.

A gestão energética do sistema é abordada através do projecto e implementação de um sistema de controlo e distribuição de energia específico.

A implementação do veículo foi alcançada nas suas vertentes mecânica, de *hardware* e *software*, envolvendo a integração dos subsistemas projectados especificamente bem como a implementação do sistema computacional de bordo. São apresentados resultados de validação do controlo de locomoção básico quer em simulação quer descritos os testes e validações efectuados no veículo real.

No presente trabalho, são também tiradas algumas conclusões sobre o desenvolvimento do sistema e sua implementação bem como perspectivada a sua evolução futura no contexto de missões coordenadas de múltiplos veículos robóticos.

**Palavras Chave:** ALV, Controlo, *Brushless*, Veículo terrestre, *Outdoor*

# Abstract

Autonomous land vehicle have an increasingly range of applications providing efficiency and effectiveness gains and allowing human intervent in contexts of high risk or inaccessibility. In this context, this dissertation addresses the problem of design, development and implementation of an autonomous land vehicle, with emphasis on the control system.

This project arises in the context of the development of a new robotic land vehicle in the Autonomous Systems Laboratory (LSA) of the Institute Engineering of Porto (ISEP).

Monitoring, transport and surveillance applications in unstructured outdoor scenarios led to requirements analysis.

Concepts and technologies relevant to the control of terrestrial land vehicles are presented along with a current state of the art.

The locomotion control is addressed with particular attention to the control of brushless DC motors.

The vehicle control system project ranging from traction and direction control to the on-board computer system with the supervision and mission control is presented.

The implemented mechanical solution is based on a commercially available all terrain vehicle plataform (4x4 motorcycle). It's direction control project and implementation is presented both in electromechanical, hardware and software embedded control subsystem aspects.

Two solutions are presented to the traction control. One dedicated custom developed BLDC control system and other relying on an external controller.

The energy management system is addressed throught the design and implementation of a dedicated control and power distribution subsystem. Basic locomotion validation tests were performed both in simulation and on the actual vehicle. In this work, some conclusions of the development and implementation process are draw along with perspect future development in the control of the coordinated missions of multiple vehicles.

**Keywords:** ALV, Control, Brushless, Terrestrial vehicle, Outdoor

# Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus amigos Sérgio Coelho, Tiago Sarmento, João Sousa, Guilherme Amaral, Yuri e ao Magalhães, pela amizade, apoio, disponibilidade e aos momentos passados durante a elaboração desta dissertação, e também pelo momento de aflição ao qual todos me ajudaram para que fosse possível no final entregar esta dissertação.

Ao professor e orientador Alfredo Martins e aos professor José Miguel Almeida, Eduardo Silva e Luís Lima a amizade, a confiança, as sugestões, as contribuições, as soluções e a cumplicidade na conclusão da minha dissertação.

A todos os membros do LSA, em especial ao Carlos Almeida, André Dias e ao Nuno Dias, pela disponibilidade, a amizade e contribuições na conclusão da minha dissertação.

Aos meus pais, à Morgane pelos sacrifícios feitos, carinho, confiança e apoio constante que permitiram, a concretização da minha dissertação.

Fica também um agradecimento especial a todos os amigos e familiares que directa ou indirectamente ligados ao projecto sempre apoiaram, ajudaram, e sempre compreenderam a falta de tempo para estar com eles durante a elaboração deste projecto.

Ivo Cláudio Pereira Costa

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

*“Any intelligent fool can make things bigger, more complex, and more violent. It takes a touch of genius and a lot of courage to move in the opposite direction.”*

Albert Einstein

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Problema Endereçado . . . . .	1
1.2	Motivação . . . . .	2
1.3	Objectivos e Contribuições . . . . .	3
1.4	Organização da Tese . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Estado Da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Veículos Autónomos Terrestres . . . . .	5
2.1.1	Mapa Funcional de um ALV . . . . .	6
2.1.2	Requisitos de um ALV . . . . .	8
2.2	Aplicações . . . . .	8
2.3	Autonomia . . . . .	15
2.4	Mobilidade . . . . .	16
2.4.1	Concepção . . . . .	16
2.4.2	Controlo de Mobilidade . . . . .	17
2.5	Métodos de Planeamento de Trajectórias . . . . .	18
2.6	Arquitecturas . . . . .	18
2.6.1	Arquitectura LAAS . . . . .	19
2.6.2	Arquitectura CAMPOUT . . . . .	20
2.6.3	Arquitectura Híbrida . . . . .	20
2.6.4	Arquitectura ALLIANCE . . . . .	22
2.7	Conclusões . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Análise de Requisitos</b>	<b>23</b>
3.1	Ambiente de Operação . . . . .	24
3.1.1	Segurança de Perímetro . . . . .	24
3.1.2	Vigilância e Reconhecimento . . . . .	25
3.1.3	Comboio de Transporte . . . . .	26
3.2	Comunicações . . . . .	27
3.3	Estrutura . . . . .	28
3.4	Interação Homem-Máquina . . . . .	28
3.5	Sensores . . . . .	29
3.6	Propulsão . . . . .	30
3.7	Alimentação . . . . .	30
3.8	Capacidade de Carga . . . . .	30
3.9	Sistema Computacional . . . . .	30

<b>4</b>	<b>Controlo de Locomoção</b>	<b>31</b>
4.1	Cinemática de um <i>Robot</i> Móvel	31
4.2	Modelização do Sistema	32
4.2.1	Modelo Cinemático	33
4.2.2	Modelo Dinâmico	36
4.3	Controlo de Trajectória	38
4.3.1	Orientação em Linha Recta	39
4.3.2	Orientação em Linha Curva	41
4.4	Motores <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC)	42
4.4.1	Introdução	42
4.4.2	Construção e Princípios de Funcionamento	43
4.4.2.1	Estatótor	43
4.4.2.2	Rotor	44
4.4.2.3	Sensores de <i>Hall</i>	45
4.4.2.4	Teoria de Operação	46
4.4.3	Sequência de Comutação	46
4.4.4	Back EMF	48
4.4.5	Comparação entre um Motor BLDC e um Motor BDC	48
<b>5</b>	<b>Arquitectura do sistema</b>	<b>51</b>
5.1	Opções de Projecto	52
5.2	Arquitectura	52
5.3	Sistema Computacional	54
5.4	Controlo de Direcção	54
5.4.1	Sistema Embebido <i>Pandora Motion</i>	54
5.5	Controlo de Tracção	56
5.6	Gestão de Energia	57
5.7	Comunicações	58
5.8	Navegação	59
5.8.1	Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS)	59
5.8.2	<i>Inertial Navigation System</i> (INS)	60
5.9	Percepção Ambiente	61
5.9.1	LRF	61
5.9.2	Câmara de Vídeo	62
5.9.3	Câmara Termográfica	63
5.10	Arquitectura de <i>Software</i>	64
5.10.1	Percepção do Ambiente	64
5.10.2	Navegação	64
5.10.3	Gestão de Energia	66
5.10.4	Supervisão de Missão e Controlo	66
5.10.5	Gestor da Locomoção	66
5.10.5.1	Missão	67
5.10.5.2	Manobras	67
5.10.5.3	Transições	68

<b>6</b>	<b>Implementação</b>	<b>71</b>
6.1	Controlo de Direcção . . . . .	72
6.2	Controlo de Tracção . . . . .	75
6.3	Gestão de Energia . . . . .	76
6.4	Sistema Computacional . . . . .	77
6.5	Comunicações . . . . .	78
6.6	Sistema de Navegação . . . . .	79
6.7	Sistemas de Percepção . . . . .	80
6.8	Veículo . . . . .	80
6.9	Validação do Controlo de Trajectórias . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>87</b>
	<b>Referências</b>	<b>92</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice</b>	<b>93</b>
A.1	Princípio de <i>Ackerman</i> . . . . .	93
A.2	Protocolos de comunicação . . . . .	95
A.2.1	Atributos . . . . .	95
A.2.2	Aplicações do protocolo CAN . . . . .	96
<b>B</b>	<b>Apêndice</b>	<b>99</b>
B.1	Esquemáticos . . . . .	99

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Lista de Figuras

2.1	Esquema de uma relação entre os diferentes componentes funcionais de um ALV . . . . .	6
2.2	Groundhog . . . . .	9
2.3	ARGO . . . . .	10
2.4	RAVON . . . . .	10
2.5	STANLEY . . . . .	11
2.6	BOSS . . . . .	11
2.7	SmartTer . . . . .	12
2.8	Tractor semi-autónomo para pulverização de um pomar . . . . .	12
2.9	Plataforma AtrvJr . . . . .	13
2.10	CRUSHER . . . . .	13
2.11	BLACK NIGHT . . . . .	14
2.12	Terrascout . . . . .	14
2.13	Arquitectura LAAS . . . . .	19
2.14	Arquitectura do <i>robot</i> STANLEY . . . . .	21
4.1	Geometria da direcção do tipo <i>Ackerman</i> . . . . .	34
4.2	Cordenadas gerais para um <i>robot</i> do tipo carro . . . . .	34
4.3	Coordenadas no corpo do veículo . . . . .	35
4.4	Forças aplicadas e forças resultantes ao veículo . . . . .	37
4.5	Exemplo do seguimento de uma trajectória . . . . .	39
4.6	Exemplo 1 de um <i>robot</i> numa recta . . . . .	40
4.7	Exemplo 2 de um <i>robot</i> numa recta . . . . .	40
4.8	Exemplo de um <i>robot</i> numa curva . . . . .	41
4.9	Motor BLDC . . . . .	43
4.10	Trapezoidal BEMF . . . . .	44
4.11	Sinusoidal BEMF . . . . .	44
4.12	Secções transversais do rotor . . . . .	45
4.13	Secção transversal de um motor BLDC . . . . .	46
4.14	Diagrama de blocos do controlador de um motor BLDC . . . . .	47
5.1	Operação de múltiplos veículos autónomos . . . . .	52
5.2	Arquitectura do sistema . . . . .	53
5.3	Arquitectura do sistema de direcção . . . . .	55
5.4	Arquitectura do sistema de controlo de tração . . . . .	57
5.5	Arquitectura do sistema de gestão de energia . . . . .	58
5.6	Arquitectura de software . . . . .	65
5.7	Grafo de manobras . . . . .	67

5.8	Grafo de manobra para pista em "oito"	68
6.1	Sistema mecânico desenvolvido para o controlo de direcção	72
6.2	Montagem do <i>encoder</i> no motor	73
6.3	Solução final do sistema mecânico implementado	73
6.4	Sistema de controlo de direcção	74
6.5	Determinação dos ângulos máximos de curvatura	74
6.6	Sistema de controlo de tracção	75
6.7	Placa de gestão de energia	77
6.8	Sistema computacional do ALV TIGRE	78
6.9	Modulo mini-PCI utilizado no ALV TIGRE	78
6.10	Sistemas de navegação	79
6.11	Sistemas de percepção	80
6.12	Subsistema implementado no veículo	81
6.13	Mala com o sistema computacional	81
6.14	Compartimentado sistema de gestão e distribuição de energia	82
6.15	Caixa do sistema de controlo de tracção e controlo de direcção	82
6.16	Simulador do ALV TIGRE	83
6.17	Simulação de uma trajectória em "U"	84
A.1	Movimento Circular	94
A.2	Centro do raio de curvatura	94
A.3	Geometria de Ackerman	94
A.4	Diferença de ângulos	95
B.1	Esquemático da placa de potência (parte 1/2)	100
B.2	Esquemático da placa de potência (parte 2/2)	101
B.3	Esquemático da placa de gestão de energia	102
B.4	Esquemático da placa de direcção	103

# Lista de Tabelas

4.1	Sequência de comutações . . . . .	47
4.2	Comparação entre um motor BLDC e um motor BDC . . . . .	49

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Símbolos

$b$	Distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade
$a$	Distância entre o centro de gravidade e o eixo dianteiro
$CG$	Centro de gravidade
$\theta$	Ângulo de orientação do veículo no referencial
$\phi$	Ângulo de direcção entre a roda dianteira e o eixo do corpo de veículo
$x, y$	Posição nas coordenadas do corpo
$x_1, y_1$	Posição do eixo traseiro
$x_2, y_2$	Posição do eixo dianteiro
$u$	Eixo ao longo do comprimento do veículo
$w$	Eixo normal ao eixo $u$
$v_u, v_w$	Velocidade no centro de gravidade do corpo ao longo dos eixos $u, w$
$F_D$	Força motriz
$F_R$	Força lateral no eixo traseiro
$F_F$	Força lateral no eixo dianteiro
$m$	Massa do corpo
$J$	Momento de inércia
$u_1, u_2$	Entradas de controlo do motor de tracção e direcção respectivamente
$e_\phi$	Erro de orientação
$K_d$	Convergência para o centro da linha ou trajectória
$K_\phi$	Ângulo ao centro da trajectória
$X_I, Y_I$	Posição inicial
$X_F, Y_F$	Posição final
$\theta_{ref}$	Ângulo de referência
$e_d$	Erro em relação à trajectória ideal
$d$	Sentido de rotação

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Acrónimos

ALV	Autonomous Land Vehicle
ARC	Centre of Excellence for Autonomous Systems
ARM	Advanced Risc Machine
ASL	Autonomous Systems Lab
BDC	Brushed Direct Current
BEMF	Back Electromotive Force
BLDC	Brushless Direct Current
CAN	Controller Area Network
CF	Compact Flash
CMU	Carnegie Mellon University
COTS	Commercial off-the-shelf
CSNPC	China Satellite Navigation Project Center
DARPA	Defense Advanced Research Project Agency
DGPS	Differential Global Positioning System
ELROB	European Land-Robot Trial
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ESA	European Space Agency
FLIR	Forward Locking Infra-Red
GM	Gestor de Missões
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ISEP	Instituto Superior de Engenharia Do Porto
ISR	Instituto de Sistemas e Robótica
IST	Instituto Superior Técnico
LASER	Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium Iron Phosphate
LINCE	Land Intelligent Cooperative Explorer
LIPO	Lithium Polymer
LRF	Laser Range Finder
LSA	Laboratório de Sistemnas Autónomos
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
NREC	National Robotics Engeneering System
PID	Proportional-Integral-Derivative
PWM	Pulse Width Modulation
RLAB	Robotics Research Lab
RTK	Real-Time Kinematics
SBC	Single Board Computer

TIGRE Terrestrial Intelligent General Purpose Robotic Explorer  
WIMA Worldwide Interoperability for Microwave Acces

# Capítulo 1

## Introdução

### Conteúdo

---

1.1	Problema Endereçado . . . . .	1
1.2	Motivação . . . . .	2
1.3	Objectivos e Contribuições . . . . .	3
1.4	Organização da Tese . . . . .	3

---

### 1.1 Problema Endereçado

Os veículos autónomos terrestres são utilizados numa crescente gama de aplicações. Estas alargam-se por inúmeras áreas de intervenção humana desde aplicações industriais, aplicações militares, vigilância, monitorização ambiental e também levantamento de mapas de elevação digital [1]. A investigação em veículos autónomos assume desta forma uma crescente importância dado o elevado número de aplicações práticas [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] encontradas nos últimos anos. Em ambientes terrestres pouco estruturados e cenários exteriores, a utilização de *robots* móveis autónomos originou quer um incremento de eficiência e eficácia em inúmeras aplicações como permite a intervenção humana em contexto de elevado risco ou inacessibilidade. Aplicações de monitorização e segurança constituem um foco de utilização deste tipo de sistemas quer pela automatização de procedimentos quer pelos ganhos de eficiência (desde a eficiência de soluções multi-veículo à recolha e detecção de informação). Os veículos autónomos terrestres fornecem um conjunto de vantagens significantes em outro tipo de aplicações como por exemplo em transporte, na recolha de dados sensoriais para os mais variados fins ou constituindo-se como bases móveis de

“relay” de comunicações. É pois de relevância o desenvolvimento de veículos terrestres com elevado grau de autonomia e capacidades avançadas de locomoção. Neste sentido, e tendo em vista a resposta a problemas de monitorização, recolha de informação, inspeções, transporte e apoio a comunicações em ambiente exterior possivelmente pouco estruturado identificou-se o desenvolvimento de um veículo autónomo terrestre (ALV - *Autonomous Land Vehicle*) com elevado grau de autonomia, processamento a bordo e capacidade de locomoção adequadas com o problema a resolver. Em termos de problemas de controlo em ALV's, inicialmente os trabalhos direccionavam-se para a utilização de modelos cinemáticos de veículos móveis tendo como objectivo efectuar o controlo de movimento [9, 2, 10]. Posteriormente, a investigação efectuada assumiu uma nova abordagem, focando-se no desenvolvimento de novos sensores que permitissem uma melhor percepção do ambiente que os veículos se encontram inseridos, tendo como consequência uma melhoria em termos de controlo de movimento. Contudo, alguns dos desenvolvimentos tem-se direccionado para o estudo das características dinâmicas do movimento, apresentando-se como sendo essenciais quando o objectivo passa pelo melhoramento na navegação e planeamento de trajectórias [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. De referir pela relação com o trabalho em questão, o estudo de Carelli [18] sobre o paradigma de monitorização autónoma e teleoperação de um *robot* protótipo que tem uma estrutura cinemática do tipo *Ackerman*. O controlo do veículo inclui compensações de dinâmica do veículo, que no geral não têm sido tomadas em consideração.

## 1.2 Motivação

Como foi referido anteriormente as necessidades de responder aos desafios de engenharia postos por um conjunto de problemas e aplicações em ambientes terrestres (exterior) com soluções baseadas em sistemas autónomos móveis, consiste no principal elemento motivador do trabalho realizado. Este projecto surge pois no âmbito do desenvolvimento de um veículo autónomo terrestre no Laboratório de Sistemas Autónomos (LSA) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), tendo em vista endereçar os problemas referidos e alargar as operações possíveis face aos sistemas existentes, complementando o veículo autónomo terrestre *Land Intelligent Cooperative Explorer* (LINCE), que vê o seu número de aplicações limitado devido a questões estruturais. O veículo autónomo terrestre é também desenvolvido tendo em atenção o cenário de operações coordenadas com

múltiplos sistemas autónomos heterogéneos envolvendo outros *robots* móveis existentes (como o *robot* terrestre LINCE, o veículo aéreo FALCOS ou marinhos ROAZ). Adicionalmente surge como plataforma de investigação nas áreas de controlo, coordenação e navegação de precisão ou em processamento de informação sensorial.

### 1.3 Objectivos e Contribuições

Tendo em vista o desenvolvimento de um novo veículo autónomo terrestre é apresentado em seguida um conjunto de objectivos e contribuições a realizar:

- Identificação e análise de requisitos para o desenvolvimento de um veículo autónomo terrestre;
- Implementar uma estrutura física e mecânica;
- Efectuar o controlo de direcção e tracção;
- Desenvolvimento de um controlador de motores *Brushless* de elevada potência;
- Integração de um sistema computacional de bordo;
- Desenvolvimento de um sistema de gestão de energia e respectiva integração;
- Desenvolvimento e validação de funcionalidades básicas de locomoção;
- Integração de um conjunto de sensores de navegação e percepção.

### 1.4 Organização da Tese

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No capítulo dois, é efectuado um levantamento existente do estado da arte em veículos autónomos terrestres, focando os aspectos de aplicação, autonomia, mobilidade, métodos de planeamento de trajectórias e por fim arquitecturas de controlo.

Seguidamente no capítulo três, é efectuada uma análise de requisitos para o sistema a desenvolver, tendo em vista as aplicações e cenários operacionais a considerar.

No capítulo quatro é abordado o problema de controlo de locomoção, quer do ponto de vista de controlo do veículo, quer em particular no controlo de velocidade de motores *brushless*, que no sistema implementado constitui um problema de relevância.

No capítulo cinco é apresentado o projecto de solução com a arquitectura de *hardware* e *software* de veículo.

A implementação realizada, bem como testes e validações efectuadas em simulação e com o sistema real são apresentados no capítulo seis.

Algumas conclusões finais, bem como uma perspectiva de trabalho futuro são apresentadas no capítulo oito.

## Capítulo 2

# Estado Da Arte

### Conteúdo

---

<b>2.1</b>	<b>Veículos Autónomos Terrestres</b>	<b>5</b>
2.1.1	Mapa Funcional de um ALV	6
2.1.2	Requisitos de um ALV	8
<b>2.2</b>	<b>Aplicações</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Autonomia</b>	<b>15</b>
<b>2.4</b>	<b>Mobilidade</b>	<b>16</b>
2.4.1	Concepção	16
2.4.2	Controlo de Mobilidade	17
<b>2.5</b>	<b>Métodos de Planeamento de Trajectórias</b>	<b>18</b>
<b>2.6</b>	<b>Arquitecturas</b>	<b>18</b>
2.6.1	Arquitectura LAAS	19
2.6.2	Arquitectura CAMPOUT	20
2.6.3	Arquitectura Híbrida	20
2.6.4	Arquitectura ALLIANCE	22
<b>2.7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>22</b>

---

## 2.1 Veículos Autónomos Terrestres

Neste capítulo é descrito o actual estado da arte sobre veículos autónomos terrestres ALV. Várias áreas de tecnologia funcionais são identificadas e tratadas, para cada, uma breve introdução à tecnologia necessária para a implementação bem sucedida de um ALV.

Posteriormente, uma revisão bibliográfica detalhada é fornecida para apoiar e elaborar estes pontos de vista. Estas várias áreas de tecnologia são também apresentadas numa perspectiva integrada. Hugh Durrant-Whyte [19] descreve um estado da arte bastante compreensivo sobre os vários componentes funcionais necessários para um ALV, podendo constituir uma referência útil para um estudo mais aprofundado.

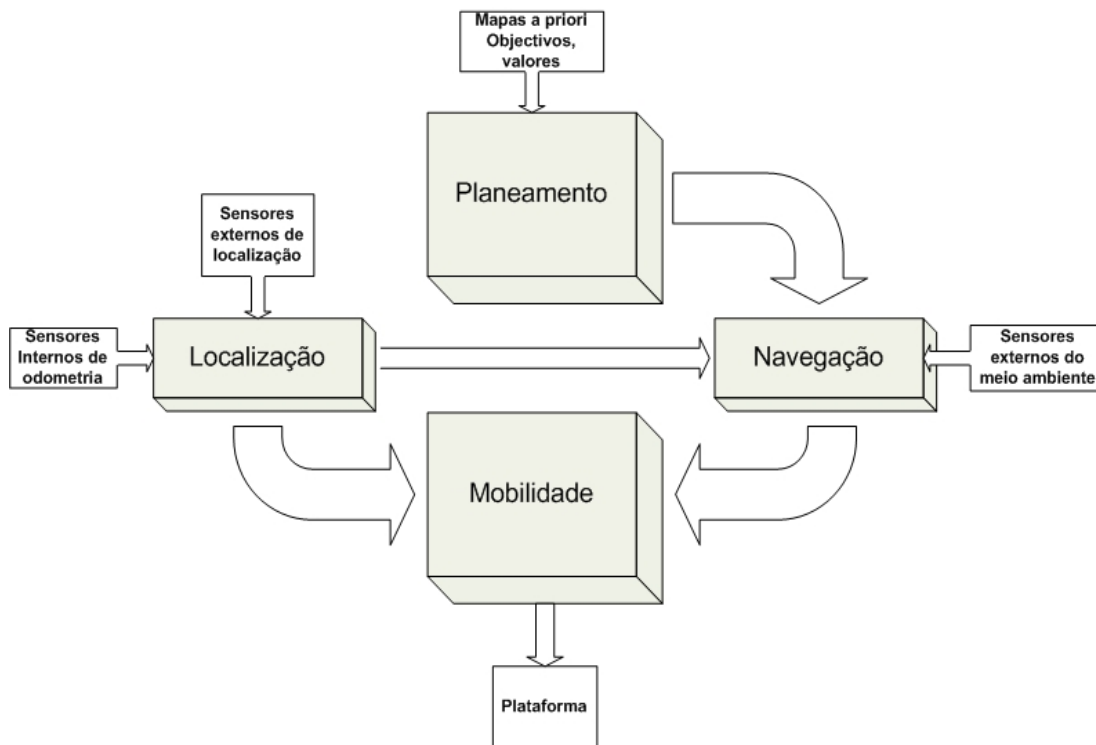


Figura 2.1: Esquema de uma relação entre os diferentes componentes funcionais de um ALV

### 2.1.1 Mapa Funcional de um ALV

A figura 2.1 mostra o esquema de uma relação entre os diferentes componentes funcionais de um ALV. A função geral de uma ALV [20] é atravessar terreno desestruturado e pouco conhecido, capacidade de carga útil, em geral, para efeitos de reconhecimento ou de vigilância, mas potencialmente para tarefas mais interventivas.

A **Mobilidade** capta a mecânica e a física de um veículo, a interacção com o terreno e os efeitos do controlo do veículo no terreno, caracteriza de certa forma o modo ou a

capacidade de locomoção do veículo numas dadas condições. A mobilidade é vista simplesmente como um efeito do sistema global, a observação do resultado do sistema como um todo.

A determinação da posição ou **localização** fornece estimativas da localização, atitude, velocidade e aceleração do veículo. A localização é uma função de saída apenas, quando vista pelo resto do sistema. Isto significa que o desenvolvimento da capacidade de localização, pode muitas vezes proceder de forma independente da dos outros componentes do sistema.

A **navegação**, preocupa-se com a aquisição de, e resposta a, informações dos sensores externos. A função de navegação tem como entrada sensores que observam o ambiente operacional. Esta informação deve ser usada para criar uma representação do ambiente que podem posteriormente ser utilizado na execução de uma missão.

**Missão e planeamento de trajectórias**, funcionalmente gera trajectórias, comportamentos ou pontos de caminho para o sistema como um todo. Não tem uma ligação directa com os sensores nem com a saída do controlo. No entanto, é claramente necessário usar em conjunto com os sensores e controlo, bem como, com os mapas previamente definidos e com os objectivos da missão, para produzir comandos de navegação adequados.

A **Comunicação** fornece a ligação entre o veículo e todos os restantes elementos do sistema global, incluindo outros veículos e operadores. Não há razão para supor que um ALV verdadeiramente autónomo não deve partilhar o mesmo meio de comunicação com outros sistemas e na verdade ser interoperável com mais plataformas convencionais.

Embora a especificação da carga útil e missão a ser executada deva definir o requisito geral do sistema, não pode, e não deve interferir nos elementos funcionais do veículo, a necessidade de mobilidade, localização, navegação e planeamento permanece independentemente da missão. Certamente, é de se esperar que uma compreensão comum destas quatro funções serviria uma ampla variedade de cargas e missões. A estrutura e o papel da missão, e do planeamento de trajectórias, é claramente crítico em permitir este grau de flexibilidade. O sistema ideal de planeamento de missão permitiria uma série de missões diferentes a serem consideradas com uma série de restrições operacionais, e valores subjectivos da missão a serem contabilizados. Este mapa funcional das capacidades de um ALV, é suficiente para definir com precisão a tecnologia necessária para implementar um

sistema operacional.

