



**Desenvolvimento de uma plataforma móvel omnidirecional baseada em rodas *Mecanum* com gestão otimizada da energia**

UMinho | 2014

Carlos Alberto Fernandes Arantes



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Carlos Alberto Fernandes Arantes

**Desenvolvimento de uma plataforma móvel omnidirecional baseada em rodas *Mecanum* com gestão otimizada da energia**

Dezembro de 2014



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Carlos Alberto Fernandes Arantes

**Desenvolvimento de uma plataforma móvel  
omnidirecional baseada em rodas *Mecanum*  
com gestão otimizada da energia**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao

Grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e

Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do

**Professor Doutor João Miguel Clemente de Sena Esteves**

# DECLARAÇÃO

**Autor:** Carlos Alberto Fernandes Arantes

**Correio eletrónico:** [carlos1991arantes@outlook.com](mailto:carlos1991arantes@outlook.com)

**Telemóvel:** +351 913081403

**Número do cartão de cidadão:** 13907859 2ZZ3

**Título da dissertação:** Desenvolvimento de uma plataforma móvel omnidirecional baseada em rodas *Mecanum* com gestão otimizada da energia

**Ano de conclusão:** 2014

**Orientador:** Professor Doutor João Miguel Clemente de Sena Esteves

**Designação do Mestrado:** Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Departamento de Eletrónica Industrial

Escola de Engenharia

Universidade do Minho

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA DISSERTAÇÃO.

Guimarães, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

# Agradecimentos

A realização desta dissertação representa o culminar de 5 anos de estudo, dedicação, empenho e trabalho no Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores. Esta dissertação só foi possível com o contributo de pessoas que, de forma direta ou indireta, me apoiaram tanto a nível pessoal como profissional. Assim, dedico este espaço a essas pessoas expressando os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, quero expressar um agradecimento especial para o meu orientador, o Professor Doutor João Miguel Clemente de Sena Esteves. O seu contributo para a realização desta dissertação foi crucial sobretudo devido à confiança transmitida, à constante disponibilidade para ajudar, à boa disposição com a qual sempre me recebeu e ao profissionalismo com o qual me orientou ao longo do trabalho.

Quero agradecer ao Sr. Manuel Silva, ao Hugo Costa, ao Moisés Cunha e ao Rui Sousa, meus colegas e amigos da Universidade do Minho, que acompanharam a realização do trabalho e que contribuíram com bons conselhos, boa disposição e motivação.

Quero também agradecer ao Sr. Joel Almeida, ao Sr. Carlos Torres e à D. Ângela Macedo, técnicos do Departamento de Eletrónica Industrial, pela ajuda prestada durante a realização de trabalhos mecânicos e pela boa disposição com a qual sempre me receberam. Por causa deles, sempre foi um gosto estar e trabalhar no *helpdesk* do Departamento de Eletrónica Industrial.

Um agradecimento para o Sr. Jaime Gomes e para a D. Naíde Cardoso pelo apoio, pela confiança e pela experiência de vida que me transmitiram ao longo dos últimos 5 anos.

Não menos importante, quero expressar a minha gratidão aos meus pais pela confiança e pelo apoio, não só durante a realização deste trabalho, mas também ao longo de toda a minha vida. Sem eles, nada disto teria sido possível.

Por último, um agradecimento para as pessoas que mesmo