### 2.1.2 Requisitos de um ALV

Um facto que é claro, da literatura de investigação de ALV's e de programas anteriores, é que é preciso haver uma definição finita e precisa dos requisitos da missão para o sucesso do sistema a ser desenvolvido. É praticamente impossível desenvolver um “veículo autónomo” genérico para todas as missões possíveis de realizar com um ALV. Embora isso possa parecer óbvio, muitos programas de ALV's visam muito uma ideia nebulosa de operações “inteligentes e autónomas”, criando um requisito impossível, que é lidar com todos os terrenos possíveis e situações de missão de uma forma autónoma. Em contrapartida, um objectivo final bem definido, com tipos de missões e condições de terreno específico, imediatamente torna o problema de desenvolvimento de um veículo autónomo possível. Uma descrição precisa e quantitativa dos requisitos da missão e da capacidade do sistema é visto como essencial. Isto não é diferente de uma definição de requisitos convencionais de veículos civis tripulados ou sistemas militares. Em robótica, o cálculo de uma trajectória para um veículo é um problema bem conhecido. A selecção dos caminhos exige algumas considerações da missão. Isto pode incluir versatilidade do terreno, a capacidade de manter o objectivo bloqueado, a melhor utilização de informação de navegação, a necessidade de ser indetectável, e muitos outros critérios. No entanto, é importante salientar que assim que os objectivos são definidos, a selecção quantitativa de trajectórias possíveis com base em medidas eficazes é um problema de optimização bem definido. O ponto fundamental é que, uma vez que uma missão bem definida é estabelecida, os requisitos do sistema podem ser estabelecidos. Em uma ampla gama de missões possíveis de realizar com ALV's, estes requisitos são ambos tratáveis e podem ser satisfeitas pelos actuais ALV's e sua tecnologia.

## 2.2 Aplicações

Após uma pesquisa e estudo exaustivo sobre ALV's, conclui-se que há três grandes categorias de aplicações em que podem ser divididos, estando muitas vezes estas categorias interligadas entre si. Estas categorias são: Aplicações **científicas**, em que o desenvolvimento de um ALV foca-se no desenvolvimento/aperfeiçoamento de técnicas quer de controlo, navegação e também desvio de obstáculos com fins educacionais. Aplicações

**militares**, em que o desenvolvimento de ALV's visa como o nome indica veículos capazes de operações militares como segurança de um perímetro, missões de reconhecimento e vigilância, comboio de transporte, transporte de cargas e até mesmo efectuar missões de ataque. E por fim as aplicações **civis**, em que o desenvolvimento de ALV's surge no âmbito de um melhoramento de qualidade de vida, com o aparecimento de veículos de transporte autónomos, veículos com capacidade de mapeamento de áreas metropolitanas, veículos com capacidades de fazer inspecções entre muitas outras aplicações. É de se notar que, apesar de se dividir os ALV's em três categorias, uma grande parte dos veículos desenvolvidos apesar de serem militares ou civis, são provenientes de investigações científicas.

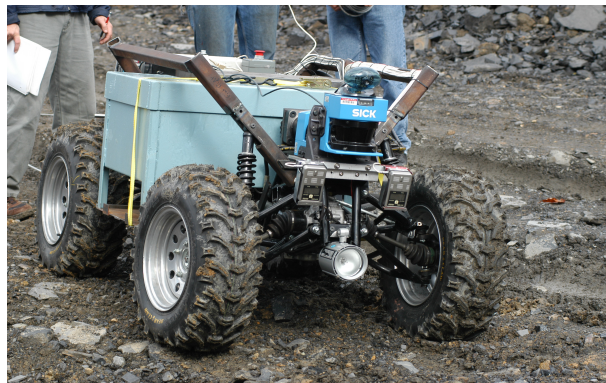


Figura 2.2: Groundhog

Em 2002 no *Robotics Institute* da *Carnegie Mellon University* (CMU), foi desenvolvido um projecto designado como Groundhog (figura 2.2), utilizado para a aquisição de mapas volumétricos precisos de minas subterrâneas [3]. O Groundhog é um *robot* móvel controlado remotamente equipado com Laser Range Finder (LRF).

O *Centre of Excellence for Autonomous Systems* (ARC) da universidade de Sydney desenvolveu um veículo anfíbio designado por ARGO (figura 2.3), utilizado como plataforma genérica para testes de controlo [21], percepção e algoritmos de aprendizagem.



Figura 2.3: ARGO

Em 2008 com o intuito de participar na prova *The European Robot Trial* (ELROB), o *Robotics Research Lab* (RLAB) da universidade de Kaiserslautern desenvolveu um veículo autónomo terrestre, o RAVON (figura 2.4). Este veículo é utilizado como um teste para investigação de estratégias de comportamento base na adaptação de movimentos, localização e navegação em terreno exterior adverso [22].



Figura 2.4: RAVON

Outra prova muito conhecida mundialmente é o *Defense Advanced Research Projects Agency Challenge* (DARPA Challenge), onde inúmeras universidades e empresas testam os seus veículos em ambientes urbanos estruturados e em ambientes fora de estrada pouco estruturados. Alguns dos veículos mais influentes no DARPA Challenge [23] são o STANLEY (figura 2.5) do *Artificial Intelligence Laboratory* da Universidade de Stanford [4] e o

BOSS (figura 2.6) do *Robotics Institute* do CMU [5]. Ambos os veículos foram desenvolvidos com o propósito de participar na competição, tendo ganho em 2005 o STANLEY e em 2007 o BOSS. O principal desafio tecnológico no desenvolvimento destes dois veículos era construir um sistema altamente confiável, capaz de conduzir a uma velocidade relativamente elevada em ambientes diversificados e pouco estruturados, e fazer tudo isto com elevada precisão. Essas exigências levaram a uma série de avanços no domínio da navegação autónoma.



Figura 2.5: STANLEY



Figura 2.6: BOSS

Outro veículo desenvolvido com o intuito de participar no ELROB foi o SmartTer [24] (figura 2.7) do *Autonomous Systems Lab* (ASL) da *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne* (EPFL) Suíça, em parceria com o *Autonomous Intelligent Systems, Albert-Ludwigs-University de Freiburg* Alemanha, desenvolveram um veículo capaz de fazer navegação totalmente autónoma e mapeamento exterior 3D.

No *National Robotics Engineering Center* (NREC) do CMU, foi convertido um tractor num veículo autónomo para pulverização de água em pomares [6]. O NREC desenvolveu um tractor capaz de funcionar sem um condutor humano. Estimando com precisão a



Figura 2.7: SmartTer

posição do veículo e lhe permitido acompanhar os caminhos previamente orientados de forma autónoma.

O tractor autónomo pulveriza água, ao longo de sete quilómetros através de um pomar de laranjas, sem qualquer intervenção humana (figura 2.8).



Figura 2.8: Tractor semi-autónomo para pulverização de um pomar

No Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) do Instituto Superior Técnico (IST) foi desenvolvido um projecto que visa permitir que uma equipa de *robots* (figura 2.9) navegue em ambientes exteriores, demonstrando a sua aptidão para actuarem individual e cooperativamente em operações de busca e salvamento num ambiente semelhante a cenários de catástrofe. O uso de *robots* em operações de busca e salvamento é um desafio aliciente, uma vez que, devido à natureza do problema, promove de uma forma natural avanços do conhecimento em áreas como a visão artificial, a navegação em ambientes exteriores não estruturados [25], a inteligência artificial distribuída e o controlo inteligente.

Outros veículos desenvolvidos no NREC, mas com fins militares são o CRUSHER e o BLACK NIGHT. Com o desenvolvimento do programa CRUSHER (figura 2.10) a



Figura 2.9: Plataforma AtrvJr

NREC, demonstra que as operações de combate com um veículo autónomo podem ser realizadas com sucesso [26]. O Black Knight (figura 2.11) pode ser usado quer de dia ou de noite para missões que são demasiado arriscadas para um veículo tripulado [7] (Capaz de executar missões de reconhecimento e vigilância, aquisição de alvos, recolha de informação inteligente e investigação de áreas de alto risco) e pode ser integrado com os actuais veículos tripulados e não tripulados. Permite que os operadores adquiram dados sobre a situação actual do veículo e permite verificar os planos da missão, usando dados do mapa para confirmar suposições do terreno.



Figura 2.10: CRUSHER

No *Robotics Institute* da CMU, foi desenvolvido um projecto designado como Terrascout (figura 2.12) com o objectivo de criar um veículo capaz de andar a alta velocidade autonomamente e com capacidade de patrulhar grandes áreas. O sistema de navegação autónomo deve ser capaz de se localizar [8] num caminho escolhido, fornecido a partir de uma estação de base por um operador, e percorrer esse caminho. A área operacional



Figura 2.11: BLACK NIGHT

do veículo incluindo áreas montanhosas e arborizadas. Os caminhos escolhidos são susceptíveis a variações no terreno, como pedras ou vegetação. Para tal, o veículo tem a capacidade de detectar obstáculos ao longo do caminho previamente escolhido, e desviar o veículo para evitar colisões [27, 28, 29, 30].



Figura 2.12: Terrascout

## 2.3 Autonomia

A utilização de *robots* móveis em operações de busca e salvamento, permite aumentar a eficácia das mesmas pelo acesso a espaços limitados, capacidade de utilização de sensores específicos, como imagens termográficas, ou possibilidade de automatização de tarefas de pesquisa. Em tarefas de inspecção remota, a utilização de *robots* móveis pode revelar-se primordial por permitir acesso a locais inacessíveis, e pela operação em condições ambientais restritivas à operação humana. Neste tipo de tarefas os *robots* podem ser teleoperados, semi-autónomos ou actuar autonomamente de acordo com o tipo de missão em questão. A autonomia de decisão por parte do veículo depende não só dos objectivos em causa, mas também dos sensores disponíveis. Com elevados graus de autonomia consegue-se a diminuição de recursos humanos necessários, e a cobertura de grandes áreas de operação. Dependendo da aplicação final para qual o veículo foi desenvolvido, este terá um tipo de autonomia diferente. Um veículo tele-operado, como o nome indica, necessita de um operador a controlar o veículo, sendo este tipo de autonomia útil quando se fala de missões de inspecção, recolha de informação, investigação de áreas, e até mesmo vigilância, temos como exemplo de veículos tele-operados o Black Night e em alguns casos o Groundhog. Um veículo semi-autónomo é um veículo com capacidades de navegação autónoma, e quando necessário, é possível tele-operá-lo, trazendo algumas vantagens face aos veículos tele-operados. Uma grande parte dos veículos existentes são semi-autónomos, visto que precisam sempre de alguma informação dada pelos operadores para executar a missão, encontrando-se aqui a grande diferença entre veículos semi-autónomos e veículos autónomos, nos veículos semi-autónomos são impostas restrições na missão é até algumas características de comportamento específico. Um veículo com este tipo de autonomia, permite que seja descarregada uma missão para o mesmo, seguindo um conjunto de pontos (*Waypoints*) até um determinado local estabelecido pelo operador com um conjunto de características (exemplo percorrer um caminho afastado da margem 5m). Veículos com esta autonomia temos o tractor da CMU para pulverização de um pomar, o TERRASCOUT e o RAVON. Por último temos os veículos autónomos, que após ser carregada uma missão, executa de forma autónoma sem a necessidade de intervenção por parte de algum operador (exemplo de uma missão para um veículo com esta autonomia é encontrar um alvo), todas as decisões a tomar ao longo da missão são inteiramente da responsabilidade do *robot*. Alguns exemplos desses veículos são o STANLEY, o BOSS, e o SmartTer.

## 2.4 Mobilidade

A mobilidade diz respeito à concepção e o controlo de movimento dos veículos móveis. A concepção centra-se na determinação da cinemática e dinâmica das rodas, carris, pernas, lagartas ou outros mecanismos que atinjam um melhor movimento específico. A concepção deve ser definida em relação às exigências do ambiente, e as especificações das tarefas a serem executadas. Em contraste, o controlo de movimento está preocupado com a análise cinemática de uma montagem em particular, e para esta, determinar o melhor algoritmo de controlo para alcançar os movimentos necessários. A concepção de veículos todo-o-terreno é uma matéria bem entendido em muitas áreas de aplicação. Existem soluções técnicas bem estabelecidas para descrever a mobilidade, e para a concepção de veículos com uma mobilidade, e com características específicas. A realização de tais veículos comerciais é generalizada: em sistemas militares como tanques, e para os sistemas civis em aplicações tais como agricultura, mineração e construção. Na última década foi possível assistir a uma grande inovação no que toca a compreender a mobilidade dos veículos robóticos. O trabalho realizado em modelização de veículos, e a interacção com o terreno realizados na última década em veículos autónomos resolveu o problema de controlo de movimento. Com um ALV, o controlo de movimento pode ser executado para missões realistas.

### 2.4.1 Concepção

A concepção de plataformas móveis tem recebido uma atenção considerável, tanto em veículos autónomos como em veículos tripulados. O problema de concepção da mobilidade tem sido considerado a dois níveis:

- A concepção da metodologia de locomoção, incluindo a escolha de rodas, carris, pernas, lagartas ou barbatanas como um mecanismo de propulsão.
- A optimização de um método específico de propulsão. Por exemplo, a escolha do tamanho, número, espaço, e do esforço de tracção de uma plataforma.

A escolha sistemática do método de propulsão é um problema consideravelmente mais difícil e mais genérico que uma simples optimização da concepção. É de referir dois notáveis, e bem diferente esforços abordando a questão da escolha da concepção de veículos autónomos. Primeiro é o trabalho de Joel Brudick [31], que desenvolve uma plataforma

matemática muito geral para a concepção e análise de mecanismos de mobilidade. A plataforma emprega métodos geométricos e cinemáticos para estudar o problema de locomoção básica. Em segundo lugar, e bem diferente, é a obra de John Bares na CMU no desenvolvimento de um sistema de *software* para a síntese e análise de mecanismos de mobilidade chamado Darwin2K [32]. Darwin2K é um exemplo de uma abordagem geral para a concepção de mecanismos robóticos (incluindo veículos terrestres).

Depois de um método de propulsão ter sido escolhido, falta sintetizar, seleccionar e otimizar o mecanismo de mobilidade. Houve uma quantidade substancial de trabalhos realizados sobre este problema, quer tanto na área da robótica, quer na área da mecânica. A optimização da geometria de muitos veículos com rodas tem sido amplamente estudada na indústria automóvel. Os livros de Wong [33], Ellis [34] e Dixon [35] são definitivamente os mais abrangentes na área. Ellis e Dixon em especial lidam com a optimização dos números, geometria e esboço de rodas para diferentes tipos de piso e condições todo-o-terreno. Um elemento chave de muitas destas análises, é a compreensão da interacção do veículo com o terreno, através das rodas e através dos efeitos do terreno em si. Isto é particularmente abordado nos livros por Dixon e Wong. O livro de Wong fornece uma explicação mais abrangente da mobilidade todo-o-terreno. Técnicas *standard* para definir mobilidade através de um “mapa de mobilidade” e um “perfil de mobilidade” são descritas. Um mapa de mobilidade consiste numa área de terra padrão em que a composição da superfície do terreno, geometria da superfície e da vegetação são definidas.

### 2.4.2 Controlo de Mobilidade

No domínio da robótica, o controlo da mobilidade de um veículo distingue-se do planeamento de trajectórias. A abordagem normal no controlo da mobilidade é assumir um caminho especificado, e em seguida, controlar o veículo para seguir esse caminho. O caminho em si é normalmente especificado por uma série de pontos ligados por linhas rectas ou por “curvas splines” [36]. Controladores de perseguição pura (“Pure Pursuit”), em particular, são amplamente utilizados e são considerados robustos ao terreno e condições ambientais. O aumento de desempenho pode ser obtido com a utilização de um controlo Proporcional Integral Derivativo (PID). Em velocidades mais altas e terreno mais adverso, é essencial incorporar um pouco de compreensão da dinâmica do veículo e do conhecimento da interacção entre o terreno e as rodas ou lagartas do veículo. O controlo

robusto de veículos num ambiente exterior em terrenos acidentados, é um assunto bem estudado e compreendido, existindo soluções técnicas quer para ALV'S com rodas quer com lagartas, a elevadas velocidades em terreno variável.

## 2.5 Métodos de Planeamento de Trajectórias

Existe uma grande variedade de técnicas de planeamento de trajectórias descritas na literatura. A maioria destas, preocupa-se na construção de trajectórias optimizadas para uma finalidade específica. A geração de trajectórias pode ser obtida através de pontos ligados por linhas rectas, “curvas splines” , ou outras estruturas geométricas apropriadas. O livro de Jean-Claude Latombe [36] é geralmente considerado o livro definitivo sobre as questões clássicas de planeamento de trajectórias. Planeamento de trajectórias clássico, geralmente assume um completo conhecimento do mundo e, em contrapartida fornece propriedades úteis de correcção. Em contraste, a maioria dos veículos que executa missões no exterior não possui conhecimento completo do mundo. Geralmente, planeadores de movimento baseados em sensores são incrementais, o *robot* sente o ambiente e de imediato, determina o “melhor” caminho baseado nessas medições, após o movimento nesse caminho o *robot* começa o ciclo novamente. Há duas abordagens principais ao problema de planeamento de trajectórias baseadas em sensores; o uso de ”caminhos livres” e o uso de células ou grelhas. Os métodos de “caminhos livres” incluem o algoritmo *TangentBug* [37], e o método de uso de células ou grelhas são melhor representados pelo algoritmo D\* [38]. Este último tem a vantagem de ser bem desenvolvido e de ter a particularidade de ser adequado para a navegação em terrenos acidentados. Em geral, os métodos e algoritmos correntes de planeamento de trajectórias, proporcionam o alcance e a capacidade de lidar com os cenários reais possíveis de serem encontrados no ambiente exterior.

## 2.6 Arquitecturas

Para a construção de um sistema autónomo, a existência de uma arquitectura de controlo é fundamental para o bom funcionamento do sistema, uma arquitectura de controlo fornece uma maneira de organização de um sistema embebido. A arquitectura de controlo

de um *robot* define a forma de como a geração de acções a partir de percepções está organizada [39]. As arquitecturas de controlo podem ser divididas em três grupos: hierárquico, reactivo e híbrido (reactivo e deliberativo).

### 2.6.1 Arquitectura LAAS

A arquitectura proposta é organizada em três níveis (figura 2.13) correspondendo a dois níveis de decisão acima do nível funcional. Os dois níveis mais altos são construídos de acordo com o paradigma de supervisor/planeador. Enquanto que o nível mais alto usa um planeador temporal, o segundo nível recebe tarefas e transforma-as em procedimentos compostos por acções elementares e supervisiona a execução destes procedimentos num contexto de reacção a acontecimentos assíncronos. Neste nível, o planeamento consiste na refinação da tarefa usando conhecimento específico sobre o domínio.

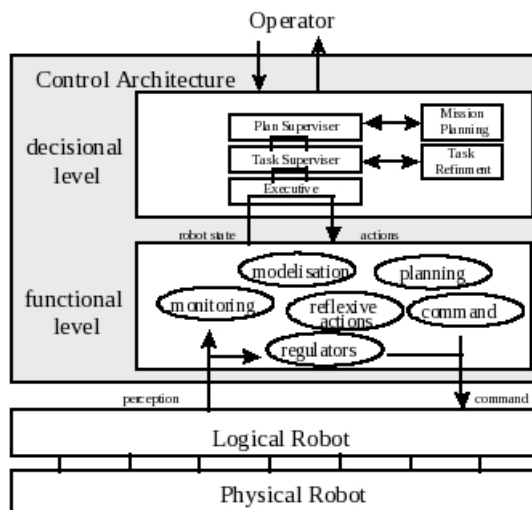


Figura 2.13: Arquitectura LAAS

No que diz respeito ao nível de planeamento de missão, foi desenvolvido um planeador temporal para “raciocinar” sobre relações numéricas ou simbólicas temporais. O plano produzido pelo planeador consiste num conjunto de tarefas parcialmente ordenado associado com as restrições temporais de forma que limites mínimos e máximos na duração de execução são definidos e tomados em conta na sincronização com acontecimentos externos. As tarefas de refinamento e supervisão são integradas através de um Sistema de Raciocínio Procedimental que oferece um contexto bem adaptado ao suporte da interacção entre decisão e reacção. A natureza do papel do nível de execução é puramente reactiva

sem qualquer planeamento. Controla a execução de acções de acordo com esquemas pre-definidos seleccionados de acordo com o contexto. Esta implementação é baseada num conjunto de regras que permite a compilação “*off-line*” do conjunto produzindo um programa para procurar uma árvore de decisão em tempo limitado. Uma boa descrição do trabalho conceptual desenvolvido sobre a arquitectura é apresentada em [40, 41] por Raja Chatila.

### 2.6.2 Arquitectura CAMPOUT

A exploração planetária desde cedo cativou o homem no âmbito de construir infra-estruturas capazes de suportar vida. Deste modo nasce a necessidade de aumentar a capacidade de autonomia e a manobrabilidade de sistemas autónomos robóticos, devido ao atraso causado pela distância de comunicação entre a Terra e Marte dificultando deste modo tele-operar estes sistemas. A exploração tele-operando um conjunto de *robots* em terrenos de alto risco assim como, áreas com um elevado grau de inclinação, levou a criação de uma arquitectura capaz de satisfazer tais necessidades, Terry Huntsberger desenvolveu uma denominada “*Control Architecture for Multirobot Planetary Outposts (CAMPOUT)*” [42]. CAMPOUT é uma arquitectura de controlo distribuída para multi plataformas baseadas numa metodologia de comportamentos, fornecendo deste modo uma infra-estrutura e ferramentas de orientação, permitindo assim consolidar um diverso número de técnicas para permitir mais eficiência e capacidade de operação.

### 2.6.3 Arquitectura Híbrida

Para o desenvolvimento do *robot* STANLEY, a arquitectura adoptada foi uma arquitectura do tipo híbrida, baseada em [43], a arquitectura adoptada para o STANLEY encontra-se representada na figura 2.14.

O *robot* STANLEY reage quase directamente a impulsos externos, que modelizam o mundo exterior ao sistema sem qualquer conhecimento prévio do mesmo, planeando/controlando assim uma melhor trajectória para o seu objectivo, sendo deste modo uma arquitectura híbrida, como podemos ver na figura 2.14 a arquitectura do *robot* esta dividida em 6 camadas:

1. **Sensor Interface** é responsável pela aquisição de dados do exterior;

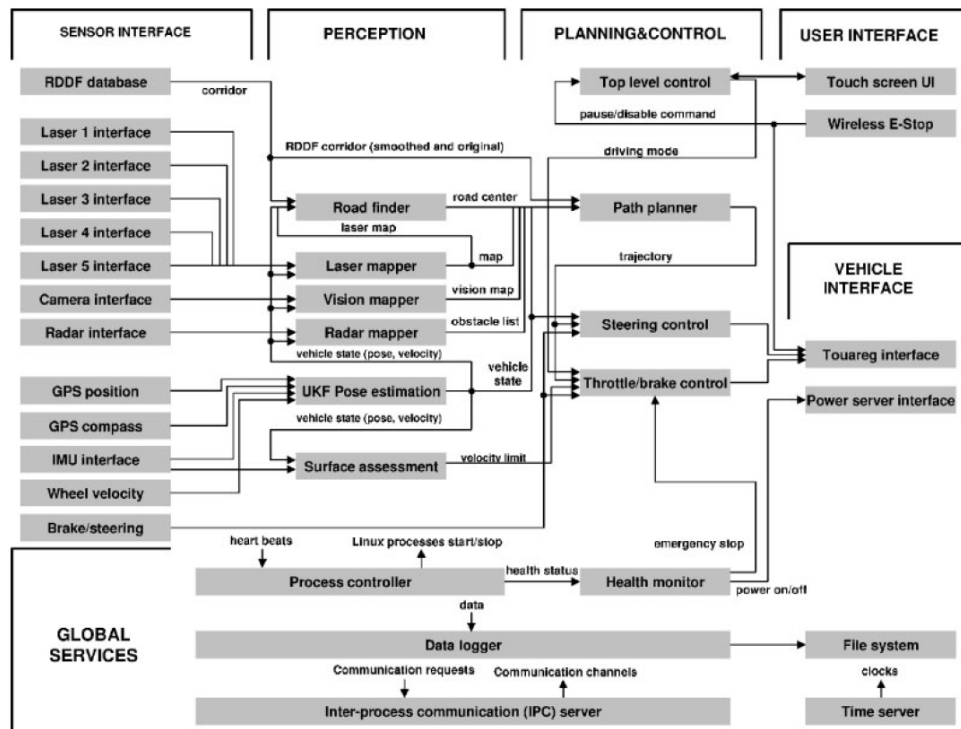


Figura 2.14: Arquitectura do *robot* STANLEY

2. *Perception* é responsável pelo mapeamento do que rodeia o *robot* através dos dados obtidos da primeira camada;
3. *Planning and Control* é responsável pela direcção, velocidade e travão;
4. *Vehicle interface* serve de interface dos travões, velocidade e direcção do veículo assim como, serve de interface ao sistema de regulação de alimentação, para todos os equipamentos;
5. *User Interface* compreende a interface gráfica de inicialização do *software*;
6. *Global services* fornece serviços básicos para os outros *layers*, como as comunicações entre os módulos, faz a monitorização do sistema e também faz “logs” dos dados obtidos para serem analisados posteriormente.

A arquitectura híbrida adoptada em [4] pelo Thurn no *robot* STANLEY, revelou-se uma boa aposta neste sistema, devido a complexidade do mesmo. Esta arquitectura permitiu ao *robot* STANLEY vencer o concurso Darpa Grand Challenge no ano 2005.

#### 2.6.4 Arquitectura ALLIANCE

A fim de automatizar um conjunto de *robots* que operam em equipa sem auxílio de um servidor central, Tippenhaeur [44] utiliza uma arquitectura designada ALLIANCE. Esta arquitectura tem a particularidade de todos os *robots* serem projectados com igual design para desempenharem iguais tarefas. É uma arquitectura de controlo tolerante a falhas, fiável e adaptável à cooperação entre pequenas e médias equipas de *robots* móveis heterogéneos, executando (em ambientes dinâmicos) missões compostas por diferentes tarefas que podem ter uma ordem de dependência. Utiliza uma abordagem intencional de cooperação. Foi utilizada por Tippenhaeur na concepção e implementação de uma arquitectura de um sistema *multirobot* com comportamentos autónomos e cooperativos entre *robots* individualmente. A questão fundamental é a atribuição de uma tarefa para o *robot* mais vocacionado para desempenho desta. Isso é resolvido com um comportamento sem uma abordagem baseada num controlo central.

### 2.7 Conclusões

A conclusão essencial deste capítulo é que os sensores necessários, algoritmos e métodos para desenvolver e demonstrar a operacionalidade de um ALV viável para todos os terrenos já existem, e podem ser facilmente mobilizados. A segunda conclusão, é que o desenvolvimento bem sucedido de um ALV irá depender de uma abordagem eficaz na engenharia de sistemas. Em particular, uma descrição precisa dos requisitos da missão, e uma clara definição do componente funcional é essencial.

## Capítulo 3

# Análise de Requisitos

### Conteúdo

---

<b>3.1</b>	<b>Ambiente de Operação</b>	<b>24</b>
3.1.1	Segurança de Perímetro	24
3.1.2	Vigilância e Reconhecimento	25
3.1.3	Comboio de Transporte	26
<b>3.2</b>	<b>Comunicações</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Estrutura</b>	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Interação Homem-Máquina</b>	<b>28</b>
<b>3.5</b>	<b>Sensores</b>	<b>29</b>
<b>3.6</b>	<b>Propulsão</b>	<b>30</b>
<b>3.7</b>	<b>Alimentação</b>	<b>30</b>
<b>3.8</b>	<b>Capacidade de Carga</b>	<b>30</b>
<b>3.9</b>	<b>Sistema Computacional</b>	<b>30</b>

---

A definição de uma análise de requisitos é a componente principal da resposta à questão, que com grande frequência nos deparamos, ou seja: *Como deverá ser o nosso sistema?*

A resposta a esta questão assenta numa descrição sucinta das aplicações para o qual o sistema deverá ser capaz de executar. Deste modo será apresentada uma análise sucinta de requisitos do sistema pretendido, sendo descritos alguns cenários de operação, requisitos físicos e mecânicos, tipos de missões a desempenhar, que tipo de sistema computacional deverá ter para corresponder as necessidades pretendidas bem como requisitos de energia e consumo.

### 3.1 Ambiente de Operação

O ALV deve ser capaz de efectuar missões em ambiente *indoor/outdoor*, nestes dois ambiente, o veículo deve ter a capacidade de trabalhar tanto de dia como de noite, em condições climáticas adversas, terreno acidentado e em diversos cenários de aplicação . De seguida alguns cenários de aplicação típicos irão ser descritos segundo a proba ELROB [45].

#### 3.1.1 Segurança de Perímetro

##### **Ambiente :**

Para a execução de missões de segurança de perímetro podemos encontrar ambientes diversificados, como por exemplo ambientes urbanos e semiurbanos, edifícios, infraestrutura, vegetação, caminhos acidentados, arbustos, estradas, vedações e chuva. Tendo em conta a diversidade dos ambientes existe a possibilidade da não existência de comunicações entre o ALV e o operador. O veículo deve possuir uma capacidade de locomoção tal, que lhe permita avançar nos mais diversos terrenos, deste modo o ALV deverá ser robusto e possuir meios de comunicação, navegação e locomoção eficazes.

##### **Situação :**

Uma área urbana previamente definida com uma área máxima 250 m<sup>2</sup>, tem que ser monitorizada sem quaisquer riscos para as pessoas.

##### **Objectivos :**

A execução da missão deve de obedecer a um tempo de missão previamente estabelecido tendo a missão como principais objectivos:

- Detectar e informar possíveis intrusos;
- Perseguir intrusos;
- Adquirir posição e imagem dos intrusos e transmitir para uma estação de controlo.

**Funcionalidades :**

- Iniciar o programa de configuração e monitorização de equipamentos;
- Adquirir posição (posição desconhecida);
- Monitorizar a área com a máxima autonomia possível;
- Procurar e encontrar intrusos;
- Adquirir constantemente a posição dos intrusos;
- Adquirir imagens dos intrusos.

O ALV deve ter a capacidade de execução da missão autonomamente após esta ser descarregada para o ALV, podendo ser tele-operado em algum momento caso exista a necessidade assim como o operador pode pedir ao veículo para adquirir imagens de determinados lugares. Os ALV deve ter a capacidade de detectar pessoas e objectos estranhos ao perímetro.

**3.1.2 Vigilância e Reconhecimento****Ambiente :**

O ambiente de operação para missões de vigilância e reconhecimento são semelhantes ao ambiente de operação descrito em [3.1.1](#).

**Situação :**

O ALV deve de fazer vigilância a uma área não-urbana desconhecida, e reconhecimento de locais previamente estabelecidos.

**Objectivos :**

A execução parcial da missão (reconhecimento) deve de ser executada no mínimo tempo possível tendo como objectivos:

- Realizar reconhecimento no local definido;

- Procura de veículos/pessoas com características especiais;
- Se encontrado, aquisição de imagem e posição dos veículos/pessoas e transmitir informação para uma estação de controlo.

#### **Funcionalidades :**

- Aproximação do local de destino usando marcadores de área;
- Monitorizar a área com a máxima autonomia possível;
- Visualização da rota do veículo numa estação de controlo;
- Realizar reconhecimento no local de destino;
- Procurar e encontrar intrusos;
- Adquirir constantemente a posição dos intrusos;
- Adquirir imagens dos intrusos;
- Se encontrado, aquisição de imagem e posição dos veículos/pessoas e transmitir informação para uma estação de controlo;
- Retirada do local de destino, para um local pré-definido.

O ALV deve possuir a capacidade de detecção dos marcadores de área que definem os locais de reconhecimento, existe também a necessidade constante por parte de um operador conhecer a posição do veículo.

### **3.1.3 Comboio de Transporte**

#### **Ambiente :**

O ambiente de operação para este tipo de missão, serão ambientes pouco estruturados, com áreas de difícil acesso (asfalto, gravilha cimento).

**Situação :**

O veículo deverá ser capaz entregar mercadoria num acampamento, a uma distância máxima de 700 *mts* podendo ser utilizados diversos veículos nesta missão.

**Objectivos :**

A carga a transportar é previamente definida, bem como o local de destino. O tempo de execução da missão deve ser o mais rápido possível.

**Funcionalidades :**

- Apenas um dos veículos pode ser tele-operado;
- Aproximação do local de destino usando marcadores de área;
- Aproximação deve ser feita com a máxima autonomia possível;
- Adquirir posição do veículo;
- Visualização da rota do veículo numa estação de controlo;
- Se possível transmitir imagem e posição dos veículos para uma estação de controlo;

Se a missão for executada com mais de um veículo, um dos veículos pode ser tele-operado, podendo este conter algum marcador para permitir aos restantes veículo segui-lo, a semelhança da missão de vigilância e reconhecimento existe também a necessidade constante por parte de um operador conhecer a posição dos veículos.

## 3.2 Comunicações

O veículo deverá possuir um sistema de comunicações sem fios que lhe permita executar todo e qualquer tipo de missões sem a necessidade de uma ligação física do veículo a uma estação de controlo. O sistema de comunicações terá de ter a capacidade de lidar com grandes fluxos de informação (como *streaming* de vídeo, informação do estado do veículo, comandos por parte do operador etc.). Uma das principais razões pela limitação de alcance de um ALV é normalmente o alcance limitado das comunicações, deste modo o

sistema deverá possuir um sistema de comunicações que lhe permita o alcance considerável em ambiente exterior pouco estruturado, assim como possuir um sistema de comunicação capaz de operar em ambientes muito estruturados, e também um sistema de comunicação através de uma ligação física de modo a permitir uma rápida intervenção por parte de um operador em fase experimental.

### 3.3 Estrutura

De modo a preencher os requisitos das diversas áreas de aplicação, a estrutura do veículo deve ser robusta e estar preparada para perturbações externas ao mesmo (como contacto com objectos e adversidades meteorológicas), bem como mecanicamente estável de modo a permitir um melhor controlo do mesmo. A estrutura do ALV deverá estar preparada para ser acomodada uma carga de até 100kg, deverá possuir um sistema de locomoção capaz de superar todos os aspectos referidos em 3.1, assim como deverá ser de tal forma robusta de maneira a ter o mínimo de manutenção possível (carregamento das baterias e pouco mais).

### 3.4 Interação Homem-Máquina

A interacção Homem-Máquina têm de ser definida de modo a otimizar o desempenho do veículo, permitindo a execução de diferentes tarefas como controlo e supervisão, tele-operação, controlo de uma frota de veículos, análise de locais pré-determinados e até recolha de dados. A interacção pode ser feita localmente ou remotamente através do uso de interfaces (gráficas ou consola de texto), que permitam a interacção com o veículo podendo até mesmo existir várias interfaces consoante a missão a desempenhar. Para inicializar o sistema, é necessário que um operador ligue a alimentação do veículo, após o arranque, o sistema entra num modo de *stand-by*, em seguida é necessário inicializar a aplicação de forma a inicializar todos os sensores e actuadores existentes no ALV. Quando o sistema se encontra inicializado, será possível ao operador definir o tipo de missão, podendo ser como autónoma (enviando de uma estação o caminho desejado para o ALV efectuar), tele-operado (o operador é capaz de controlar o veículo a partir de estação de controlo) e semi-autónomo (combinando o modo de tele-operação com o modo autónomo). O veículo poderá ser controlado remotamente ou localmente (em fase experimental). Para garantir

a segurança do veículo, é necessário este possuir sistema de paragem de emergência, este deverá ser constituído por dois modos: um por *software* (onde o utilizador envia um comando de paragem) e outro por *hardware* (aplicação de botões de emergência no veículo). Nestes dois modos de paragem de emergência, a alimentação dos motores (tracção e direcção) terão de ser cortadas de modo a garantir uma maior segurança. Outro processo de interacção entre o operador e o veículo passa pelo carregamento das baterias, estas devem estar instaladas num lugar de fácil acesso para permitir uma facilidade na substituição das mesmas ou mesmo o seu carregamento no próprio veículo.

### 3.5 Sensores

De modo a permitir uma melhor perspectiva do ambiente que rodeia, e para este, preencher os requisitos impostos pelos vários ambientes de operação, o ALV deve possuir sensores que o lhe permita saber onde está no mundo e a sua direcção, assim como sensores que lhe permitam detectar objectos, medir distâncias, saber consumos energéticos do sistema, saber a velocidade a que o veículo se encontra, distância percorrida e também imagens do ambiente a volta deste, deste modo surge a necessidade de classificar os sensores em três categorias: Por **aplicação**, devido aos requisitos definidos anteriormente é necessário a existência de sensores de percepção visual que permitam identificar e detectar objectos específicos e até mesmo possíveis intrusos ao meio, bem como sensores de percepção do meio ambiente que permitam a detecção de obstáculos no caminho do ALV. Por **navegação**, dada a natureza do veículo e ao seu grau de autonomia é necessário sensores capazes de fornecer a posição do veículo num determinado referencial, a velocidade á que este se desloca assim como a distância percorrida pelo mesmo . Por fim sensores que permitam conhecer o **estado do veículo**, permitindo uma melhor optimização na utilização do mesmo, permitindo ter um conhecimento da autonomia do ALV, estado dos diversos sistemas existentes a bordo bem como um sistema de comunicação que assegure que toda a informação necessária a trocar entre uma estação base e o Veículo/veículos, sejam efectuadas. A utilização deste conjunto de sensores torna possível o desenvolvimento de um veículo autónomo, visto que sem tais sensores era impossível controlar/localizar o veículo, tornando impossível o desenvolvimento de um veículo autónomo capaz de operar nos ambientes de descritos em 3.1.

### **3.6 Propulsão**

Para uma melhor eficiência do veículo, o método de propulsão a utilizar deve ser leve, ter um elevado desempenho e e baixo consumo energético, a velocidade requerida para este sistema não deve ser muito elevada.

### **3.7 Alimentação**

Tendo em conta que todos os equipamentos utilizados necessitam de energia eléctrica, o veículo deverá possuir baterias com uma elevada densidade energética, de modo a garantir o bom funcionamento dos equipamentos presentes no ALV. As baterias terão de ter a capacidade de alimentar o veículo no mínimo 4horas.

### **3.8 Capacidade de Carga**

A capacidade de carga é um factor relevante na escolha da plataforma a utilizar, está deve ter capacidade útil de carga de modo a cumprir os requisitos de operação (pelo menos 100kg).

### **3.9 Sistema Computacional**

O sistema deverá possuir recursos computacionais, tais que, estes permitam adquirir dados de todos os sensores e fazer o respectivo processamento dos mesmos, bem como todo o processamento dos algoritmos de controlo e localização. Tendo em conta a necessidade de processamento em tempo real, a capacidade de processamento deve ser relativamente alta, para diminuir ao máximo os atrasos no processamento dos diferentes algoritmos.

## Capítulo 4

# Controlo de Locomoção

### Conteúdo

---

<b>4.1</b>	<b>Cinemática de um <i>Robot</i> Móvel . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelização do Sistema . . . . .</b>	<b>32</b>
4.2.1	Modelo Cinemático . . . . .	33
4.2.2	Modelo Dinâmico . . . . .	36
<b>4.3</b>	<b>Controlo de Trajectória . . . . .</b>	<b>38</b>
4.3.1	Orientação em Linha Recta . . . . .	39
4.3.2	Orientação em Linha Curva . . . . .	41
<b>4.4</b>	<b>Motores <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) . . . . .</b>	<b>42</b>
4.4.1	Introdução . . . . .	42
4.4.2	Construção e Princípios de Funcionamento . . . . .	43
4.4.3	Sequência de Comutação . . . . .	46
4.4.4	Back EMF . . . . .	48
4.4.5	Comparação entre um Motor BLDC e um Motor BDC . . . . .	48

---

### 4.1 Cinemática de um *Robot* Móvel

A cinemática é o estudo mais básico de como os sistemas mecânicos se comportam, centrando-se nas relações geométricas do movimento. Em robótica móvel, é necessário entender o comportamento mecânico do *robot*, quer para uma concepção adequada de um *robot* para uma determinada tarefa, quer para entender como criar um *software* de controlo adequado a um determinado *hardware*. Obviamente, os *robots* móveis não são

os primeiros sistemas mecânicos complexos a exigir tal análise. *Robots* manipuladores têm sido objecto de estudo intensivo. De certa forma, os *robots* manipuladores são muito mais complexos que os *robots* móveis iniciais. A comunidade de robótica móvel representa muitas das mesmas questões cinemáticas que a comunidade de *robots* manipuladores. O espaço de um *robot* móvel é fundamental porque define o intervalo de posições possíveis que o *robot* móvel pode atingir no seu ambiente. A controlabilidade de um *robot* móvel define os caminhos e trajectórias possíveis no seu espaço de trabalho. A dinâmica de um *robot* traz restrições adicionais ao espaço de trabalho e à trajectória, devido às considerações da massa e da força. Um *robot* móvel é também limitado pela dinâmica, por exemplo, um elevado centro de gravidade, limita o raio de curvatura de um *robot* tipo carro rápido, por causa do perigo de virar. O processo de compreender os movimentos de um *robot* começa com o processo de descrever a contribuição de cada roda ao movimento. Para que o *robot* inteiro se mova, cada roda desempenha um papel importante, por esta mesma razão, cada roda também impõe restrições ao movimento do *robot*. A derivação de um modelo para todo o movimento de *robot* é um processo ascendente. Cada roda contribui para o movimento do *robot* e, ao mesmo tempo, impõem restrições ao movimento do mesmo. As rodas são parte integrante da geometria do chassi do *robot*, e portanto, suas restrições combinam-se para formar as restrições sobre o movimento global do chassi do *robot*. Mas as forças e limitações de cada roda devem ser expressas com relação a um claro e consistente referencial.

## 4.2 Modelização do Sistema

A modelização de um veículo é uma componente muito importante para a navegação e desenvolvimento de um veículo autónomo. No entanto, a questão de modelização do veículo com precisão é muito negligenciada na literatura. Uma das questões mais importantes na modelização é saber a limitação do modelo seleccionado. Por exemplo, no caso de um modelo cinemático puro, é importante conhecer a gama operacional onde o modelo é válido. Um simples modelo cinemático pode ser muito preciso para prever a trajectória de um veículo enquanto este se desloca em linha recta. No entanto, pode ter erros significativos quando o veículo curva (que provoca uma deformação nos pneus) ou quando a carga varia (o raio dos pneus varia). Existem diferentes tipos de modelos que podem ser utilizados para uma aplicação específica, como o modelo cinemático, dinâmico ou o modelo

equivalente. Desta forma irão ser apresentados o modelo cinemático e o modelo dinâmico com direcção *Ackerman*. Uma referência muito mais detalhada sobre os vários aspectos de modelização do veículo e como se relacionam com a navegação pode ser encontrada em [13].

### 4.2.1 Modelo Cinemático

Um método para obter um modelo do veículo consiste nas considerações das suas restrições cinemáticas. Estas são impostas quer pela estrutura, quer pelas restrições de rotação e contacto das rodas. Nas restrições da estrutura do veículo, assume-se que o veículo é uma armação rígida, enquanto que para o movimento de rotação, assume-se que todos os pontos sobre o veículo rodam instantaneamente sobre o centro de rotação com a mesma velocidade angular. Assume-se ainda que não há escorregamento entre pneus do veículo e solo, e que o movimento do veículo pode ser devidamente representado como um modelo bidimensional cujo movimento é restrito a um plano. As restrições mencionadas acima têm um efeito adicional na redução do número total de graus de liberdade de um veículo tipo *Ackerman* de um total de seis (as velocidades de cada roda mais o ângulo de cada roda da frente), para dois. É muitas vezes conveniente para efeitos de modelização, substituir as quatro rodas de um veículo tipo *Ackerman* por duas rodas “virtuais” localizadas ao longo do eixo central do veículo como pode ser visto na figura 4.1. Estas rodas virtuais incorporam os dois graus de liberdade que são deixadas devido as restrições da estrutura acima mencionadas.

O primeiro passo a executar na derivação é criar o modelo cinemático, explorando as restrições não-holonómicas. Um sistema não-holonómica podem ser interpretado como um sistema não integrável. As restrições relacionadas a um automóvel são as da velocidade do veículo. Como resultado, a forma geral das restrição não-holonómicas de uma roda sujeita a

$$\dot{u} \sin(\theta) - \dot{w} \cos(\theta) = 0 \quad (4.1)$$

onde  $\dot{u}$  e  $\dot{w}$  são a velocidade de uma roda dentro de um dado  $(u, w)$  sistema de coordenadas, e  $\theta$  é o ângulo da roda em relação ao eixo- $x$ . Com isto em mente, examinamos um modelo geral, com a roda da frente a conduzir e a tracção na roda de trás.

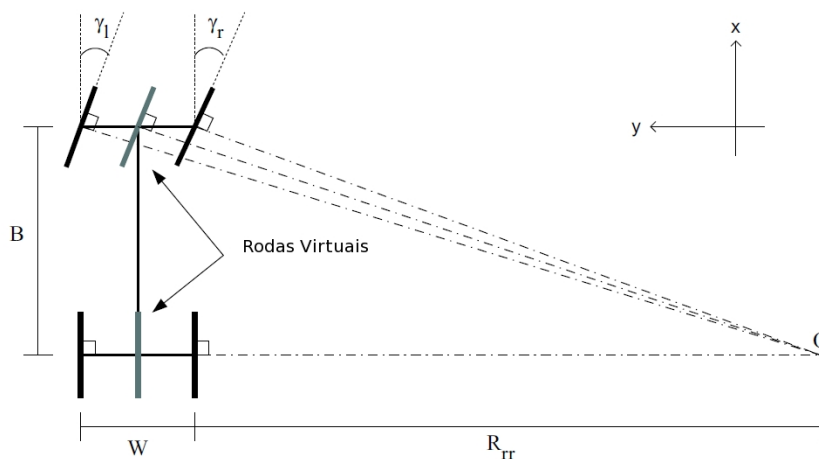


Figura 4.1: Geometria da direção do tipo *Ackerman*

Para pequenos ângulos de direção, o carro pode ser modelizado como uma bicicleta, como exemplificado na figura 4.2.

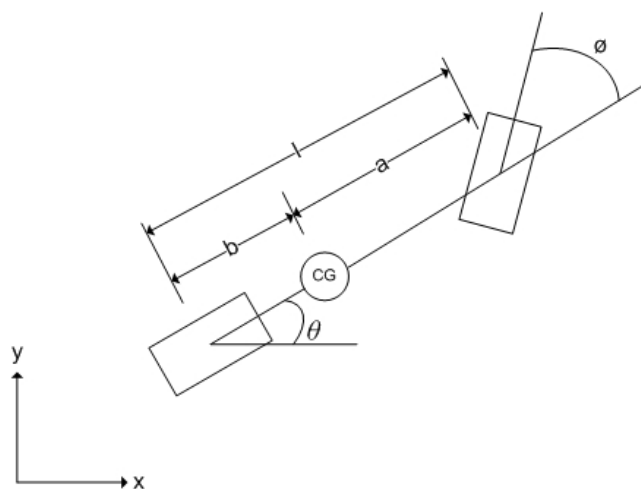


Figura 4.2: Coordenadas gerais para um *robot* do tipo carro

Denota-se  $(x, y)$  como sendo a posição do centro de gravidade,  $\theta$  a orientação do veículo em relação ao eixo- $x$ ,  $\phi$  o ângulo de direção entre a roda da frente e o eixo do corpo do veículo,  $a$  a distância entre o centro de gravidade e o eixo dianteiro e  $b$  a distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade. Onde  $(x_1, y_1)$  denota a posição do eixo traseiro, e  $(x_2, y_2)$  denota a posição do eixo dianteiro. Isto define,

$$x_1 = x - b \cos(\theta) \quad x_2 = x + a \cos(\theta)$$

$$y_1 = y - b \sin(\theta) \quad y_2 = y + a \sin(\theta)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x} + b\dot{\theta} \sin(\theta) \quad \dot{x}_2 = \dot{x} - a\dot{\theta} \sin(\theta)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y} - b\dot{\theta} \cos(\theta) \quad \dot{y}_2 = \dot{y} + a\dot{\theta} \cos(\theta)$$

As restrições não-holonómicas são então escritas para cada roda, resultando em

$$\dot{x}_1 \sin(\theta) - \dot{y}_1 \cos(\theta) = 0 \quad (4.2)$$

$$\dot{x}_2 \sin(\theta + \phi) - \dot{y}_2 \cos(\theta + \phi) = 0 \quad (4.3)$$

Substituindo a definição de  $(\dot{x}_1, \dot{y}_1)$  e  $(\dot{x}_2, \dot{y}_2)$  nas equações 4.2 e 4.3 obtemos

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) + b\dot{\theta} = 0 \quad (4.4)$$

$$\dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y} \cos(\theta + \phi) + a\dot{\theta} \cos(\theta) = 0 \quad (4.5)$$

usando o sistema de coordenadas do veículo, como demonstra a figura 4.3, define o eixo- $u$  como sendo o eixo ao longo do comprimento do veículo e o eixo- $w$  normal ao eixo- $u$

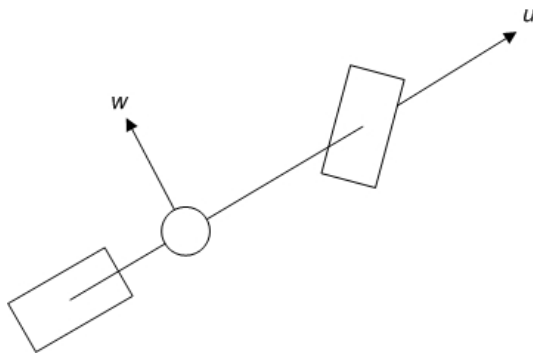


Figura 4.3: Coordenadas no corpo do veículo

definindo

$$\dot{x} = v_u \cos(\theta) - v_w \sin(\theta)$$

$$\dot{y} = v_u \sin(\theta) + v_w \cos(\theta)$$

onde  $v_u$  e  $v_w$  são as velocidades do centro de gravidade ao longo dos eixos  $u$  e  $w$ , respectivamente. Substituindo estas definições nas equações 4.4 e 4.5 obtemos

$$v_w = \dot{\theta}b \quad (4.6)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\tan(\phi)}{l}v_u \quad (4.7)$$

deste modo, a derivação das equações não-holonómicas são

$$\dot{v}_w = \ddot{\theta}b \quad (4.8)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tan(\phi)}{l}\dot{v}_u + \frac{v_u}{l(\cos\phi)^2}\dot{\phi} \quad (4.9)$$

### 4.2.2 Modelo Dinâmico

Estas equações dinâmicas são semelhantes as encontrados em [46, 47, 48], com algumas suposições acrescentadas. Estes pressupostos adicionados são que não há força de atrito entre as rodas e veículo, e que as rodas traseiras estão bloqueadas para estarem na mesma orientação que o veículo. Outras suposições usadas tanto em [46, 47, 48] como nesta derivação é que não ocorre deslizamento nas rodas, e que a força motriz, com base no raio da roda e o binário do motor, pode ser modelado como actuando no centro das rodas traseiras. Com a suposição do deslizamento vem um par de forças, um actuando em cada roda, perpendicular à mesma. As forças envolvidas nesta derivação são mostrados na figura 4.4.

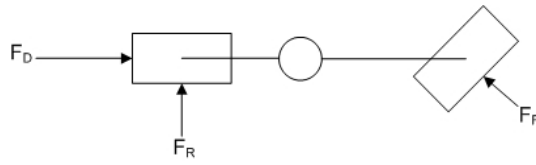


Figura 4.4: Forças aplicadas e forças resultantes ao veículo

As equações dinâmicas resultantes são

$$\dot{v}_u = v_w \dot{\theta} - \frac{F_F \sin \phi}{m} + \frac{F_D}{m} \quad (4.10)$$

$$\dot{v}_w = -v_u \dot{\theta} + \frac{F_F \cos \phi}{m} + \frac{F_R}{m} \quad (4.11)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{aF_F \cos \phi}{J} - \frac{bF_R}{J} \quad (4.12)$$

Onde  $m$  e  $J$  são a massa e o momento de inércia do veículo em relação ao centro de gravidade.  $F_D$  é a força motriz aplicada no eixo traseiro, ao longo do eixo- $u$ , e  $F_F$  e  $F_R$  são as forças laterais resultantes na roda da frente e de trás respetivamente.

Resolvendo a equação 4.12 em ordem a  $F_R$  obtemos

$$F_R = \frac{aF_F \cos \phi}{b} - \frac{J\ddot{\theta}}{b} \quad (4.13)$$

Substituindo as equações 4.8 e 4.13 nas equações 4.11 temos

$$\ddot{\theta} b = -v_u \dot{\theta} + \frac{F_F \cos \phi}{m} + \frac{aF_F \cos \phi}{bm} - \frac{J\ddot{\theta}}{bm} \quad (4.14)$$

Resolvendo a equação 4.14 ou  $F_F$  temos

$$F_F = \frac{b^2 m + J}{l \cos \phi} \ddot{\theta} + \frac{bm}{l \cos \phi} v_u \dot{\theta} \quad (4.15)$$

Substituindo as equações 4.6, 4.7, 4.9 e 4.15 na equação 4.10 temos

$$\dot{u}_v = \frac{v_u(b^2m+J) \tan\phi}{\gamma} \dot{\phi} + \frac{l^2(\cos\phi)^2}{\gamma} F_D \quad (4.16)$$

$$\gamma = (\cos\phi)^2[l^2m + (b^2m + J)(\tan\phi)^2] \quad (4.17)$$

Substituindo as equações 4.16 e 4.7 na definição de velocidade e escolhendo os estados para serem  $X = [x \ y \ \theta \ v_u \ F_D \ \phi]'$ , encontramos

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \left[ \cos\theta - \frac{b \tan\phi}{l} \sin\theta \right] v_u \\ \dot{y} &= \left[ \sin\theta + \frac{b \tan\phi}{l} \cos\theta \right] v_u \\ \dot{\theta} &= \frac{\tan\phi}{l} v_u \\ \dot{v}_u &= \frac{v_u(b^2m + J) \tan\phi}{\gamma} \dot{\phi} + \frac{l^2(\cos\phi)^2}{\gamma} F_D \\ \dot{F}_D &= f(F_D, v_u, u_1) \\ \dot{\phi} &= f(\phi, u_2) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Onde  $\gamma$  é definido pela equação 4.17  $\dot{F}_D$  é dado em função da força motriz de tracção  $F_D$ , da velocidade do centro de gravidade do corpo ao longo do respectivo eixo ( $v_u$ ) e respectiva estrada de controlo  $u_1$ , e  $\dot{\phi}$ , é dada em função da posição do *encoder*  $\phi$  e da respectiva entrada de controlo  $u_2$ .

### 4.3 Controlo de Trajectória

Para o controlo da trajectória do veículo são utilizadas leis de estabilização de trajectória para linhas rectas e curvas. O controlador de trajectórias, indica a orientação do veículo em cada ponto da trajectória que normalmente é a tangente à trajectória, e uma velocidade nominal. O conjunto velocidade/posição é uma referência mais geral e que no caso de seguimento ideal, permite-nos definir qual a trajectória seguida. Para o caso em questão a referência para o veículo vai ser a posição do veículo, orientação  $\theta$  e a velocidade linear.

Considera-se como erro de orientação  $e_\phi$ , a diferença entre a tangente à trajectória nesse ponto e a orientação do veículo. Considera-se também o erro em distância do veículo à

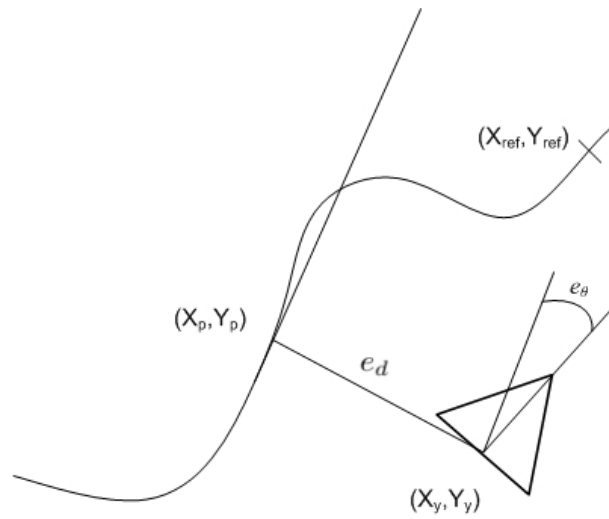


Figura 4.5: Exemplo do seguimento de uma trajectória

trajectória  $e_d$  (distância menor entre posição do veículo e a trajectória requerida). Estes dois erros vão influenciar a orientação do *robot*. Um controlador simples que permite guiar o veículo para a trajectória de referência pode ser um controlador PID. No nosso caso usamos apenas o controlador proporcional com os dois erros acima mencionados. Dois ganhos proporcionais são pois utilizados:

1.  $K_d$  - Convergência para o centro da linha ou trajectória;
2.  $K_\phi$  - Ângulo ao centro da trajectória.

Com a calibração destes ganhos, obtemos uma melhor trajectória executado pelo veículo, minimizando os desvios da mesma.

### 4.3.1 Orientação em Linha Recta

Particularizando para o caso de uma recta (figura 4.6) como trajectória de referência definida pelos seus pontos iniciais  $(X_F - X_I)$  e finais  $(Y_F - Y_I)$  obtemos

$$\theta_{ref} = \arctan\left(\frac{Y_F - Y_I}{X_F - X_I}\right) \quad (4.19)$$

obtendo assim o erro de orientação definido por  $e_\phi$

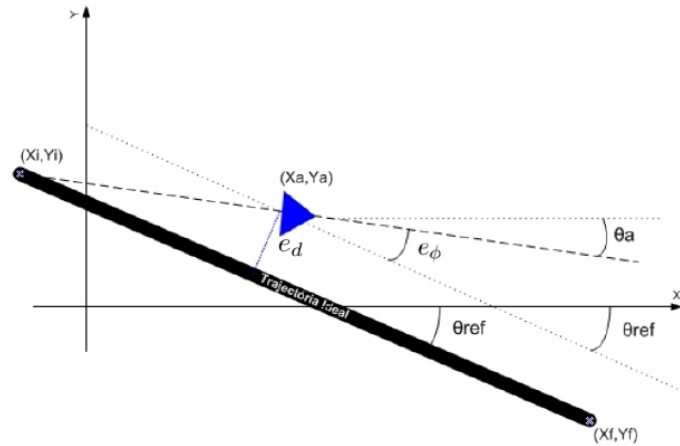


Figura 4.6: Exemplo 1 de um *robot* numa recta

$$e_{\phi} = \theta_{ref} - \theta_a \quad (4.20)$$

O valor obtido corresponde à variação que deve ser efectuada para que o *robot* convirja para o ângulo de referência (figura 4.7).

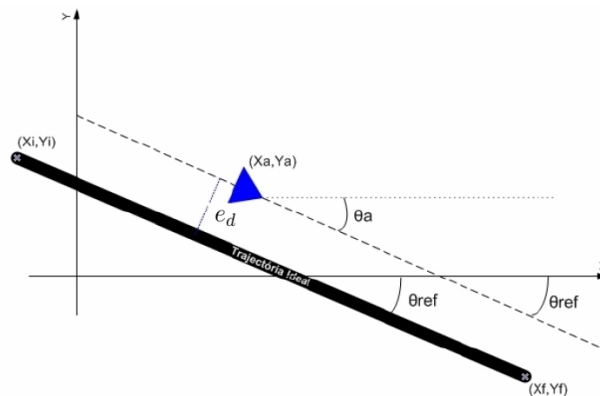


Figura 4.7: Exemplo 2 de um *robot* numa recta

Após a correcção ao ângulo de orientação do veículo, é necessário uma correcção em relação à trajectória ideal, onde  $e_d$  é dado por

$$e_d = -\sin(\theta_{ref}).(X_a - X_i) + \cos(\theta_{ref}).(Y_a - Y_i) \quad (4.21)$$

### 4.3.2 Orientação em Linha Curva

Para a execução de uma linha curvilínea em comparação com a execução de uma linha recta, existe um novo factor, a aceleração centrífuga que leva com que o *robot* se afaste da trajectória ideal. A melhor maneira de contornar este problema é controlar a velocidade dinamicamente, permitindo assim reduzir a velocidade na entrada da curva e acelerar na saída da mesma. Desta forma, para a orientação do veículo em linha (figura 4.6) curva temos que

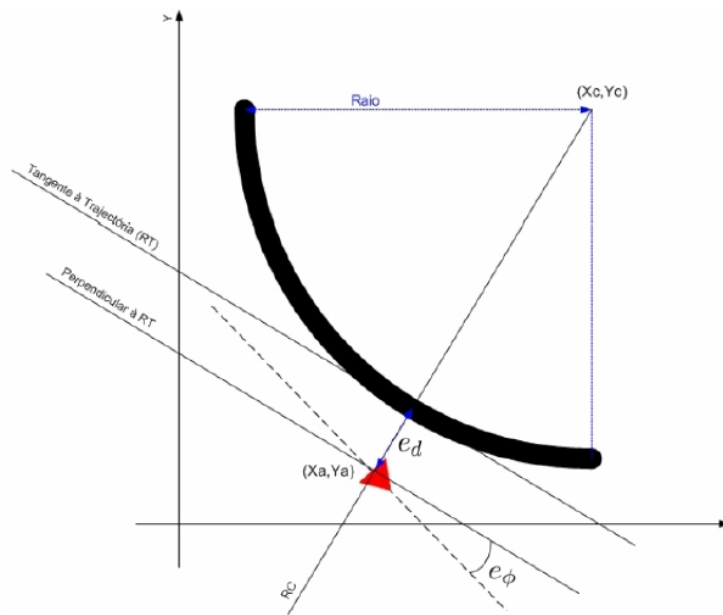


Figura 4.8: Exemplo de um *robot* numa curva

$$e_d = d.\sqrt{(X_c - X_a)^2 + (Y_c - Y_a)^2} \quad (4.22)$$

onde  $e_d$  corresponde a correcção em relação à trajectória ideal e  $d$  ao sentido de rotação onde

$d=1$  : sentido directo ( $v>0$  e  $w>0$  ou  $v<0$  e  $w<0$ )

$d=-1$  : sentido retrógado ( $v$  e  $w$  de sinal diferente)

A orientação da curva é dada por

$$\theta_{ref} = \arctan\left(\frac{Xa + Xc}{Yc - Ya}\right) \quad (4.23)$$

obtendo assim o erro de orientação definido por  $e_\phi$

$$e_\phi = \theta_{ref} - \theta_a \quad (4.24)$$

## 4.4 Motores *Brushless Direct Current* (BLDC)

### 4.4.1 Introdução

Os BLDC são um tipo de motores, que tem vindo a ganhar popularidade muito rapidamente nos últimos anos. Os motores BLDC são utilizados nas indústrias aeroespaciais, médicas, automóvel, consumo, equipamentos e de instrumentação. Como o nome indica, os motores BLDC não utilizam escovas de comutação, em vez disso, eles são comutados electronicamente, tendo também muitas vantagens sobre os motores *Brushed Direct Current* (BDC) e os motores de indução. Entre estas temos:

- Melhor velocidade versus características de binário;
- Alta resposta dinâmica;
- Alta eficiência;
- Longa vida operacional;
- Funcionamento silencioso;
- Maior gama de velocidades.

Além disso, a razão de binário entregue versus tamanho do motor é maior, tornando-se útil em aplicações onde espaço e peso são factores críticos.

#### 4.4.2 Construção e Princípios de Funcionamento

Os motores BLDC (figura 4.9) são um tipo de motor síncrono, significando deste modo que o campo magnético gerado pelo estator e o campo magnético gerado pelo rotor rodam à mesma frequência. Nestes motores o “escorregamento”, que normalmente é visto nos motores de indução, não acontece. Os motores BLDC podem ter uma única fase, 2 fases e 3 fases. Destes 3 tipos os de 3 fases são os mais populares e amplamente utilizados.



Figura 4.9: Motor BLDC

##### 4.4.2.1 Estator

O estator de um motor BLDC assemelha-se tradicionalmente ao estator de um motor de indução, porém os enrolamentos são distribuídos de uma maneira diferente. A maioria dos motores BLDC tem três enrolamentos no estator ligados em estrela. Cada um dos enrolamentos são construídos com inúmeras bobinas interconectadas para formar um enrolamento. Cada um destes enrolamentos são distribuídos ao longo da periferia do estator para formar um número par de pólos. Existem dois tipos de enrolamentos no estator: trapezoidal e sinusoidais. Esta diferenciação é feita com base na interligação de bobinas nos enrolamentos do estator, de forma a dar diferentes tipos de força contra-eletromotriz (*Back Electromotive Force* - BEMF). Como os seus nomes indicam, o motor tem uma saída de BEMF trapezoidal (figura 4.10) ou sinusoidal (figura 4.11).

Isto faz com que o binário produzido por um enrolamento sinusoidal seja mais suave do que o binário produzido por um enrolamento trapezoidal. No entanto, este vem com

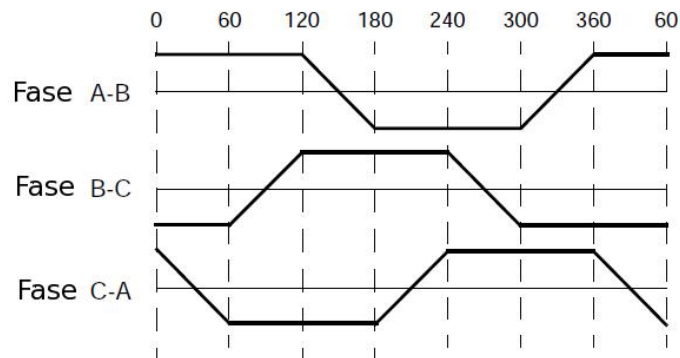


Figura 4.10: Trapezoidal BEMF

um custo extra, porque os motores sinusoidais precisam de mais cobre nos enrolamentos, devido à distribuição dos enrolamentos no estator.

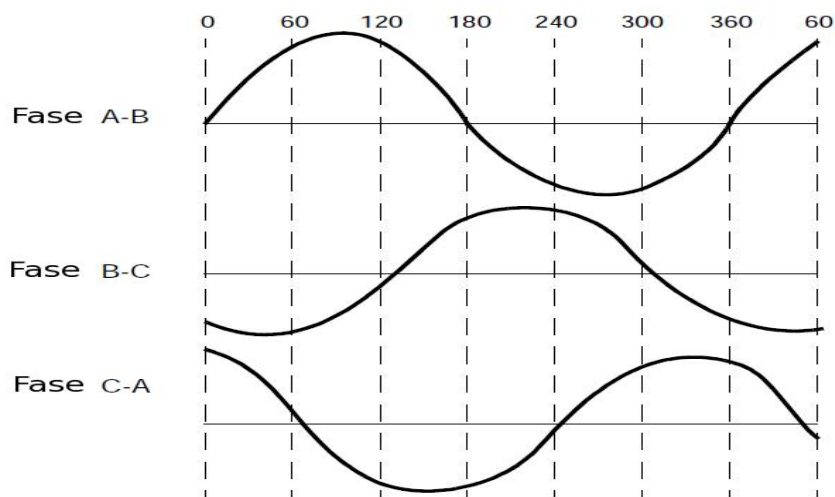


Figura 4.11: Sinusoidal BEMF

#### 4.4.2.2 Rotor

O rotor de um motor BLDC, é constituído por ímanes permanentes, que pode variar entre 2 e  $n$  pares de pólos, alternado o pólo norte (N) e o pólo sul (S). Com base na densidade do campo magnético exigido no rotor, o material magnético apropriado é escolhido para fazer o rotor, sendo as ferrites magnéticas tradicionalmente usadas para fazer os ímanes permanentes. Com o avanço tecnológico, as ferrites magnéticas têm vindo a apresentar um custo de produção reduzido, no entanto têm a desvantagem da baixa densidade

do fluxo em relação ao volume. Em contraste, as ligas magnéticas têm alta densidade por volume e permitem uma diminuição do rotor para o mesmo binário. A figura 4.12 mostra diferentes formas de posicionamento dos ímanes permanentes no rotor.

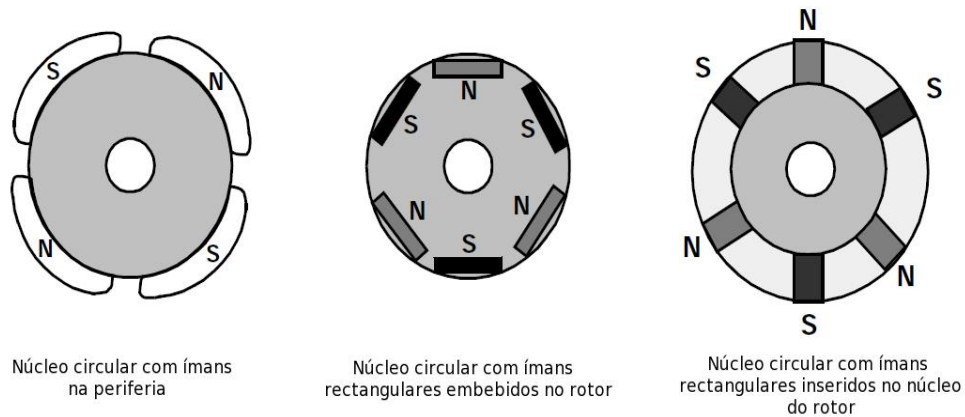


Figura 4.12: Secções transversais do rotor

#### 4.4.2.3 Sensores de *Hall*

Ao contrário de um motor BDC, a comutação de um motor BLDC é controlada eletronicamente. Para rodar um motor BLDC, os enrolamentos do estator devem ser alimentados numa determinada sequência. É importante conhecer a posição do rotor a fim de compreender quais as fases a serem alimentadas para dar início à sequência. Para detectar a posição do rotor, podem ser usados sensores de efeito *Hall* embutidos no estator ou por BEMF. A maioria dos motores BLDC tem três sensores de efeito de *Hall* posicionados no estator. Sempre que os pólos magnéticos do rotor passam perto dos sensores de *Hall*, eles dão um sinal alto ou baixo, indicando qual dos pólos N ou S, está a passar perto dos sensores. Com base na combinação dos sinais destes três sensores de *Hall*, a sequência exacta de comutação pode ser determinada.

A figura 4.13 mostra uma seção transversal de um motor BLDC onde é possível ver no rotor os ímanes permanentes N e S alternados. Os sensores de *Hall* estão embutidos na parte estacionária do motor, o processo de colocação dos sensores de *Hall* no estator é um processo complexo, porque qualquer desvio nos sensores de *Hall* relativamente aos ímanes permanentes do rotor, irá gerar um erro na determinação da posição do rotor. Para simplificar o processo de montagem dos sensores de *Hall* no estator, alguns motores podem ter ímanes dos sensores de *Hall*, para além dos ímanes do rotor principal. Deste

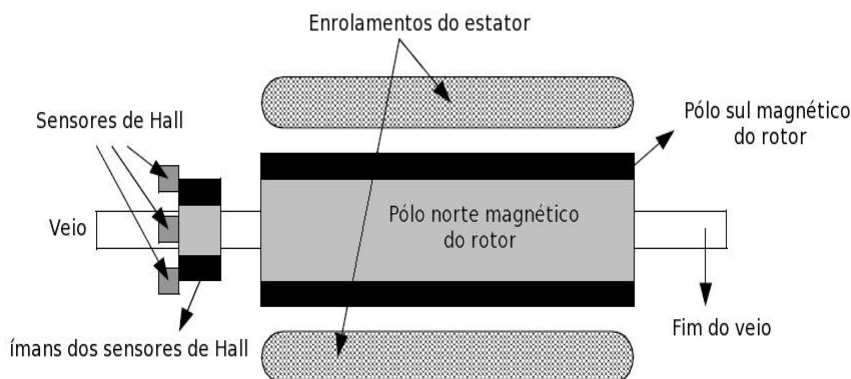


Figura 4.13: Secção transversal de um motor BLDC

modo, sempre que o rotor gira, os ímãs dos sensores de *Hall* dão o mesmo efeito que os ímãs principais. Com base nas posições físicas dos sensores de *Hall*, existem duas versões do produto. Os sensores de *Hall* podem ser de  $60^\circ$  ou  $120^\circ$  defasados entre si. Com base na versão do fabricante, define-se a sequência de comutação, que deverá ser seguido para o controlo do motor.

#### 4.4.2.4 Teoria de Operação

Cada sequência de comutação, tem um enrolamento alimentado positivamente (a corrente entra no enrolamento), o segundo enrolamento é negativo (a corrente sai do enrolamento) e o terceiro não é alimentado. O binário é produzido devido a interacção entre o campo magnético gerado pelas bobinas do estator e os ímãs permanentes. Para manter o motor em funcionamento, o campo magnético produzido pelos enrolamentos deve mudar de posição, enquanto o rotor move-se para acompanhar o campo magnético. O que é conhecido como “*Six-Step Commutation*”, que define a sequência de alimentação dos enrolamentos.

#### 4.4.3 Sequência de Comutação

A cada  $60^\circ$  de rotação, um dos sensores de *Hall* muda de estado. Perante isto, a sequência de comutação tem seis etapas para completar um ciclo eléctrico. Em sincronismo, com cada  $60^\circ$  eléctricos, a fase actual de comutação deve ser actualizada. No entanto, um círculo eléctrico pode não corresponder a uma volta mecânica completa do rotor. O número de ciclos eléctricos a ser repetido para completar uma rotação mecânica

é determinado pelo número de pares de pólos do rotor. Para cada par de pólos do rotor, um ciclo eléctrico é concluída. Portanto, o número de ciclos eléctricos/rotações iguala o número de pares de pólos.

Tabela 4.1: Sequência de comutações

Sequência	Sensores de Hall			PWMs Activos		Fases		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-

A tabela 4.1 mostra a sequência das comutações baseadas nas entradas dos sensores de *Hall* A, B e C, exemplificando deste modo a rotação no sentido horário do motor, para rodar no sentido anti-horário as comutações devem ser dadas pela ordem contrária (do 6 para o 1). Este é um exemplo de sensores de *Hall* desfasados  $60^\circ$  entre si. A figura 4.14 mostra o diagrama de blocos do controlador utilizado para controlar um motor BLDC. Os sinais marcados por *Pulse Width Modulation* (PWM) são ligados ou desligados de acordo com a sequência de comutação, entrando deste modo o motor em rotação, a uma velocidade nominal. Para variar a velocidade, o PWM deve ser dado a uma frequência muito maior do que a frequência do motor. Quando o *duty cycle* de PWM é variado dentro das sequências de comutação, a tensão média fornecida ao estator diminui, reduzindo assim a velocidade.

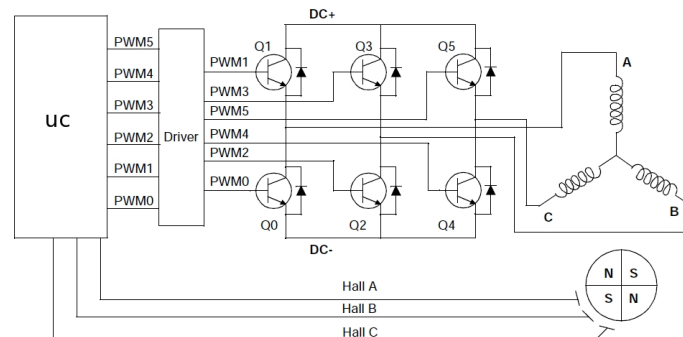


Figura 4.14: Diagrama de blocos do controlador de um motor BLDC

#### 4.4.4 Back EMF

Quando um motor BLDC entra em rotação, cada enrolamento produz uma tensão conhecida (BEMF anglo-saxónico), que se opõe à tensão fornecida aos enrolamentos de acordo com a lei de Lenz. A polaridade do BEMF é contrária à polaridade da tensão fornecida aos enrolamentos. O BEMF depende principalmente de três factores:

- A velocidade angular do rotor;
- A campo magnético gerado pelos ímanes permanentes do rotor;
- O número de voltas nos enrolamentos do estator.

Depois de o motor estar concebido, o campo magnético do rotor e o número de voltas nos enrolamentos do estator permanecem constantes. O único factor que altera o valor do BEMF é a velocidade angular ou a velocidade do rotor, e à medida que a velocidade aumenta, aumenta também o BEMF.

A diferença de potencial que passa num enrolamento pode ser calculada subtraindo o valor do BEMF à tensão de alimentação. Os motores são concebidos com um BEMF constante, de tal forma que, quando o motor se encontra em funcionamento à velocidade nominal, a diferença de potencial entre o BEMF e a tensão de alimentação será suficiente para fornecer ao motor a corrente e o binário necessário. Se o motor roda para além da velocidade nominal, o BEMF pode aumentar substancialmente, diminuindo assim a diferença de potencial, que terá como consequência a redução da corrente consumida, que resulta na diminuição do binário.

#### 4.4.5 Comparação entre um Motor BLDC e um Motor BDC

Comparando com um motor BDC, os motores BLDC tem muitas vantagens e poucas desvantagens. Os motores BLDC exigem menos manutenção, deste modo eles têm uma vida mais longa em comparação com os motores BDC. Os motores BLDC produzem mais potência por relação de tamanho do que um motor BDC, isto deve-se ao facto de o rotor ser constituído por ímanes permanentes, a inércia do rotor é menor, melhorando deste modo as características de aceleração e de desaceleração. Com os motores BLDC a inspecção das escovas é eliminada, tornando-os ideal para um acesso em áreas limitadas e aplicações onde o serviço é de difícil acesso. O funcionamento destes motores é muito mais silencioso que

Tabela 4.2: Comparação entre um motor BLDC e um motor BDC

Características	Motor BLDC	Motor BDC
Comutações	Comutações electrónicas baseadas em sensores de Hall/BEMF	Comutações com escovas
Manutenção	Menos necessária devido à ausência de escovas	Manutenção periódica
Tempo de vida	longo	curto
Características Velocidade/Binário	Permite a operação em todas as velocidades com carga nominal	Em velocidades mais altas, o atrito das escovas aumenta, reduzindo deste modo o binário
Eficiência	Elevado	Moderado
Inércia do rotor	Baixa, devido aos ímanes permanentes se encontrarem no rotor. Melhorando a resposta dinâmica	Elevada inércia do rotor, que limita as características dinâmicas
Velocidade	Elevada, nenhuma limitação mecânica imposta pelas escovas/comutador	Baixa, limitações mecânicas impostas pelas escovas
Ruído electromagnético	Baixo	Arcos electromagnéticos gerados pelas escovas, que produzem interferências electromagnéticas nos equipamentos a volta
Custo de produção	Elevado, devido ao custo dos ímanes permanentes	Baixo
Controlo	Complexo e caro	Simple e barato
Requisitos de controlo	É sempre necessário um controlador para manter o motor a rodar e para variar a velocidade	Não é necessário um controlador para manter a velocidade, apenas é necessário para variar a velocidade

os motores BDC, reduzindo interferências electromagnéticas. Na tabela 4.2 encontra-se uma comparação entre um motor BLDC e um motor BDC.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Capítulo 5

## Arquitectura do sistema

### Conteúdo

---

<b>5.1</b>	<b>Opções de Projecto</b>	<b>52</b>
<b>5.2</b>	<b>Arquitectura</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Sistema Computacional</b>	<b>54</b>
<b>5.4</b>	<b>Controlo de Direcção</b>	<b>54</b>
5.4.1	Sistema Embebido <i>Pandora Motion</i>	54
<b>5.5</b>	<b>Controlo de Tracção</b>	<b>56</b>
<b>5.6</b>	<b>Gestão de Energia</b>	<b>57</b>
<b>5.7</b>	<b>Comunicações</b>	<b>58</b>
<b>5.8</b>	<b>Navegação</b>	<b>59</b>
5.8.1	Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS)	59
5.8.2	<i>Inertial Navigation System</i> (INS)	60
<b>5.9</b>	<b>Percepção Ambiente</b>	<b>61</b>
5.9.1	LRF	61
5.9.2	Câmara de Vídeo	62
5.9.3	Câmara Termográfica	63
<b>5.10</b>	<b>Arquitectura de <i>Software</i></b>	<b>64</b>
5.10.1	Percepção do Ambiente	64
5.10.2	Navegação	64
5.10.3	Gestão de Energia	66
5.10.4	Supervisão de Missão e Controlo	66
5.10.5	Gestor da Locomoção	66

---

## 5.1 Opções de Projecto

Para o desenvolvimento deste projecto, optou-se por:

Uma abordagem modular de acordo com os requisitos, uma abordagem mecânica partindo de uma plataforma “*standard*“, propulsão eléctrica, sistema computacional de bordo *Commercial off-the-shelf* (COTS), integrar tecnologia existente no LSA, bem como desenvolver novos mecanismos e desenvolver o veículo num conceito de operação de múltiplos veículos autónomos (eventualmente heterogénos 5.1).

## 5.2 Arquitectura

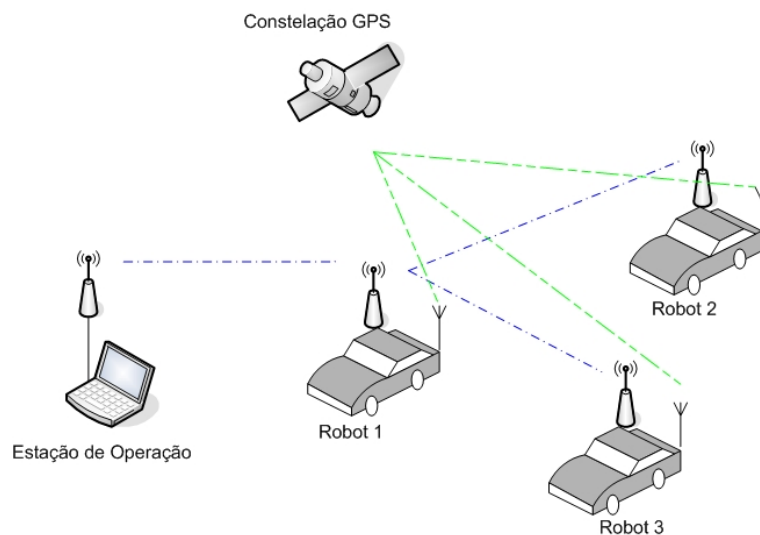


Figura 5.1: Operação de múltiplos veículos autónomos

O desenvolvimento/construção de um ALV, requer inúmeros componentes fundamentais para o seu funcionamento, deste modo iremos apresentar a arquitectura do sistema desenvolvido. Na figura 5.2 podemos observar os diversos sistemas que compõem a arquitectura do sistema:

- O sistema de **locomoção** que é responsável pelo movimento do ALV sendo este composto pelos subsistemas de controlo de direcção e controlo de tracção;
- O sistema de **gestão de energia** responsável por toda a distribuição de energia no ALV bem como a monitorização dos consumos do mesmo, este sistema é constituído pelos subsistema de gestão de energia e respectivas baterias;

- O sistema de **navegação** responsável pela localização do ALV no mundo, é constituído pelos sensores *Global Positioning System* (GPS) e *Inertial Measurement Unit* (IMU);
- O sistema de **percepção** responsável pela percepção e mapeamento do meio exterior ao ALV, é constituído pelos sensores LRF, câmara de vídeo e câmara termográfica.
- o sistema de **comunicações** é responsável pela transferência de dados entre o ALV e uma estação de controlo e supervisão e outros veículos autónomos, sendo constituído por um *router wireless*.

A arquitectura de software está igualmente dividida por módulos facilitando a integração entre as diversas tecnologias existentes. Uma análise sucinta e detalhada de cada bloco será apresentada para uma melhor compreensão da arquitectura do ALV.

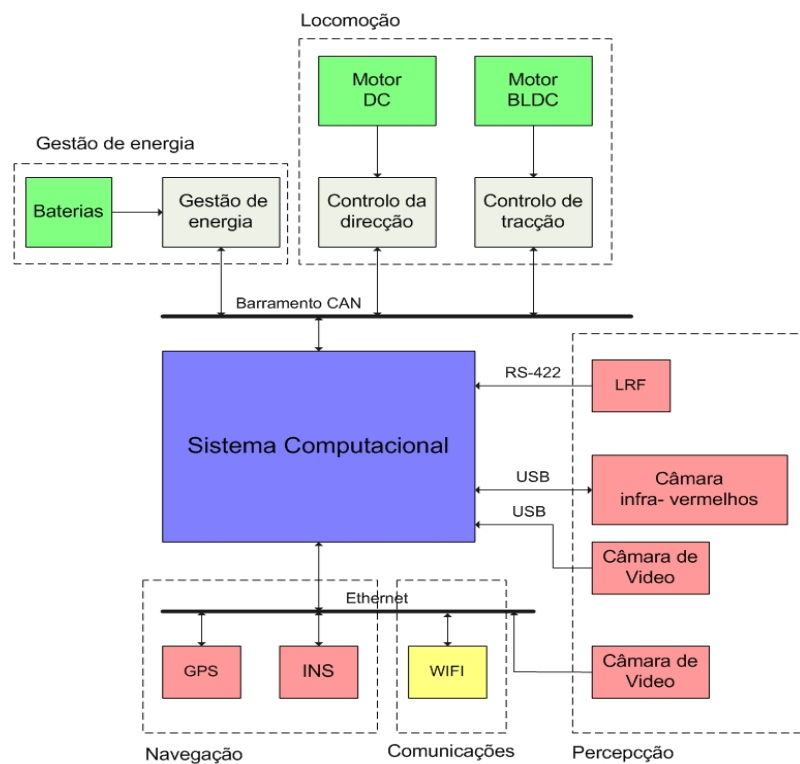


Figura 5.2: Arquitectura do sistema

### 5.3 Sistema Computacional

Devido a complexidade de um veículo autónomo, é indispensável a utilização de um sistema computacional, para o processamento dos dados dos diversos sensores instalados no veículo bem como para o controlo e navegação do mesmo. Deste modo, optou-se pela escolha de uma *Single Board Computer* (SBC), onde o sistema operativo instalado numa *compact flash* (CF) processa a informação dos sensores e as acções de controlo, sendo este componente o cérebro do veículo em questão. A escolha de uma SBC recai pela facilidade de obtenção da mesma e também por ser um produto COTS que oferece uma elevada capacidade de processamento numa solução fechada e com dimensões reduzidas. Como podemos observar na figura 5.2 todos os dispositivos estão ligados ao sistema computacional, através de barramentos de comunicação entre os vários dispositivos, a informação dos sensores é recebida na SBC, o *software* processa os dados e comunica as acções de controlo adequadas ao dispositivo.

### 5.4 Controlo de Direcção

Para o controlo de direcção do ALV, optou-se pelo uso de um sistema embebido *Pandora Motion* desenvolvido no LSA. Os sistemas embebidos são sistemas de processamento de informação que normalmente se encontram embebidos numa arquitectura mais complexa e que não são directamente perceptíveis pelo utilizador final.

#### 5.4.1 Sistema Embebido *Pandora Motion*

O sistema embebido *Pandora Motion* consiste num nó de controlo de movimento com capacidade de sensorização, processamento e actuação em tempo real adequado à solução do problema de tracção em *robots* móveis. O sistema *Pandora Motion* desenvolvido no LSA, possui as seguintes características:

- Permite a implementação de uma arquitectura de controlo distribuída;
- Possui um micro controlador com elevado poder de processamento, podendo efectuar operações em vírgula flutuante;
- Capacidade de aquisição de sensores de corrente e de *encoder* de cada motor;
- Dimensões reduzidas;

- Sistema modular esta presente tanto na parte de potência (possui a capacidade de ser implementado em diferentes tipos de motores) bem como na parte de controlo e comunicação. Devidas as inúmeras aplicações deste sistema embebido, este possui funções transparentes aos utilizadores;
- O código é modular, permitindo uma melhor organização, qualidade do projecto e também permite alterações dos parâmetros sem grande dificuldade para utilizador;
- A utilização de uma rede de controlo para interligar sensores, actuadores e controladores num sistema de controlo realimentado, requer que a rede de controlo deva ser simultaneamente:
  1. Capaz de suportar fluxos de mensagens periódicas, de forma a transferir dados periódicos relacionados com o controlo (por exemplo, dados de leitura periódica de um grupo de sensores);
  2. Capaz de garantir um tempo de resposta com limite superior para transferência de mensagens, de forma a respeitar os atrasos máximos de controlo;
  3. Capaz de garantir um tempo de resposta com limite superior para transferência de mensagens, de forma a respeitar os atrasos máximos de controlo;

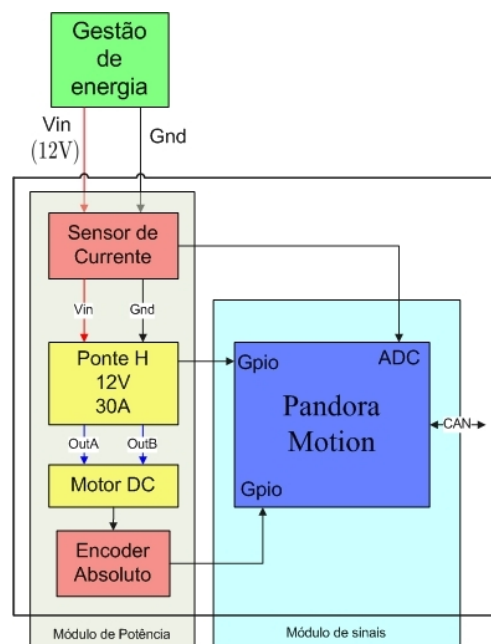


Figura 5.3: Arquitectura do sistema de direcção

Na figura 5.3 podemos observar a arquitectura do sistema de controlo de direcção do ALV *Terrestrial Intelligent General Purpose Robotic Explorer* (TIGRE). No que concerne ao módulo de potência do sistema embebido, este oferece uma solução integrada no sistema embebido com uma corrente máxima admissível de 5.2A. Devido a necessidade de controlo da direcção do ALV, optou-se pelo controlo em posição da mesma. Para tal surge a necessidade da utilização de um *encoder* no motor de modo a permitir medir o ângulo das rodas em relação ao corpo do veículo. Existem dois tipos de *encoders* no mercado, os *encoders* incrementais e os *encoders* absolutos: Os primeiros fornecem a posição relativa com uma referência de impulsos em cada rotação e os segundos fornecem um valor de posição absoluta.

## 5.5 Controlo de Tracção

O bloco de controlo de tracção, tem como objectivo principal o controlo do movimento do veículo, deste modo optou-se pelo desenvolvimento de um controlador capaz de obedecer aos referidos no capítulo 3, tendo como base de partida um sistema de desenvolvimento da *Luminary™* previamente existente [49]. O controlo de movimento de um sistema autónomo é uma parte essencial no seu desenvolvimento, deste modo surge a necessidade de controlar o motor de tracção em malha fechada para um melhor controlo a nível global do sistema, permitindo saber a velocidade do veículo, que potência está o motor a debitar assim como os consumos energéticos que o motor está a despendar. Na figura 5.4 podemos observar a arquitectura do sistema de controlo de tracção.

O sistema é deste modo constituído por duas partes distintas, o **módulo de sinais** e o módulo de potência. O módulo de sinais apresenta como unidade de processamento um *μControlador Advanced RISC Machine* (ARM®) Cortex-M3, membro da família dos controladores de 32 bits. Apresenta um elevado desempenho, disponibilizam inúmeros periféricos, simples, ocupa pouca área e tem um baixo consumo energético. Os processadores ARM® são conhecidos pela sua versatilidade, pois possuem poucas instruções para programação. São encontrados em PDAs, telemóveis, calculadoras, periféricos de computador e aplicações industriais. Este módulo é responsável por toda a parte de processamento de sinais e acções de controlo a desempenhar.

O **módulo de potência** constituído pela ponte trifásica, *driver* de ataque dos *mosfets* e o circuito de *brake*, os sinais gerados pelo módulo de sinais são aplicados nas *drives* estas

fazem comutar os *mosfets*, entrando o motor deste modo em funcionamento.

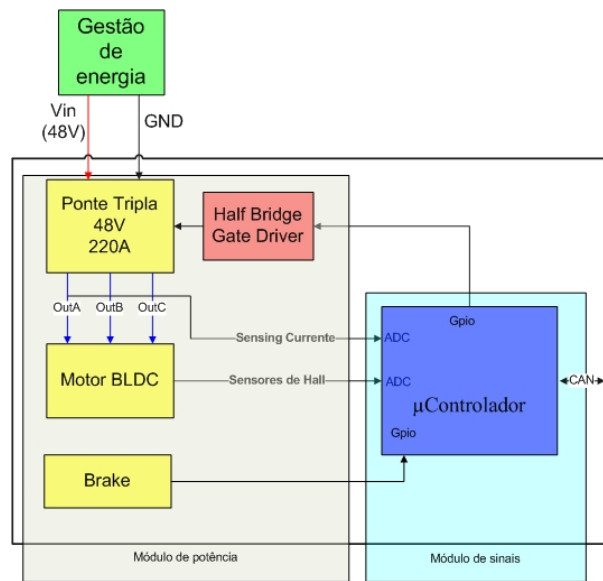


Figura 5.4: Arquitectura do sistema de controlo de tração

## 5.6 Gestão de Energia

O sistema de gestão de energia tem como objectivo primordial a monitorização de informação a partir de correntes e tensões envolvidas num circuito de potência. Este controlo deve-se à necessidade de saber, a energia disponível e consumo actual, numa plataforma móvel sem intervenção do utilizador. Com a utilização de um sistema de gestão de energia, pode-se ter um *robot* muito mais tempo em acção do que o esperado, pois sem a monitorização da energia nunca se saberia ao certo o momento em que um veículo deveria regressar para repor as cargas, ou no caso de ser um veículo com um elevado grau de autonomia, decidir ele mesmo regressar a uma base quando o nível de energia for baixo. Deste modo, surge a necessidade de implementar um sistema de gestão de energia no ALV TIGRE, com a capacidade de distribuir, monitorização de energia, capacidade de detecção de eventuais falhas bem como, actuar na activação e desactivação dos diferentes subsistemas do veículo. Na figura 5.5 podemos observar a arquitectura do sistema de gestão de energia, sendo este composto por diversos componentes:

O sistema de gestão de energia possui ainda, um sistema embebido, que é responsável por adquirir os dados da placa de gestão de energia, processa os mesmos e depois através

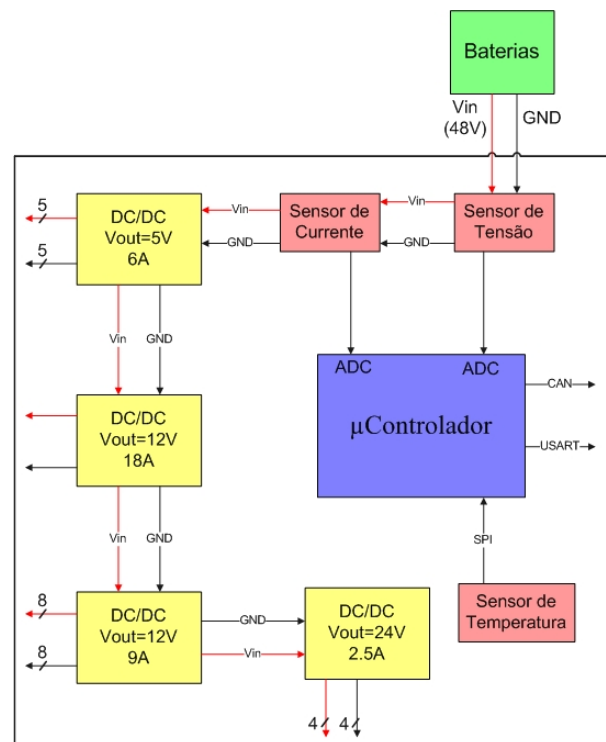


Figura 5.5: Arquitectura do sistema de gestão de energia

de um protocolo de comunicação (*Controller Area Network* (CAN) ou RS-232) envia a informação ao sistema computacional. O sistema embebido apresenta como unidade de processamento um  $\mu$ Controlador ARM®Cortex-M3 de 32 bits.

## 5.7 Comunicações

As comunicações são uma parte muito importante de um veículo autónomo. Este sistema tem como principal objectivo a transferência de dados entre o ALV e uma estação de controlo e supervisão e outros veículos autónomos. O sistema de comunicações permite ao utilizador ter informações do sistema de sensores do ALV e permite que sejam enviados dados de comando do utilizador para o ALV. Na grande maioria de aplicações (militares, científicas ou civis), os dados a enviar incluem imagem de câmaras de filmar, dados dos diversos sensores a bordo do ALV (como posição GPS do veículo) e comandos de controlo por parte do utilizador. Sem este tipo de comunicações era impossível monitorizar o estado do veículo numa estação base ou mesmo tele-operar caso fosse necessário. Independentemente-

mente de possibilidade de haver ou não comunicações entre uma estação de operação e o veículo, este têm a capacidade de continuar a operar dependendo do tipo de missão que se encontra a desempenhar na altura. Assim tornam-se necessárias comunicações que suportem a transmissão de todos estes dados, deste modo surge a necessidade de implementação de um sistema de comunicações *wireless* no ALV TIGRE.

A utilização de um sistema de comunicações *wireless* traz muitas vantagens ao sistema como é descrito anteriormente, porém o sistema possui algumas limitações, nomeadamente limitações relativamente ao alcance das comunicações bem como limitações devido a necessidade de haver linha de vista entre os diversos sistemas para haver comunicações. Existem algumas soluções no mercado para maximizar as limitações acima descritas, como o uso de pré-amplificadores de sinal, antenas direccionais, uso de *relay's* de comunicações fixos ou móveis, o uso de uma rede *Mesh*<sup>1</sup> entre vários veículos ou mesmo o uso de um sistema de comunicações sem linha de vista como o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Wimax).

## 5.8 Navegação

### 5.8.1 Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS)

Os sistemas de navegação global por satélite (GNSS) têm grande importância, uma vez que são aplicados nas mais diversas situações em que é necessário conhecer, com precisão e segurança, a velocidade e posição em coordenadas geográficas (altitude, latitude e longitude) de um utilizador, quer este se encontre situado na superfície da Terra ou próximo desta. Estes sistemas são usados por militares, por empresas associadas aos mais diversos meios de transporte, por órgãos institucionais (com o objectivo de conseguir um melhor ordenamento do território) e também por particulares. Cada GNSS tem a sua constelação de satélites e para conseguir uma estimativa da posição é necessário receber informação de, pelo menos quatro satélites [50]. Existem actualmente vários sistemas de navegação global por satélite: o GPS desenvolvido nos Estados Unidos da América pelo departamento de defesa, o GALILEU desenvolvido na Europa pela *European Space Agency* (ESA), o GLO-NASS desenvolvido na Rússia pela *Russian Space Agency* e o COMPASS desenvolvido na

---

<sup>1</sup>Uma rede *Mesh* é composta por vários nós/*routers*, que passam a se comportar como uma única e grande rede, possibilitando que o cliente se conecte em qualquer um destes nós. Os nós fazem a função de repetidores e cada nó está conectado a um ou mais nós. Desta maneira é possível transmitir mensagens de um nó a outro por diferentes caminhos.

China pela *China Satellite Navigation Project Center* (CSNPC). O sistema de GNSS que se encontra integralmente em operação na actualidade é o GPS, actualmente no mercado é este sistema GNSS no ALV TIGRE. A escolha de utilização de um sistema GNSS no ALV TIGRE, é vista como essencial ao desenvolvimento do mesmo, uma vez que, com um sistema GNSS é possível detectar a posição do veículo *outdoor* na superfície da terra. O uso de GPS revolucionou a localização *outdoor* em muitos aspectos, o GPS normal é capaz de ter precisões na ordem dos 10m, o *Differential GPS* (DGPS) que consiste na utilização de um receptor de GPS na estação de operação, permitindo deste modo o envio de correcção de sinal para o veículo aumentando a precisão deste para a ordem dos 0.5m e o *Real-Time Kinematics* (RTK) GPS que é idêntico ao DGPS porém o número de correcções enviadas para o veículo por parte da estação de operação é mais elevado aumentando o grau de precisão na ordem dos 2cm. Deste modo, a utilização de um GPS no ALV TIGRE, irá permitir determinar a posição do mesmo no mundo, garantindo desta forma que o veículo nunca se perde durante a execução de uma missão, além da utilização de um GPS normal, sempre que houver comunicações entre o ALV e uma estação de controlo, este pode corrigir a sua posição aumentando a precisão da localização recorrendo ao DGPS ou até mesmo RTK.

### 5.8.2 *Inertial Navigation System* (INS)

O sistema INS é por si só um sistema de navegação autónomo, que fornece informação dinâmica de posição e velocidade, baseado nas medidas obtidas de um *Inertial measurement unit* (IMU). Um IMU consiste numa tríade de acelerómetros e giroscópios colocados de forma ortogonal. O princípio de funcionamento básico do IMU é baseado na primeira lei de Newton. Com efeito, a força aplicada a um acelerómetro resulta numa aceleração que pode ser quantificada e medida. Esta aceleração, quando integrada em ordem tempo fornece uma variação em velocidade, e pelo mesmo raciocínio, quando integrado duplamente em ordem ao tempo, fornece uma variação em posição. Deste modo, um INS genericamente fornece alterações em posição e velocidade. De forma a determinar a posição e a velocidade no referencial do veículo no sentido absoluto, tem de se saber em primeiro as condições iniciais (posição, velocidade e atitude). A utilização de uma tríade de giroscópios de forma ortogonal (semelhante aos acelerómetros) no IMU, resulta que a precisão das medições de velocidades angulares é fundamental para o INS, porque qualquer erro na transformação

das acelerações (nos três eixos) resulta em erros em posição e velocidade. Deste modo, a capacidade de um INS determinar continuamente a posição, velocidade e atitude do veículo, depende da qualidade dos giroscópios utilizados no IMU. De acordo com David Titterton [51] existem quatro níveis de classificação de IMUs (a classificação por níveis baseia-se na precisão do sistema): nível de estratégico; nível de navegação; nível tático; e nível de consumidor, estando inserido no nível de navegação o utilizado no ALV TIGRE. O uso de um sistema de INS no veículo autónomo terrestre permite determinar atitude, posição e velocidade do veículo, deste modo, aproveitando as vantagens do INS e do GPS, é permitido obter um sistema com alta precisão, superior à precisão dos diversos sistemas a funcionarem de forma independente. Um INS é só por si um sistema de navegação que disponibiliza uma solução de atitude, posição e velocidade a uma taxa elevada normalmente superior à taxa do receptor GPS. O receptor GPS, por outro lado, gera valores estimados de posição e velocidade com erros limitados. As características do GPS e INS são complementares. Quando a informação do INS e do GPS é fundida, a estimação da posição e velocidade de maior precisão do GPS, é utilizada para calibrar os erros dos sensores do INS. O INS por sua vez, devolve estimativas de atitude, posição e velocidade a uma taxa superior que é necessária para a orientação e controlo do veículo. As estimativas do INS permitem também o funcionamento do sistema de navegação na falta de soluções de posição por parte do GPS, isto ocorre quando o número de satélites em linha de vista com a antena ligada ao receptor é menor do que quatro, e causada devido à obstrução do sinal pelo meio circundante (túneis, ambientes urbanos e florestais). Outra vantagem é no aumento da robustez do receptor GPS, aumentando a imunidade a ruído externo do sinal enviado pelo satélite.

## 5.9 Percepção Ambiente

Nesta secção serão descritos um conjunto de sensores que irão dotar o ALV TIGRE com uma capacidade de percepção do meio ambiente, estes sensores vão desde o uso de *lasers* até ao uso de sensores de imagem.

### 5.9.1 LRF

A percepção é muito importante para veículo autónomo para mapear um caminho, detectar e evitar obstáculos adequadamente. A percepção de um robot em ambientes interior

já é feito com sucesso, porém a percepção em ambiente exterior ainda é um problema desafiador. Em ambientes exteriores, são inúmeros os factores que tornam difícil a percepção e localização do meio. Os terrenos não são geralmente planos, o sinal GPS degrada-se na presença de vegetação, construções e as características do terreno. Os ambientes estão em constante alteração por causa da presença de pessoas, carros e outros objectos em movimento. Por consequência, existe a necessidade de um método de percepção robusto (que aliado ao GPS e INS) que supera estes problemas. Deste modo através da utilização de um *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER), que é um dispositivo que produz radiação electromagnética com características especiais, tais como: é monocromática (possui frequência muito bem definida) e coerente (possui relações de fase bem definidas), além de se propagar como um feixe, dota o veículo de um mecanismo capaz de mapear o ambiente em seu redor. O LRF é um sensor óptico que permite determinar distâncias a um objecto reflexivo, sendo deste modo utilizado na percepção de objectos devido a sua alta precisão e fiabilidade, que aliando a outros sensores como *encoders* ou até mesmo o uso de mais que um LRF, permite-nos obter um mapa 2D ou 3D do ambiente circundante, dotando desta forma o ALV com a capacidade de fazer mapeamento em qualquer tipo de ambientes.

### 5.9.2 Câmara de Vídeo

A câmara de vídeo é um dispositivo dotado de mecanismos que capturam imagens em tempo real. Diferentemente da câmara fotográfica, a câmara de vídeo é capaz de registar movimentos, trazendo assim uma maior dinâmica ao resultado final da produção. Os movimentos são registados tirando-se sucessivamente centenas (ou até milhares) de fotografias (*frames*) da cena com grande rapidez. A evolução dos equipamentos electrónicos fabricados em larga escala tornou a câmara de vídeo um grande atractivo tecnológico, baixando o seu custo substancialmente. Podendo encontrar-se vários tipos de mecanismos com preços competitivos, isso sem contar com as "webcams", dispositivos que, ligados a algum tipo de processador, conseguem fazer a captura de imagens como uma câmara de vídeo. A câmara de vídeo é um elemento não fundamental para o funcionamento de um ALV, porém é uma grande vantagem possuir uma, pois esta permite fazer *streaming* de vídeo, permitindo deste modo visualizar as imagens em tempo real que o ALV está a ver, podendo também ser armazenadas para estudos a *posteriori*, permitindo também com a

ajuda de um sistema computacional fazer detecção de objectos.

### 5.9.3 Câmara Termográfica

Uma câmara termográfica, também conhecida como *Forward Looking Infra-Red* (FLIR), é um dispositivo que forma uma imagem bidimensional a partir de radiação infravermelha, emitida por objectos "quentes" (ou seja, emissores de radiação infravermelha). O funcionamento é similar ao de uma câmara comum, sendo que esta forma imagens usando a luz visível térmica, ou energia infravermelha, e a luz que não é visível, porque a sua onda é demasiado longa para ser detectada pelo olho humano. Ao contrário de luz visível, no mundo dos infravermelhos, tudo que tem uma temperatura acima do zero absoluto emite calor. Mesmo objectos muito frios, como cubos de gelo, emitem luz infravermelha. Originalmente desenvolvido para uso militar, as câmaras termográficas foram lentamente introduzidas noutros campos de aplicação, desde a medicina á arqueologia. Recentemente, com a baixa de preços que tem vindo a sofrer este tipo de equipamento, a tecnologia de visão por infravermelhos tem vindo a desenvolver-se rapidamente, em conjunto com óptica avançada e cada vez mais sofisticado *software*, aumentando a versatilidade das câmaras termográficas. Devido as potencialidades de uma Câmara Termográfica, a utilização da mesma no ALV TIGRE, dota o sistema com uma capacidade de condução nocturna ou condução em condições atmosféricas adversas (nevoeiro por exemplo), permitindo uma maior segurança no uso do ALV, bem como em operações de socorro e salvamento, permitindo detecção de alvos quentes como feridos ou até mesmo em aplicações militares a detecção de intrusos. A câmara termográfica a integrar no ALV TIGRE fornece uma imagem em vídeo composto, surgindo deste modo a necessidade de utilização de um *frame grabber* para converter o sinal analógico num sinal digital.

## 5.10 Arquitectura de *Software*

Na figura 5.6 é possível observar os respectivos blocos existentes e que compõem a arquitectura de *software* do ALV TIGRE. O conjunto de blocos desempenham várias funções entre as quais: percepção do meio ambiente, navegação em ambiente exterior, controlo cinemático do veículo, gestor de missão e gestão de energia.

### 5.10.1 Percepção do Ambiente

O sistema de percepção inclui os sensores LRF, câmara de vídeo, câmara de infravermelhos e o respectivo subsistema de processamento de dados referente a cada sensor, dotando assim o sistema com uma capacidade de percepção do meio ambiente. Os dados obtidos dos diversos sensores, irão permitir a identificação de alvos e a detecção de obstáculos, esta informação é particularmente importante para a localização e para o gestor de missões, respectivamente para a localização quando o veículo se encontra a executar uma missão em que o seu objectivo passe pelo reconhecimento de *features*, e para o gestor de missões quando o veículo durante a execução da missão depara-se com um obstáculo, esta informação é necessária ao gestor de missões para proceder a alteração da trajectória, evitando deste modo a colisão do veículo com obstáculos existentes durante a execução da missão.

### 5.10.2 Navegação

O sistema de navegação inclui os subsistemas de localização, mapeamento 3D e desvio de obstáculos, é constituído pelos sensores GPS e INS. Este sistema têm como objectivo determinar a posição e atitude do veículo e também o mapeamento do mundo, a informação processada irá fornecer ao veículo a sua posição e atitude na terra e georeferenciar<sup>2</sup> obstáculos permitindo deste modo a elaboração de um mapa com a posição dos obstáculos, conseguindo deste modo determinar o caminho livre. A informação processada será utilizada nos subsistemas de controlo e gestão de missão, permitindo a estes a correcção de trajectórias a gerar para o veículo.

---

<sup>2</sup>Georeferenciação consiste em determinar a posição real de um determinado objecto na terra.

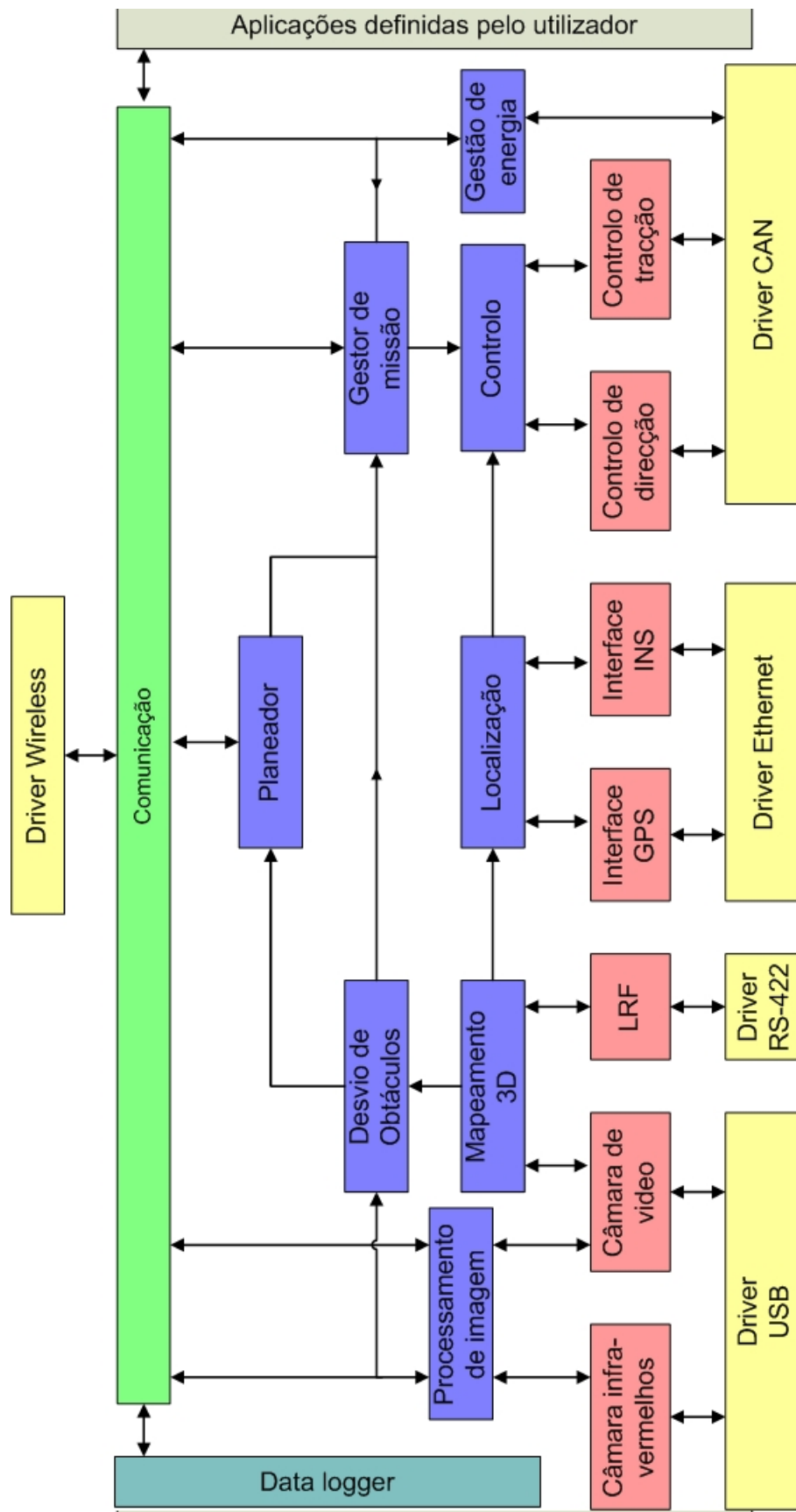


Figura 5.6: Arquitectura de software

### 5.10.3 Gestão de Energia

O subsistema de gestão de energia constituído por placa de gestão de energia, tem como objectivo a monitorização de informação obtida através da mesma. A informação obtida, irá permitir a monitorização da carga das baterias, a protecção dos elementos constituintes do ALV, determinação de consumos parciais e histórico de consumos. A utilização de um sistema de gestão de energia assume um papel fulcral no desenvolvimento de um veículo, tendo em conta que a sua implementação irá aumentar o grau de autonomia deste, permitindo também a implementação de um *watchdog*, por parte do sistema de gestão de energia que em caso de detecção de alguma falha ou níveis baixos de tensão informa o gestor de missões.

### 5.10.4 Supervisão de Missão e Controlo

O sistema de supervisão de missão e controlo, é responsável por todo o controlo do veículo, desde o controlo de baixo nível (controlo do motor de tracção e direcção), controlo de trajectórias, controlo de missão e planeamento. A informação recebida dos diversos sistemas acima mencionados, são processadas e todas as acções necessárias para a execução da missão são tomadas, de referir que neste tipo de veículo a missão está fortemente ligada a locomoção, deste modo surge a necessidade de tratar da gestão de locomoção separadamente.

### 5.10.5 Gestor da Locomoção

No contexto da locomoção do veículo a gestão da missão e manobra desempenha um papel crucial. A missão neste contexto consiste num grafo de manobras, em que cada manobra corresponde a um dado modo de locomoção ou tarefas a realizar. A manobra activa depende de um conjunto de transições que sinalizam acontecimentos discretos como por exemplo a conclusão da manobra anterior, atingir um ponto ou erros e comandos do utilizador. O gestor de missões (GM) terá como principal objectivo a gestão e execução de missões no ALV, no qual será efectuado o controlo das acções a executar e o interface das mesmas com o sistema de controlo e navegação do veículo. Este sistema pode ser implementado em qualquer veículo autónomo, contendo uma grande amplitude de opções, sendo que todo o algoritmo do GM é totalmente independente do *hardware* utilizado.

O GM permite também executar missões em modo de simulação para testes numa fase experimental.

#### 5.10.5.1 Missão

A missão conterà tudo o que o ALV irá realizar ou precisará de saber para completar a sua tarefa (os seus objectivos). Para realizar uma missão é definido que o veículo autónomo realizará um diverso conjunto de manobras. Para que uma manobra seja implementada (seja realizado como o pretendido) ocorre uma ou mais acções, sendo que estas interagirão com o veículo autónomo. Se num dado momento se verifica que a manobra actual não é a mais apropriada para o movimento que o veículo irá realizar, será executada uma transição para uma manobra mais apropriada. Assim sendo, cada missão será constituída por um conjunto de manobras (figura 5.7), que poderão ter um diverso conjunto de acções, transições ou ocorrências, que fará o ALV transitar para uma manobra específica.

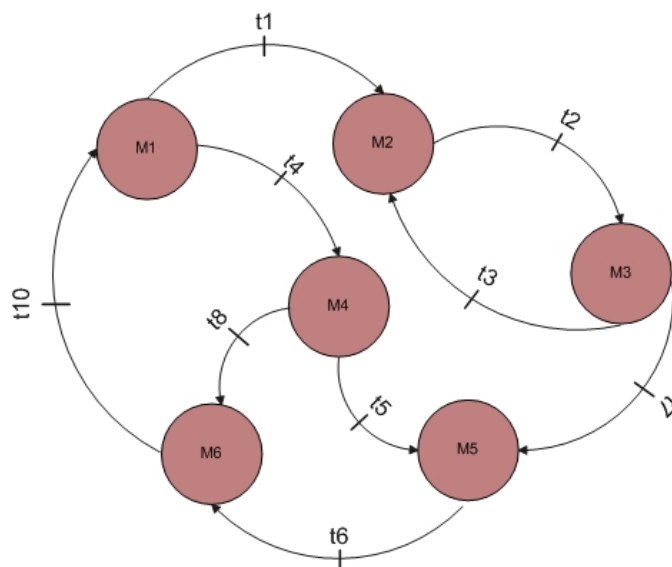


Figura 5.7: Grafo de manobras

#### 5.10.5.2 Manobras

O objectivo de uma manobra é fazer o controlo de uma dada situação, assim para um veículo terrestre poderá ser uma coisa tão simples como fazer uma recta, fazer uma curva, ou uma coisa mais complexa como fazer limpar em movimento. Como o referido, uma manobra é constituída por um conjunto de acções ou uma só acção, sendo que esse conjunto

de acções ou acção irá interagir com o veículo, para a execução da manobra pretendida. Essa manobra é ainda constituída por um conjunto de transições, transições essas que irão verificar quando a manobra completou o seu objectivo ou existiu um acontecimento específico para a execução de outra manobra mais adequada. As manobras ao serem constituídas por acções e transições terão autonomia para fazer o controlo da situação pretendida num dado momento. As manobras podem ser organizadas hierarquicamente (figura 5.8), isto é, fazer uma pista em "oito" constitui uma manobra complexo.

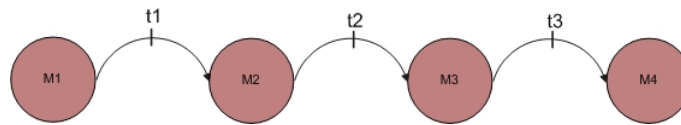


Figura 5.8: Grafo de manobra para pista em "oito"

Para a execução desse controlo podemos ter manobras mais simples como recta e curva (sub-manobras). As manobras podem ser implementadas através de um diverso conjunto de funções, que irão interagir com o sistema de controlo do veículo autónomo. Poderá existir uma acção que conterà as funções para o veículo fazer uma recta, outra para o veículo fazer uma curva, sendo uma pertencente a manobra recta e outra a manobra curva. Podemos ainda ter uma manobra de um veículo, que num dado momento tinha que apanhar lixo com uma braço robótico enquanto se deslocava, deste modo existiriam duas acções a funcionarem, em que uma executaria o controlo do deslocamento e outra do braço robótico, trabalhando ambas para o objectivo da manobra. Sub-manobras são sub-estados das manobras, isto é, um veículo tem uma manobra que é fazer uma "pista em oito", essa manobra conterà sub-estados como uma manobra que vai fazer o controlo de uma recta, ou de uma curva, tudo para a finalização da manobra "pista em oito". Essa própria manobra ("pista em oito"), pode ser um sub-estado, assim sendo, se um veículo tivesse numa manobra que fosse fazer o controlo de um circuito específico, e num dado momento tivesse que fazer uma "pista em oito" chamaria esse sub-estado.

### 5.10.5.3 Transições

As transições correspondem a detecção de eventos que levam a transição entre manobras. Assim deste modo quando se verificar uma situação específica pretendida, será executada a manobra mais adequada (ex: o veículo terrestre encontra-se a fazer uma recta,

mas detecta que tem uma curva a X metros, no final desses X metros a transição manda executar a manobra curva, terminando a manobra recta, executando assim a manobra mais adequada para o controlo da situação). Essa transição poderá ser somente para o veículo num dado momento executar algo específico, podendo simplesmente chamar uma função para a execução dessa situação (ex: detecta pouca luminosidade, executa função de ligar luzes do veículo).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

# Capítulo 6

## Implementação

### Conteúdo

---

6.1	Controlo de Direcção . . . . .	72
6.2	Controlo de Tracção . . . . .	75
6.3	Gestão de Energia . . . . .	76
6.4	Sistema Computacional . . . . .	77
6.5	Comunicações . . . . .	78
6.6	Sistema de Navegação . . . . .	79
6.7	Sistemas de Percepção . . . . .	80
6.8	Veículo . . . . .	80
6.9	Validação do Controlo de Trajectórias . . . . .	83

---

Como referido anteriormente, para o desenvolvimento deste projecto, optou-se pela utilização de uma base de um veículo comercial 4x4 com as seguintes características: Dimensões de 1450x850x930mm, com uma capacidade máxima de carga de 110Kg, propulsão eléctrica através de um motor BLDC de 2KW com uma velocidade máxima de 60Km/h. Tendo em conta que o *ALV TIGRE* foi adquirido como um veículo 4x4 não autónomo, torna-se evidente a necessidade de proceder a grandes alterações em vários aspectos, nomeadamente a alteração do sistema de direcção. Tornando-se claro que, desde o início, o desenvolvimento do *ALV TIGRE* iria impor grandes barreiras para que no fim passasse de um mero veículo 4x4 tripulado para um veículo autónomo. Neste capítulo é apresentada uma análise sucinta de todos os desenvolvimentos necessários para a transformação do veículo.

## 6.1 Controlo de Direcção

Com o decorrer do desenvolvimento do projecto TIGRE, deparamo-nos com um grande obstáculo, que foi o controlo da direcção, este revelou-se como uma parte fulcral no desenvolvimento geral do projecto TIGRE, exigindo deste modo um enorme esforço e tempo para que o seu desenvolvimento e implementação podesse ser concluído. O desenvolvimento passa deste modo por três fases: alteração mecânica da direcção de modo a permitir o controlo através da utilização de um motor DC, desenvolvimento do respectivo hardware e software. Inicialmente foi abordado o problema mecânico da direcção tendo em conta que inicialmente o sistema tinha sido projectado para ser operado por um utilizador, foi desenvolvido um sistema mecânico que substitui o sistema existente. O sistema foi desenvolvido de uma forma modular ao qual permitiu o aperfeiçoamento do trapézio de *Ackerman* (A.1) como podemos visualizar na figura 6.1.



Figura 6.1: Sistema mecânico desenvolvido para o controlo de direcção

O sistema foi desenvolvido de forma a que o veio do motor actuasse directamente nos braços de direcção como se pode observar na figura 6.1, permitindo deste modo a colocação do *encoder* directamente no veio do motor de forma a obter uma relação directa entre o ângulo da direcção e o valor medido pelo *encoder* (figura 6.2). Devido à necessidade de uma solução que fosse capaz de suportar correntes até 30A, foi desenvolvida uma solução “*piggyback*” que apresenta uma corrente máxima admissível de 30A. A ligação ao sistema embebido não requer uma reconfiguração do mesmo, já que o sistema detecta a presença da solução “*piggyback*”, comutando o envio dos sinais de PWM para o módulo de potência.

Para o controlo de direcção do ALV TIGRE optou-se pelo uso de um *encoder* magnético absoluto, devido à capacidade deste em fornecer a posição, bem como a capacidade que os sistemas magnéticos têm de elevada imunidade contra o ruído e perturbações do meio ambiente como pó e lixo. O *encoder* utilizado é da *USDigital* com saída 12-bit PWM com 4096 posições por volta, permitindo uma resolução de  $0.088^\circ$ . A informação adquirida irá permitir definir a direcção, posição e velocidade do motor.

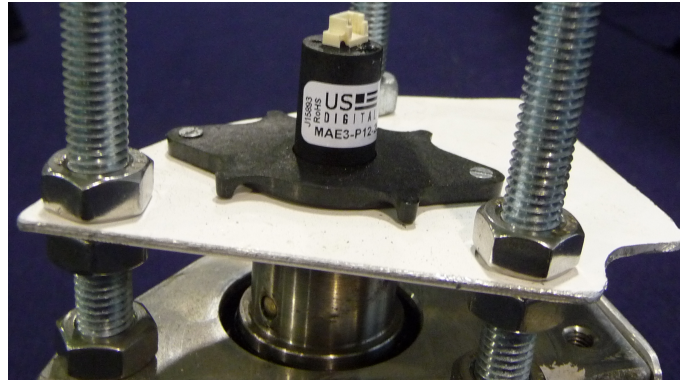


Figura 6.2: Montagem do *encoder* no motor

Na figura 6.1 podemos observar a solução final do sistema mecânico implementado.

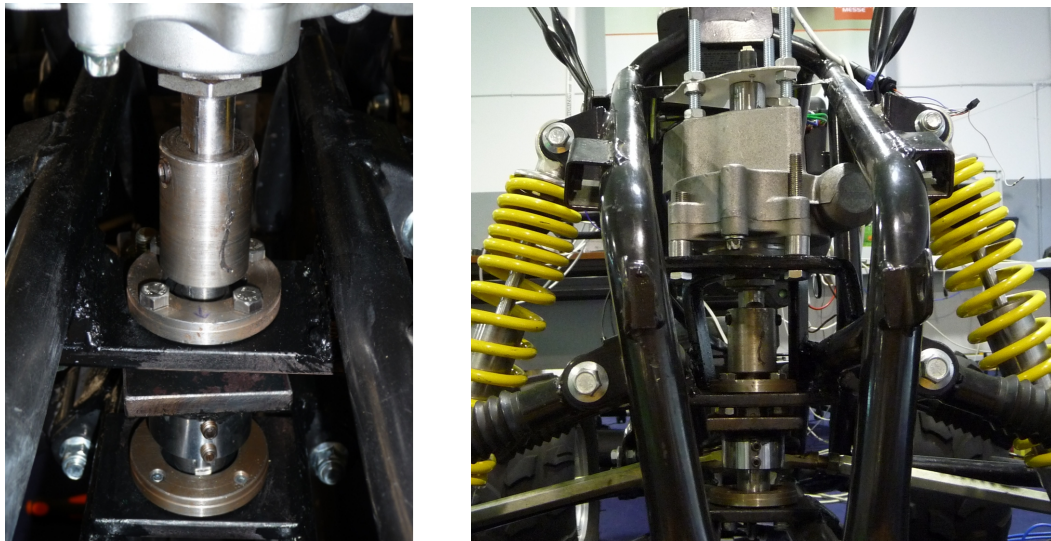
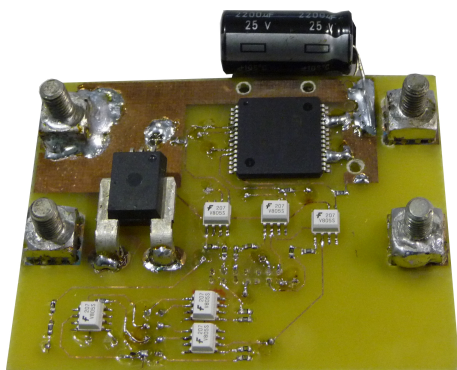


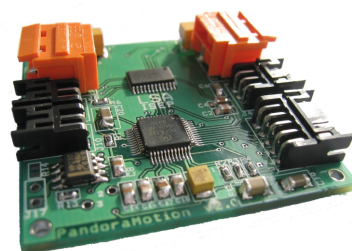
Figura 6.3: Solução final do sistema mecânico implementado

Após a conclusão do sistema mecânico, procedeu-se à implementação e validação da placa de *hardware* desenvolvida para controlar o motor DC utilizado. O sistema desenvolvido (figura 6.4(a)) possui uma ponte H para o controlo do motor de direcção, um sensor

de corrente que permite desligar o controlo caso exista alguma anomalia no sistema (ex. rodas atoladas na areia, ou presas numa pedra) e por fim o uso de optoisoladores nos sinais enviados do sistema embebido *Pandora Motion* de modo a isolar o mesmo do circuito de potência. O sistema de *hardware* desenvolvido é interligado com o sistema *Pandora Motion* através da técnica de “piggyback”.



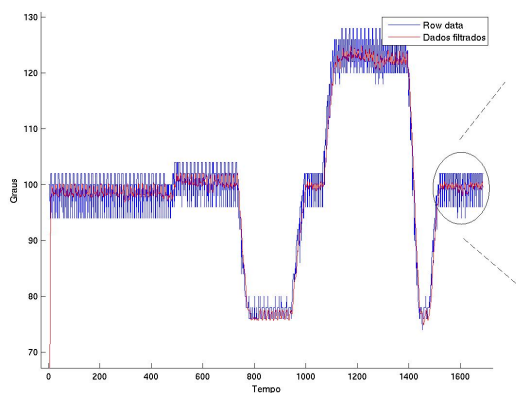
(a) *Hardware* desenvolvido para o controlo de direcção



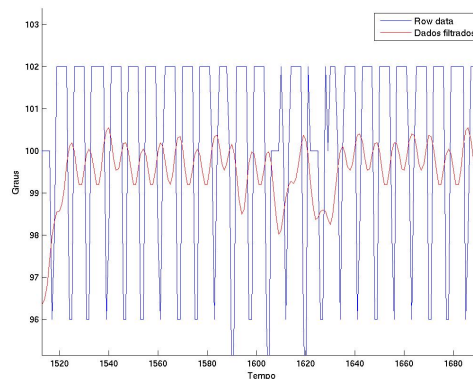
(b) Sistema embebido *Pandora Motion*

Figura 6.4: Sistema de controlo de direcção

Foram efectuadas alterações no *software* do sistema embebido *Pandora Motion* de modo a permitir adquirir dados de um encoder absoluto para o controlo em posição bem como permitir obter leituras do sensor de corrente. Para obter os ângulos máximos de direcção foi efectuado um *log* ao *encoder*, permitindo deste modo obtenção dos ângulos máximo de curvatura do veículo. Na figura 6.5(a) podemos observar a azul os dados em bruto do encoder, e a vermelho os dados do *encoder* filtrados.



(a) Dados brutos do *encoder*



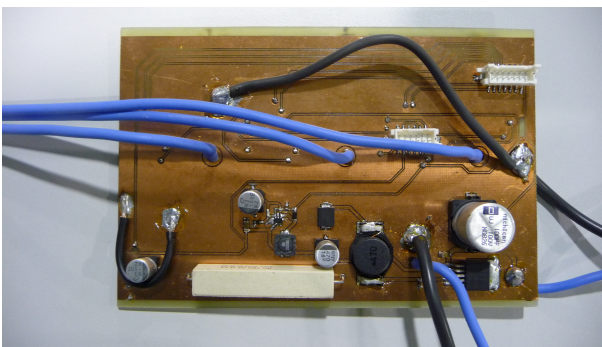
(b) Erro da posição filtrado

Figura 6.5: Determinação dos ângulos máximos de curvatura

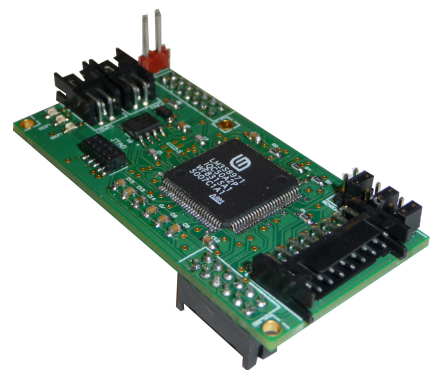
Através da análise dos dados da figura 6.5(b), podemos observar a atenuação do erro através da utilização de um filtro, bem como os limites máximos de curvatura do veículo. O sistema embebido *Pandora Motion* apresenta como unidade de processamento o *Digital Signal Processor* (DSP) MC56F8322 membro da família de controladores de 16bits. Combina o poder de processamento com a funcionalidade de um micro controlador e a flexibilidade de periféricos que o compõem (figura 6.4(b)). Criando uma solução custo/eficiência bastante aceitável num chip apenas. Foram adquiridos dados do

## 6.2 Controlo de Tracção

Para o controlo de tracção foi desenvolvido uma placa de potência capaz de suportar correntes na ordem dos 200A. Esta placa é composta pelos *mosfets*, *drives* de ataque aos *mosfets* e também pelo circuito de “*brake*”. Interligada com a placa de sinais através da técnica de “*piggyback*”, esta placa permite o controlo de motores BLDC que operem a tensões de 48V até 200A (figura 6.6(a)). Esta solução permite um controlo em malha fechada do motor de tracção sendo possível a monitorização de algumas variáveis importantes para o controlo tais como a velocidade de rotação do motor assim como a corrente consumida. O módulo de sinais permite a utilização do diversos protocolos de comunicação tais como o protocolo CAN e RS232 assim como *Joint Test Action Group* (JTAG) que permitirá o conhecimento das diversas variáveis de controlo e comunicação com o PC na fase de *debug*.



(a) Placa de potência de controlo de motores BLDC



(b) Módulo de sinais

Figura 6.6: Sistema de controlo de tracção

Após a execução da placa de hardware foram feitos inúmeros testes e validações da mesma. A solução de *hardware* implementada evidenciou alguma falta de fiabilidade pelo

que paralelamente ao processo de teste e depuração de erros se recorreu à utilização de um controlador externo a ser integrado no veículo<sup>1</sup>.

A utilização deste controlador limita deste modo a monitorização das variáveis acima mencionadas, tendo em conta que o controlador não possui nenhum protocolo de comunicação, assim como levanta a questão de como controlar o mesmo, tendo sido efectuados inúmeros testes ao controlador, chegamos a conclusão que este poderia ser controlado com o uso de um PWM, deste modo adaptamos a placa de controlo de direcção (figura 6.4(a)) de modo a gerar os sinais necessários ao controlo não só do sistema de direcção mas também ao sistema de tracção do veículo.

### 6.3 Gestão de Energia

Como foi referido em 5.6, o sistema de gestão de energia tem como objectivo primordial a monitorização de informação a partir de correntes e tensões envolvidas num circuito de potência. Deste modo foi desenvolvido uma placa de *hardware* capaz de corresponder às necessidades impostas no capítulo 3. A placa de gestão de energia (figura 6.7) é composta por: Os **dc/dc's** para gerar as tensões necessárias a partir da tensão das baterias, estes recebem a tensão das baterias (48V) e transforma nas tensões desejadas (5V, 12V e 24V) para alimentar os diversos equipamentos que compõem o ALV. Todas as saídas dos **dc/dc's** estão protegidas com fusíveis como medida de segurança dos equipamentos. Para a alimentação do motor de direcção existe um **dc/dc** específico para esta tarefa de modo a garantir a corrente necessária ao motor, este não se encontra protegido na placa de gestão de energia mas sim no próprio controlador.

A alimentação do motor de tracção apesar de sair da placa de gestão de energia, não necessita de nenhuma conversão de tensão, visto que a alimentação do motor é igual à tensão de entrada da placa de gestão de energia (48V). Na placa de gestão de energia encontram-se: um **divisor de tensão** cuja a função é produzir uma tensão que estabeleça uma relação com a tensão das baterias, permitindo deste modo saber o estado das mesmas. Um **sensor de corrente** cuja finalidade é medir a corrente consumida pelo ALV, podendo deste modo monitorizar os consumos de corrente do veículo, que em conjunto com os valores disponibilizados pelo divisor de tensão permite construir um histórico de

---

<sup>1</sup>Nota: Este processo de desenvolvimento permitiu não pôr em causa a conclusão do projecto e simultaneamente considerar a substituição de controlo de tracção pela solução específica projectada quando esta se encontrar totalmente validada

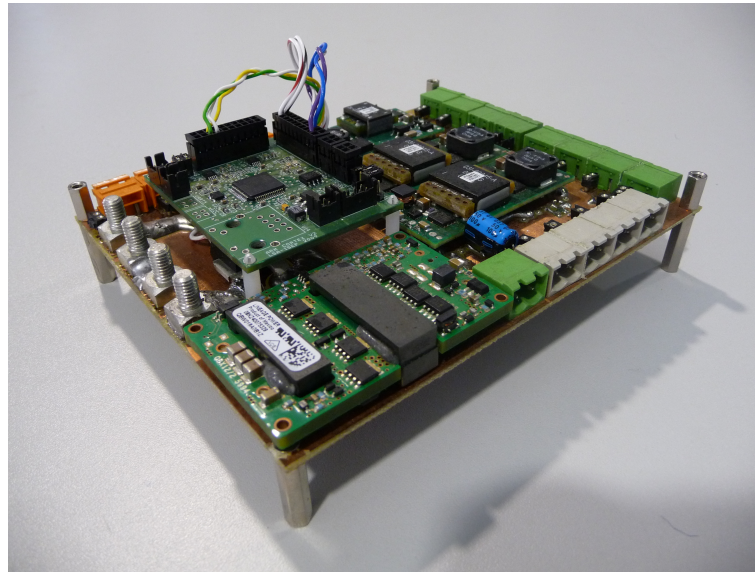


Figura 6.7: Placa de gestão de energia

potência gasta pelo veículo. A placa de gestão de energia possui ainda um **sensor de temperatura**, que permite monitorizar a temperatura no compartimento onde esta se encontra. Após a implementação da placa de gestão de energia, procedeu-se à validação de todos os componentes existentes na mesma. Após a validação com sucesso do *hardware*, procedeu-se à validação do *software* onde foram calibrados os diversos sensores existentes na placa de gestão de energia. A informação adquirida na placa de gestão de energia após processada é enviada para o barramento CAN, onde posteriormente é visualizada na aplicação gráfica do ALV TIGRE.

## 6.4 Sistema Computacional

Na figura 6.8 podemos observar a SBC escolhida para o veículo TIGRE, sendo as principais características desta SBC ter um processador core duo 1.6MHz com 1GB de memória RAM. O sistema operativo utilizado no ALV TIGRE é o Linux ( mais concretamente a distribuição Fedora 6), a escolha do sistema operativo Linux, recai devido às enormes potencialidades do mesmo, como por exemplo ser um *software open source*, nível de segurança que oferece e a existência de uma comunidade de suporte activa, assim como também por ser o sistema operativo utilizado em todos os *robots* do LSA. O sistema operativo é executado a partir de um cartão de memória do tipo *Compact Flash (CF)*. Devido

a existência de um barramento CAN no ALV, dotou-se o sistema computacional com um conversor PCAN<sup>2</sup>.



Figura 6.8: Sistema computacional do ALV TIGRE

## 6.5 Comunicações

O sistema de comunicações escolhido para o ALV TIGRE foi o *Wi-Fi*, mais concretamente o padrão IEEE 802.11n, as principais especificações técnicas do padrão 802.11n incluem: taxas de transferências disponíveis de 65 Mbps a 600 Mbps e uma faixa de frequência de 2,4 GHz e/ou 5 GHz. O equipamento adquirido (figura 6.9) tem como principais características: suporte do padrão IEEE 802.11a/b/g/n, taxas de transferência até 300 Mbps e um alcance em ambiente interior e exterior por volta dos 150m e 50km em linha de vista, respectivamente.



Figura 6.9: Modulo mini-PCI utilizado no ALV TIGRE

---

<sup>2</sup>Conversor porta paralela - CAN

Para garantir um bom desempenho do sistema de comunicação foi utilizada uma antena omnidireccional de 5GHz.

## 6.6 Sistema de Navegação

Os sistemas de navegação integrados no ALV são: um receptor de GPS e um INS. Foi utilizado um receptor de GPS da Septentrio, modelo PoloRx2e 6.10(a), trata-se de um receptor com 48 canais, com recepção de dupla frequência e com uma frequência de saída de dados até 10Hz. Este receptor permite a utilização em RTK aumentando a precisão consideravelmente. Dependendo do nível de qualidade exigida na posição, podemos recorrer à utilização de três tipos de sistema inerciais existentes no LSA: uma opção de mais baixa precisão e *low-cost* será a utilização de um sistema inercial desenvolvido no laboratório de categoria *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS), outro consiste na utilização de um sistema de navegação inercial *strapdown*<sup>3</sup> da Microstrain modelo 3DM-GX1, e por fim a solução implementada que consiste num sistema de elevada precisão com um custo elevado da iMAR, modelo iNAV-FMS-E, 6.10(b), trata-se de um INS baseado em giroscópios de fibra óptica.



(a) Gps Utilizado no ALV TIGRE



(b) INS Utilizado no ALV TIGRE

Figura 6.10: Sistemas de navegação

<sup>3</sup>O INS *strapdown*, ou plataforma analítica, surge da necessidade de reduzir complexidade mecânica da plataforma inercial menânica (*INS Gimballed*). Nesta plataforma os sensores (acelerómetros e giroscópios) estão fixos rigidamente à estrutura do veículo, senso a informação tratada computacionalmente para a obtenção dos resultados para a navegação.

## 6.7 Sistemas de Percepção

Os sistemas de percepção integrados no ALV consiste num sensor LRF (figura 6.11(a)) que tem a capacidade de mapeamento 2D até uma distância de 80m, uma câmara termográfica (figura 6.11(b)) que possui um sistema *Pan & Tilt* que permite orientar a câmara para qualquer lugar à volta do veículo e uma câmara de vídeo (figura 6.11(c)) que também possui um sistema *Pan & Tilt* possibilitando uma visão periférica com uma abertura máxima de  $270^\circ$  relativamente à frente do veículo.

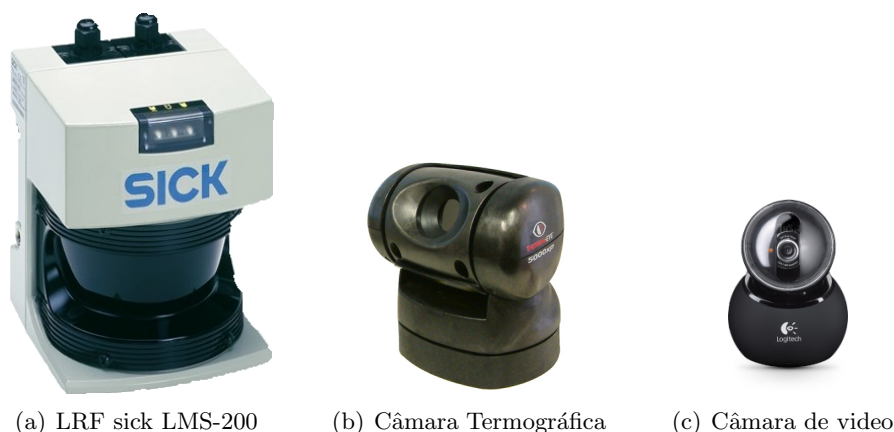


Figura 6.11: Sistemas de percepção

## 6.8 Veículo

Após a conclusão da implementação dos sistemas descritos anteriormente, procedeu-se à integração de todos os sistemas necessários ao funcionamento do ALV TIGRE. Deste modo será efectuada uma descrição sucinta da integração de todos os sistemas. Para garantir o funcionamento em ambientes adversos existe a necessidade de acomodar todos os sistemas de modo a garantir a imunidade ao veículo do meio circundante, deste modo, todos os equipamentos constituintes do ALV estão acondicionados dentro de compartimentos que garantem o bom funcionamento das condições descritas no capítulo 3.

Numa análise geral ao ALV os sistemas constituintes do mesmo foram divididos em três grupos: A mala do sistema computacional, o compartimento de distribuição e gestão de energia e o compartimento de controlo de tracção e direcção como se pode observar na figura 6.12. Para tal foi adquirido uma mala da marca PELI com as seguintes características: estanque, resistente a impactos e à prova de poeira. Dentro da mala foi

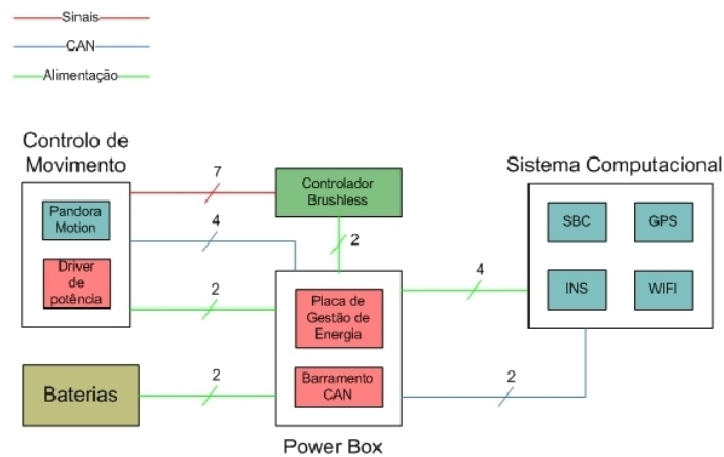


Figura 6.12: Subsistema implementado no veículo

acomodado um sistema computacional, um sistema de comunicações *wireless*, um receptor GPS e o INS, para garantir as características acima mencionadas, foram utilizadas conectores estanques para estabelecer interface entre os outros equipamentos no ALV. A assemblagem final pode ser observada na figura 6.13.

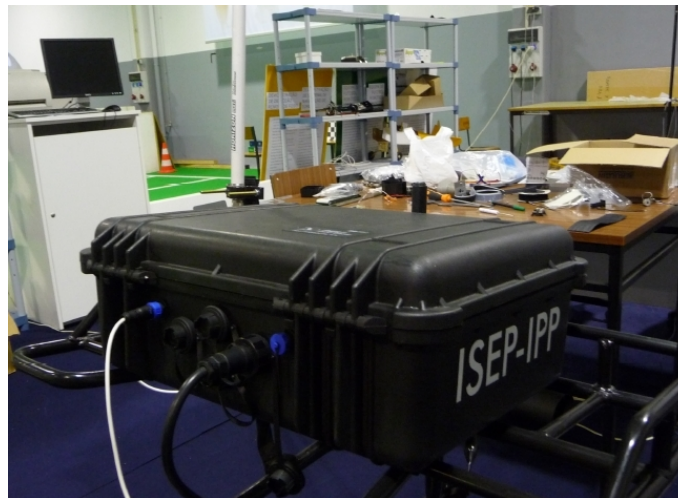


Figura 6.13: Mala com o sistema computacional

Foi construída um compartimento onde foi instalado o sistema de distribuição e gestão de energia e também um sistema de distribuição do barramento CAN, à semelhança e pela mesma razão da mala do sistema computacional esta possui também conectores estanques para a distribuição de alimentação pelos diversos equipamentos e também para a distribuição do barramento de comunicações entre o veículo 6.14.

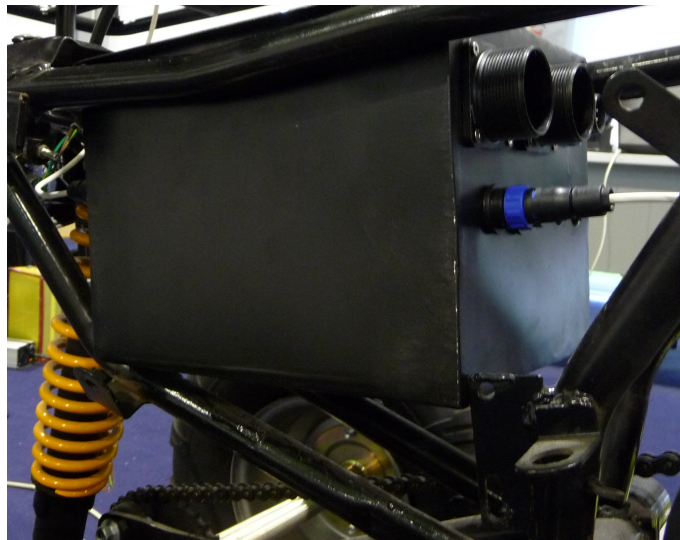


Figura 6.14: Compartimentado do sistema de gestão e distribuição de energia

O sistema de controlo de direcção e controlo de tracção, foi acomodado num perfil em alumínio para garantir uma melhor dissipação do calor gerado pelo *hardware* do controlo de direcção. Na figura 6.15 podemos observar o aspecto final do sistema referido.

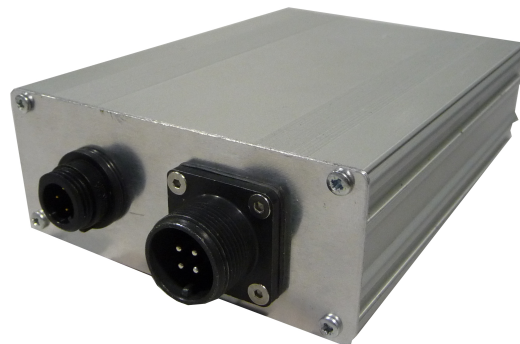


Figura 6.15: Caixa do sistema de controlo de tracção e controlo de direcção

Tendo em conta que o veículo é movido a energia eléctrica, torna-se evidente a necessidade do uso de baterias com elevada capacidade para a alimentação dos diversos dispositivos. Deste modo foi feito um estudo de mercado sobre as diversas baterias existentes, chegando assim a conclusão que as melhores baterias existentes na actualidade são as *Lithium Iron Phosphate* ( $\text{LiFePO}_4$ ), visto possuírem uma maior densidade energética por Kg, serem leves, seguras (ao contrário das baterias de *Lithium Polymer* ( $\text{LiPo}$ ), estas não explodem) e com um elevado número de ciclos de cargas e descargas. Foram pois

adquiridas quatro baterias  $\text{LiFePO}_4$  de 12V 50Ah, para fornecer a energia eléctrica ao ALV. Toda as cablagens existentes no veículo foram projectadas consoante os requisitos impostos em 3, e também dotou-se o veículo com dois mecanismos de emergência no caso de ocorrer alguma anomalia, um dos sistemas faz o corte do motor de tracção e o segundo faz um corte na alimentação geral do ALV.

Os diferentes subsistemas integrados no ALV foram não só validados separadamente mas também integrados no veículo. O controlo de direcção e tracção implementados foram validados com os restantes subsistemas. Ambos os sistemas de controlo foram testados com carga adicional (80Kg) não tendo sido detectado impacto significativo quer no controlo de velocidade quer no controlo de direcção. Em ambos os casos, evidenciam-se quer rapidez na resposta elevada (retorno extremo de direcção inferior a 1 segundo). A integração do ALV com a interface remota de controlo e supervisão, foi também testado e validado com o sistema real.

## 6.9 Validação do Controlo de Trajectórias

A fim de estudar o comportamnto do ALV, foi desenvolvido um simulador recorrendo ao *Simulink*. Para uma organizada estrutura do simulador, foi utilizada uma abordagem baseada em s-function, com o simulador desenvolvido é possível testar a cinemática de um veículo com direcção do tipo *Ackerman* assim como testar o controlo de trajectórias descrito em 4.3.

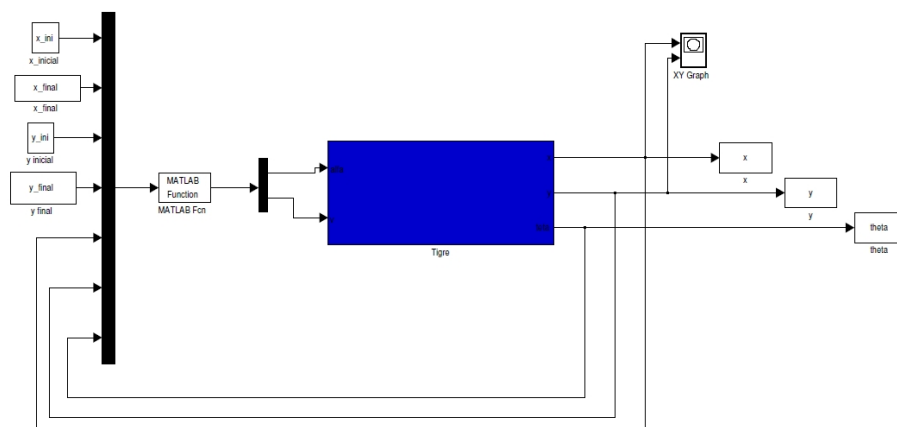


Figura 6.16: Simulador do ALV TIGRE

A fim de validar o controlo de trajectórias, podemos observar na figura 6.17 a validação do controlo de trajectórias, tendo sido efectuada uma trajectória em “U”, a verde podemos ver a trajectória ideal e a azul a trajectória executada pelo veículo.

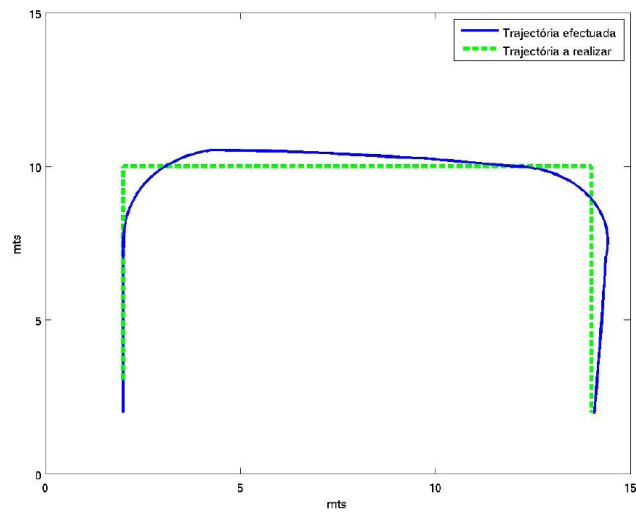


Figura 6.17: Simulação de uma trajectória em “U”

O sistema de gestão de locomoção foi implementado no veículo real procedendo-se à sua validação parcial. No presente estado de implementação são ainda necessários testes mais exaustivos de integração do sistema de navegação e de controlo, por forma a aferir da fiabilidade global do veículo bem como do seu desempenho expectável em cenário operacional.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

## Capítulo 7

# Conclusões e Trabalho Futuro

Nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento e implementação de um veículo autónomo terrestre, com particular ênfase no seu sistema de controlo. O veículo desenvolvido (*robot* móvel terrestre TIGRE), enquadra-se na actividade de I&D do LSA-ISEP em robótica móvel terrestre permitindo a sua aplicação em missões de monitorização, inspecção, vigilância, transporte ou *relay* de comunicações em ambientes exteriores e pouco estruturados. Este sistema possui capacidade de locomoção adequada à operação em ambientes exteriores bem como características físicas susceptíveis de lhe conferir um elevado grau de operacionalidade. No decurso do trabalho apresentado foram abordados os cenários de aplicação e identificado um conjunto de requisitos para o projecto do sistema. O problema de controlo de locomoção foi abordado de uma forma hierárquica desde o controlo electromecânico de tracção e direcção ao controlo de missão e supervisão do veículo. O controlo de direcção assumiu particular importância na vertente de implementação. Uma vez que a estrutura mecânica base do veículo partiu de uma plataforma disponível comercialmente, foi necessário projectar e implementar as necessárias adaptações mecânicas e electromecânicas para o controlo de direcção. Para este desenvolveu-se um controlador para a direcção, que permite o controlo de um motor DC capaz de suportar correntes até 30A, permitindo um controlo em posição através da utilização de um *encoder* magnético. Para o controlo do motor de tracção foram abordadas duas soluções. Uma passou pelo estudo e desenvolvimento de um sistema de raiz capaz de controlar motores BLDC de elevada potência, a segunda passou pela utilização de uma solução através de um controlador

externo. Os sistemas de controlo de direcção e tracção implementados foram validados no veículo real.

Foi projectada uma arquitectura de *hardware* que permite a implementação de modos de locomoção avançados, integração de múltiplos sensores (quer de navegação quer outros), meios de comunicação e capacidades computacionais adequadas à autonomia de decisão e controlo. Este projecto orientou a implementação realizada. Foi também apresentada uma arquitectura de *software* enquadrando o sistema de controlo e perspectivando integração de múltiplas funcionalidades bem como de subsistemas cruciais como a localização do *robot*.

O sistema implementado foi já validado em cenário controlado sendo necessário a realização de testes exaustivos em cenário operacional, por forma a avaliar o seu desempenho bem como estabelecer parâmetros de operacionalidade e fiabilidade.

O sistema computacional foi implementado por forma a dotar o veículo de capacidade computacional necessária para o desempenho das aplicações analisadas no capítulo 3. O sistema projectado integra uma SBC COTS, câmara USB, módulo *wireless*, câmara termográfica, receptor GPS, e um INS, tendo-se procedido à instalação de uma distribuição do sistema operativo (versão Linux) para validação da mesma.

Foi desenvolvido um sistema de gestão de energia com capacidade de distribuir, monitorizar e detectar eventuais falhas, o sistema incorpora um sistema embebido de elevado desempenho, que permite a adição de novas funcionalidades ao sistema em questão.

Perspectiva-se como principais linhas de desenvolvimento para o trabalho futuro a aplicação de novos conceitos, no que respeita ao controlo e locomoção, navegação precisa, processamento de informação sensorial (nomeadamente laser e imagem), mapeamento assim como a integração de algoritmos de *obstacle avoidance* e planeamento de trajectórias.

Problemas de controlo coordenado e fusão de informação distribuída em cenários de maior complexidade como são os cenários que resultam da utilização de múltiplos veículos de exterior em ambientes não estruturados, constituem também tópicos relevantes de desenvolvimento futuro.

# Referências

- [1] João Ricardo Pereira de Sousa. Sistema de modelização tridimensional para ambientes não estruturados. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2009.
- [2] R. M DeSantis.h. Modeling and path-tracking control of a mobile wheeled robot with a differential drive. Technical report, 1995.
- [3] Sebastian Thrun, Scott Thayer, Warren Whittaker, Christopher Baker, Wolfram Burgard, David Ferguson, Dirk Haehnel, Michael Montemerlo, Carlos Revertea Aaron Christopher Morris, Zachary Omohundro, and William "Red" L. Whittaker. Autonomous exploration and mapping of abandoned mines. *Autonomous exploration and mapping of abandoned mines*, 11(1):79–91, December 2004.
- [4] Sebastian Thrun, Mike Montemerlo, Hendrik Dahlkamp, David Stavens, Andrei Aron, James Diebel, Philip Fong, John Gale, Morgan Halpenny, Gabriel Hoffmann, Kenny Lau, Celia Oakley, Mark Palatucci, Vaughan Pratt, and Pascal Stang. Stanley: The robot that won the darpa grand challenge. *Journal of Field Robotics*, 23(9):661 – 692, 2006.
- [5] Chris Urmson, Joshua Anhalt, Drew Bagnell, Christopher Baker, Robert Bittner, M. N. Clark, John Dolan, Dave Duggins, Tugrul Galatali, Chris Geyer, Michele Gittelman, Sam Harbaugh, Martial Hebert, Thomas M. Howard, Sascha Kolski, Alonzo Kelly, Maxim Likhachev, Matt McNaughton, Nick Miller, Kevin Peterson, Brian Pilnick, Raj Rajkumar, Paul Rybski, Bryan Salesky, Young-Woo Seo, Sanjiv Singh, Jarrod Snider, Anthony Stentz, William "Red" Whittaker, Ziv Wolkowicki, and Jason Ziglar. Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(8):425 – 466, 2008.
- [6] Anthony Stentz, Cristian Dima, Carl Wellingtonand Herman, and David Stager. A system for semi-autonomous tractor operations. *Autonomous Robots*, Vol. 13:87–103, 2002.
- [7] Jean-Sebastien Valois, Herman Herman, John Bares, and David P.Rice. Remote operation of the black knight unmanned ground combat vehicle. Technical report, National RObotics Engineering Center, Carnegie Mellon University, 2008.
- [8] Takeshi Takahashi. 2d localization of outdoor mobile robots using 3d laser range data. Master's thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 2007.
- [9] Nelson, W. L., Cox, and I. J. Local path control for an autonomous vehicle. pages 38–44, 1990.

- [10] Y. Kanayama and S. Yuta. Vehicle path specification by a sequence of straight lines. *RA*, 4:265–276, 1988.
- [11] Eric N Moret. Dynamic modeling and control of a car-like robot. Master’s thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, February 2003.
- [12] Simon Julier. Process models for the high-speed navigation of conventional road vehicles. Technical report, University of Oxford, 2006.
- [13] Simon J. Julier. Process models for the navigation of high-speed land vehicles. Master’s thesis, University of Oxford, 1996.
- [14] Alain Kornhauser and Robert Stengel. Advanced state estimation and control of an autonomous ground vehicle using a priori knowledge of vehicular dynamics. *Springer*, 2007.
- [15] Johan Boot. Atv control. Master’s thesis, Eindhoven UNiversity of Technology, 2005.
- [16] Zvi Shiller and Yu-Rwei Gwo. Dynamic motion planning of autonomous vehicles. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 7, 1991.
- [17] M. Egerstedt et all. Control of car-like robot using a dynamic model. *IEEE Conference on Robotics and Automation*, May 1998.
- [18] Ricardo Carelli, Guillermo Forte, and Gastón Araguás eduardo Destéfanis Luis Canali, Vicent Mut. Autonomous and teleoperation control of a mobile robot. *Mechatronics*, 18:187–194, 2008.
- [19] Hugh Durrant-Whyte. Critical review of the state-of-the-art in autonomous land vehicle systems and technology. Technical report, Australian Centre for Field Robotics, The University of Sydney NSW 2006, 2001.
- [20] Patrick Eicker. The embudito mission: A case of study of the systematics of autonomous ground mobile robots. Technical report, Sandia National Laboratories, 2001.
- [21] Q. P. Ha, T. H. Tran, S. Scheduling, G. Dissanayake, and H. F. Durrant-Whyte. Control issues of an autonomous vehicle. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, ISARC 2005.
- [22] C. Armbrust, T. Braun, T. Fohst, M. Proetzsch, A. Renner, B.H. Schafer, and K. Berns. Ravon - the robust autonomous vehicle for off-road navigation. *Proceedings of the IARP International Workshop on Robotics for Risky Interventions and Environmental Surveillance*, 2009.
- [23] Darpa Challenge. <http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>.
- [24] Pierre Lamon, Sascha Kolski, Rudolph Triebel, Roland Siegwart, and Wolfram Burgard. The smartter for elrob 2006 - a vehicle for fully autonomous navigation and mapping in outdoor environments. Technical report, Autonomous Systems Lab, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2006.
- [25] Alberto Manuel Martinho Vale. Mobile robo navigation in outdoor environments: A topological approach. Master’s thesis, Universidade T?cnica de Lisboa, Instituto Superior T?cnico, 2005.

- [26] <http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/rvca/index.htm>. Rvca. National Robotic Engineering Center.
- [27] Bradley Hamner, Sanjiv Singh, , and Myung Hwangbo. Results in combined route traversal and collision avoidance. In *International Conference on Field & Service Robotics (FSR)*, July 2005.
- [28] Bradley Hamner, Sebastian Scherer, and Sanjiv Singh. Learning to drive among obstacles. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2663 – 2669, October 2006.
- [29] Bradley Hamner, Sanjiv Singh, and Sebastian Scherer. *Learning Obstacle Avoidance Parameters from Operator Behavior*, 23(1):1037–1058, December 2006.
- [30] Bradley Hamner, Sanjiv Singh, Stephan Roth, and Takeshi Takahashi. *An efficient system for combined route traversal and collision avoidance*, 24(1):365–385, May 2008.
- [31] Jim Ostrowski and Joel Burdick. Geometric perspectives on the mechanics and control of robotic locomotion. pages 536–547. The Seventh International Symposium, 1996.
- [32] Patrick (Chris) Leger and John Bares. Automated synthesis and optimization of robot configurations. In *Proceedings of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*, 1998.
- [33] J. Y. Wong. *Theory of Ground Vehicles*. 4th edition edition, 2008.
- [34] J.R. Ellis. *Vehicle Handling Dynamics*. Mechanical Engineering Publications, 1994.
- [35] J.C. Dixon. *Tyres, Suspension and Handling*. Cambridge University Press, second edition edition, 1991.
- [36] J.C. Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Press, 1991.
- [37] I.kamon, E. Rivlin, and E. Rimon. A new range-sensor based globally convergent navigation for mobile robots. In *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, April 1996.
- [38] Anthony Stentz. Optimal and efficient path planning for partially-known environments. In *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1994.
- [39] D. Garlan M. Shaw. *Software architecture, Perspectives on an emerging discipline*. Prentice-Hall, 1996.
- [40] Rachid Alami, Raja Chatila, and Frédéric Py Félix Ingrand. Dependability issues in a robot control architecture. 2002.
- [41] Félix Ingrand, Raja Chatila, and Rachid Alami. An architecture for dependable autonomous robots. *IARP-IEEE RAS Workshop on Dependable Robotics*, 2001.
- [42] Terry Huntsberger, Paolo Pirjanian, Ashitey Trebi-Ollennu, Hari Das Nayar, Hrand Aghazarian, Anthony J. Ganino, and Mike Garrett. Campout: A control architecture for tightly coupled coordination of multirobot systems for planetary surface exploration. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, 33, 2003.

- [43] Erann Gat. On three-layer architectures. In *Artificial Intelligence and Mobile Robots*, David Kortenkamp, 1998.
- [44] Nils Ole Tippenhauer. A multi-robot architecture for autonomous cooperative behaviours. Technical report, University of Waterloo, 2005.
- [45] ELROB. <http://www.elrob.org/>.
- [46] M.Egerstedt, X.Hu, and A. Stotsky. Control of a car-like robot using a dynamic model. Technical report, Royal Institute of Technology.
- [47] R. M. Desantis. Path-tracking for car-like robots with single and double steering. *IEEE Tran. Veh. Technol*, 4(2), 1995.
- [48] Eric N Moret. Dynamic modeling and control of a car-like robot. Master's thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, February 2003.
- [49] *Stellaris® Brushless DC (BLDC) Motor Control Reference Design Kit with Ethernet and CAN*.
- [50] Sérgio Mário Mota Coelho. Sistema de localização para veículo autónomo terrestre. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2009.
- [51] David H. Titterton and John L. Weston. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. The Institution of Electrical Engineers, second edition, 2004.

# Anexo A

## Apêndice

### A.1 Princípio de *Ackerman*

O princípio de *Ackerman* define a geometria que é aplicada em todos os veículos terrestres de duas ou quatro rodas. Este princípio permite que o veículo descreva uma curva sem que haja desgaste ou arrasto nos pneus do veículo. Antes de este princípio ter sido desenvolvido os veículos usavam geometrias paralelas, o que proporcionava uma pobre eficiência quer de estabilidade quer de desgaste dos componentes envolvidos. O Sr. Rudolf *Ackerman* desenvolveu com um trabalho de pesquisa uma geometria para veículos terrestres que eliminava quase totalmente todos os problemas nesta classe de veículos.

Podemos observar na figura [A.1](#) um carro a descrever um movimento circular, as linhas vermelhas e verdes representam o caminho que as rodas seguem. Como se pode observar, as rodas traseiras descrevem uma distância mais pequena que as rodas dianteiras. Para que as rodas descrevam uma trajectória curvilínea, estas devem virar com um ângulo de tal forma que seja tangente a trajectória descrita pela mesma. Como podemos verificar, as rodas têm trajectórias diferente, o que leva a terem ângulos tangentes diferentes

A diferença entre o ângulo interior e exterior pode ser mais bem compreendida na figura [A.2](#). O diagrama ilustra a trajectória descrita pelas rodas e com a mesma ilustração podemos observar o raio de trajectória de cada roda. Assim podemos comprovar que para uma trajectória curvilínea cada roda deve ter um ângulo de curvatura diferente.

Se as rodas virarem com o mesmo ângulo, a roda de dentro entraria em arrasto provocando um mau desempenho do veículo. Por isso, *Ackerman* desenvolveu este princípio chegando a uma geometria que resolveu o problema de mau desempenho (figura [A.3](#)).

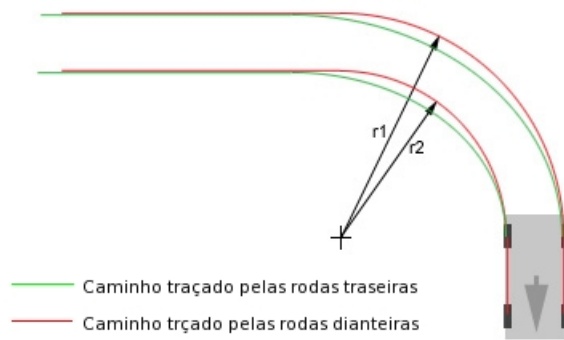


Figura A.1: Movimento Circular

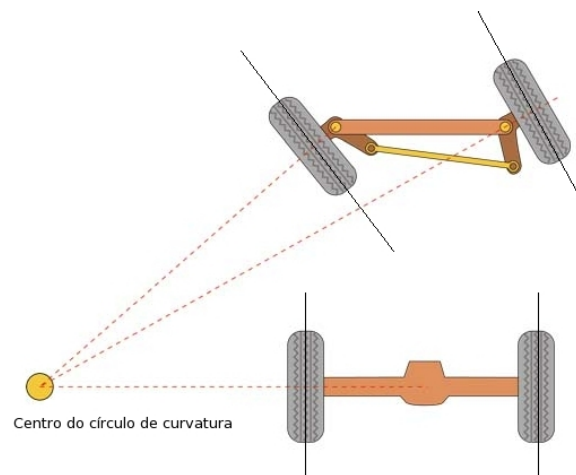


Figura A.2: Centro do raio de curvatura

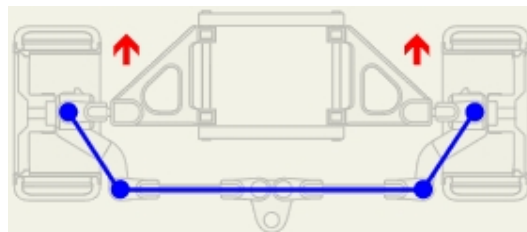


Figura A.3: Geometria de Ackerman

A característica desta geometria mecânica é que as rodas não viram com o mesmo ângulo, como podemos observar na figura A.4.

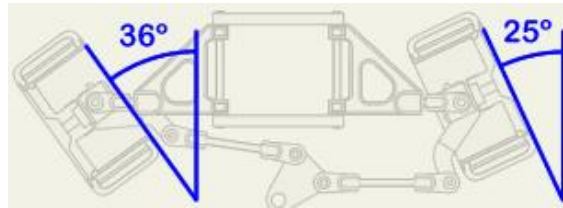


Figura A.4: Diferença de ângulos

Com um estudo mais aprofundado Ackerman chegou a seguinte representação matemática desta geometria (A.1).

$$R = \left(\frac{B}{2}\right) + \left(\frac{L}{\tan(\alpha_{in})}\right)$$

$$\alpha_{out} = \arctan \left\{ \frac{1}{\left(\frac{B}{L}\right) + \left(\frac{1}{\tan(\alpha_{in})}\right)} \right\} \quad (\text{A.1})$$

$R$  - Raio da trajectória

$B$  - Distância entre eixos frontal e traseiro

$L$  - Distância do ponto convergente ao eixo da roda do trapézio

$\alpha_{in}$  - Ângulo da roda interior a trajectória

$\alpha_{out}$  - Ângulo da roda exterior a trajectória

## A.2 Protocolos de comunicação

O CAN é um protocolo de comunicação série especialmente orientado para a ligação em rede de dispositivos "inteligentes", sensores e actuadores pertencentes a um sistema ou subsistema.

### A.2.1 Atributos

O protocolo CAN é do tipo multi-mestre ou seja, todos os nós da rede têm a capacidade de transmitir dados e vários nós podem tentar aceder ao barramento simultaneamente. A descrição deste protocolo encontra-se na norma ISO 11898 que abrange as duas primeiras camadas do modelo OSI. No CAN as mensagens não têm endereço, apenas informação de

prioridade, pelo que não é necessário qualquer tipo de encaminhamento. As mensagens são difundidas para todos os nós da rede ("broadcasting"). Cada nó decide processar ou não uma mensagem após a leitura do seu identificador. O identificador tem também a função de atribuir uma determinada prioridade à mensagem na competição pelo barramento. A relativa simplicidade do protocolo CAN conduz a que seja fácil e barato o treino de técnicos; as interfaces dos componentes CAN tornam a programação de aplicações numa tarefa relativamente simples. Cursos introdutórios, bibliotecas de funções, kits de iniciação, módulos de I/O e uma grande variedade de ferramentas são disponibilizados por uma grande variedade de fabricantes contribuindo para a redução de custos inerente ao uso do protocolo. Controladores de baixo custo que implementam a camada de ligação de dados e permitem a ligação simples com microcontroladores estão disponíveis desde 1989. Hoje em dia estão disponíveis mais de 50 controladores de protocolo CAN de mais de 15 fabricantes. O uso do CAN na maioria dos automóveis de passageiros europeus garantirá a existência de controladores CAN no mercado por pelo menos mais 10 anos. Outros mercados de grande volume como os de electrodomésticos e aplicações de controlo industrial também contribuem para o aumento do número de utilizadores do CAN e garantem o seu desenvolvimento por parte dos fabricantes de componentes. Na primavera de 1997 estavam instalados mais de 50 milhões de nós CAN, número este que não tem parado de crescer desde então. Uma das grandes vantagens do protocolo CAN é a sua robustez. Cada controlador CAN regista e avalia os erros de modo a poder tomar medidas correctivas. Estas podem consistir em desligar o nó que está a produzir os erros. Cada mensagem CAN pode conter de 0 a 8 bytes de informação. O envio de maior quantidade de informação pode ser realizado através da segmentação da mesma. A velocidade máxima de transmissão é de 1 Mbit/s para comprimentos de rede máximos de 40 m. Para distâncias maiores a velocidade tem de ser reduzida, nomeadamente para distâncias até 500 m a velocidade não deve ultrapassar os 125 kbit/s e para distâncias até 1km a velocidade máxima é de 50 kbit/s.

### **A.2.2 Aplicações do protocolo CAN**

As redes de CAN podem ser usadas como um sistema de comunicação embebido para microcontroladores assim como um sistema de comunicação aberto para dispositivos de "inteligentes". O protocolo CAN, originalmente desenvolvido para aplicações no ramo

automóvel tem visto o seu uso alargado na área das redes de campo industriais, com notáveis semelhanças. Em ambos os casos os principais requisitos são o baixo custo, a capacidade de funcionamento perante perturbações eléctricas e capacidade de operação em tempo real e facilidade de utilização. Alguns utilizadores, por exemplo no campo da engenharia médica, optaram pelo CAN por terem de satisfazer requisitos de segurança particularmente exigentes.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

## Anexo B

# Apêndice

### B.1 Esquemáticos

Nesta secção são apresentados os esquemáticos da placa de potência do controlador Brushless na figura [B.1](#) e [B.2](#) , o esquemático da placa de gestão de energia na figura [B.3](#) e o esquemático da placa de controlo de direcção na figura [B.4](#).

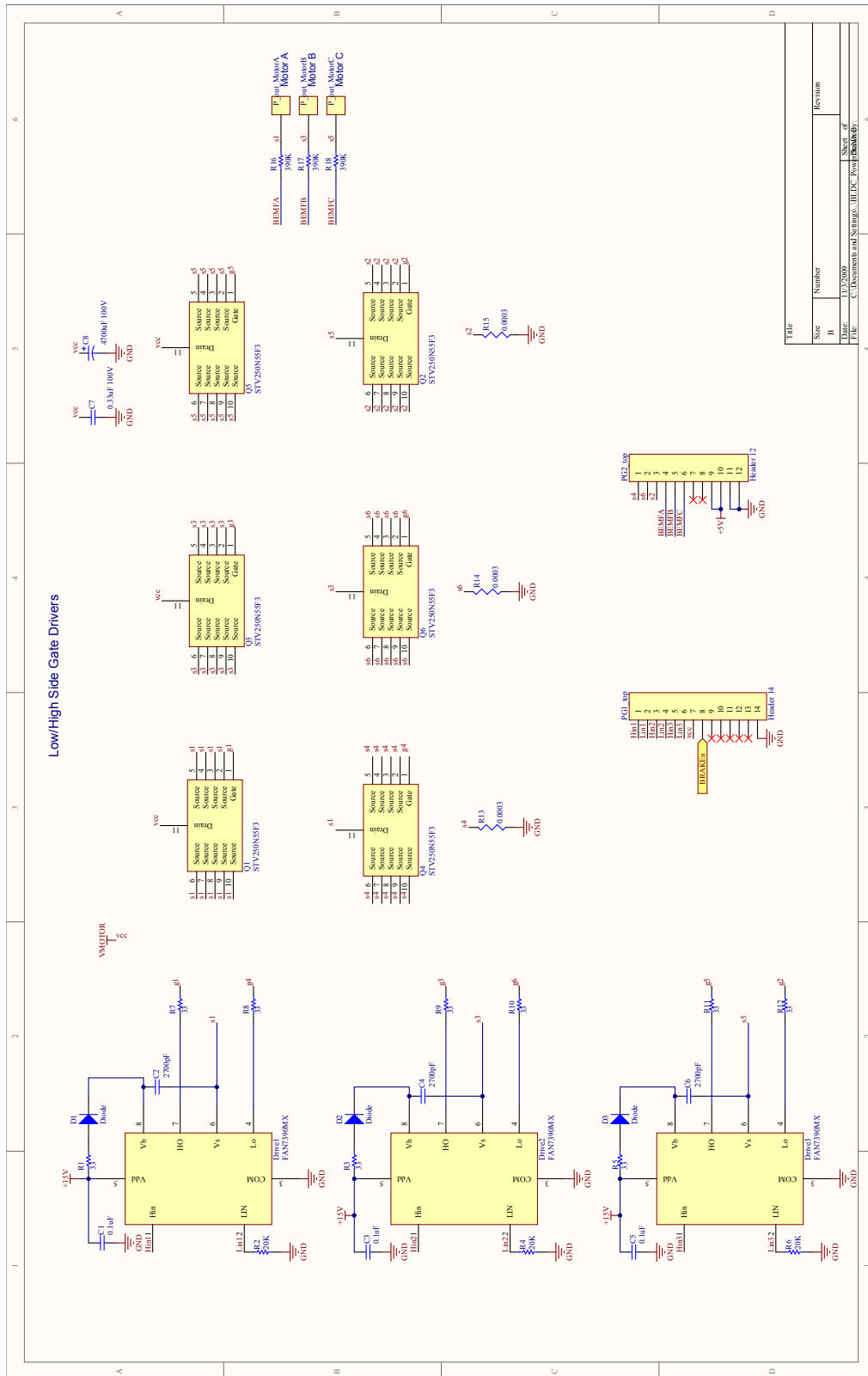


Figura B.1: Esquemático da placa de potência (parte 1/2)

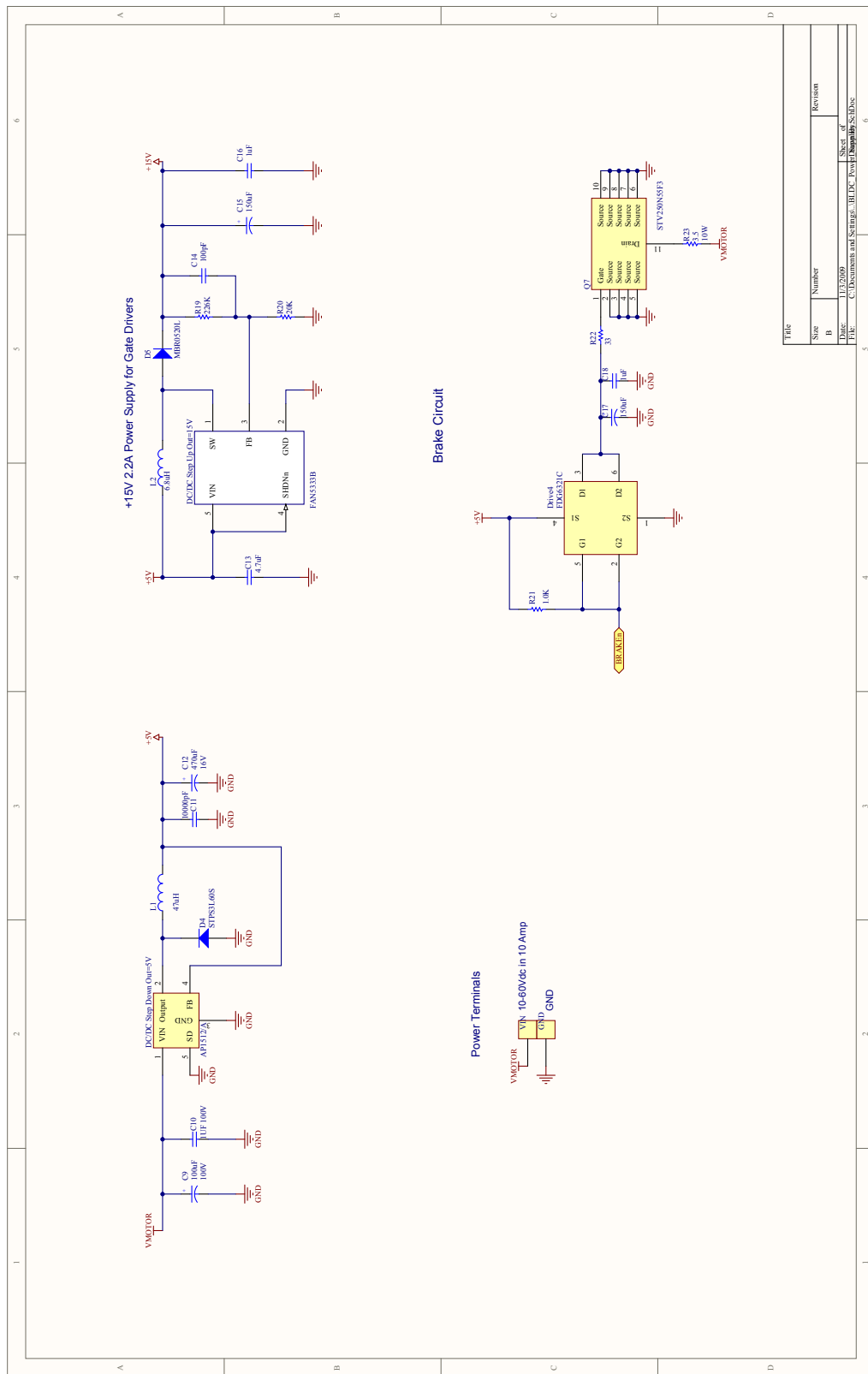


Figura B.2: Esquemático da placa de potência (parte 2/2)

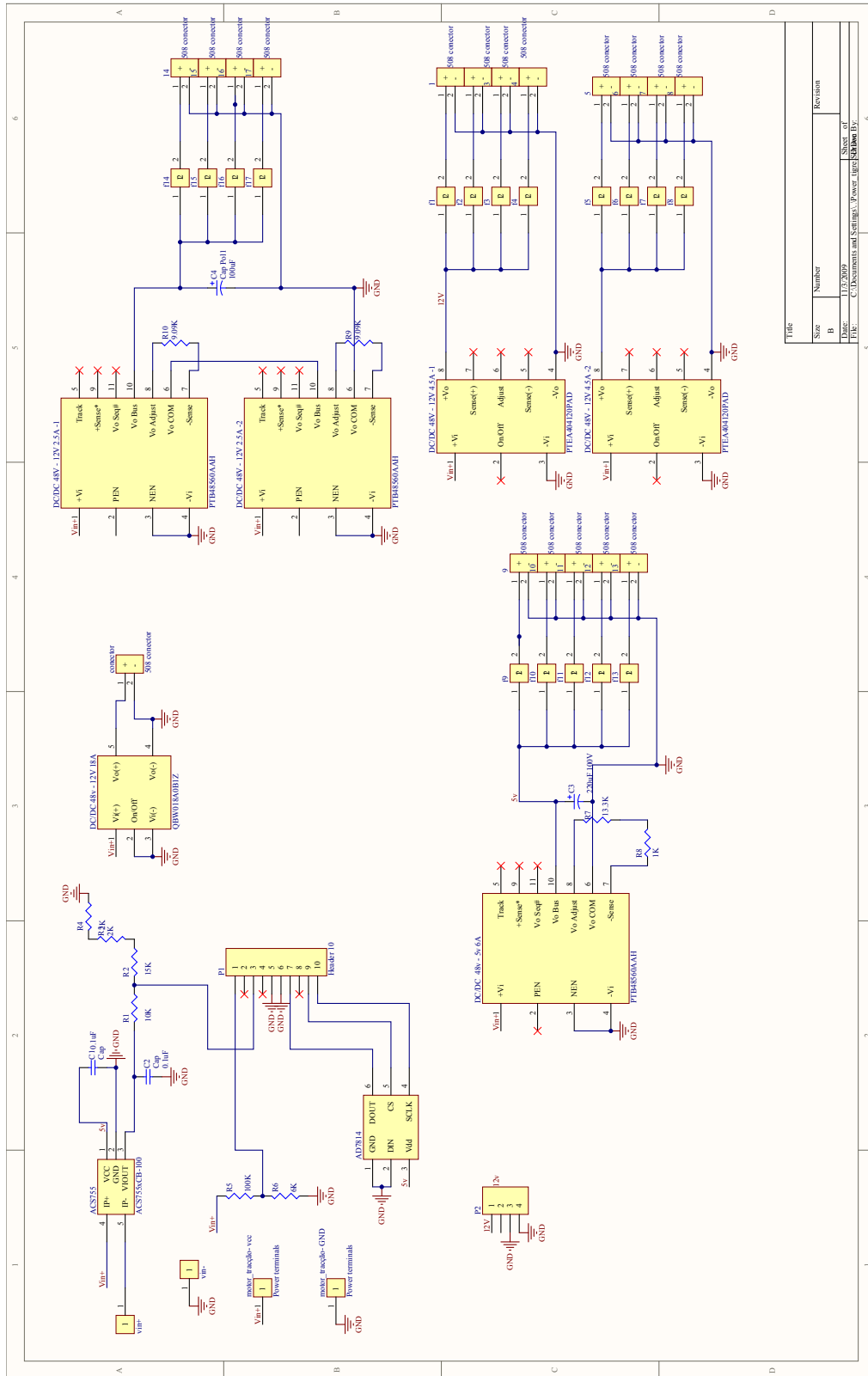


Figura B.3: Esquemático da placa de gestão de energia

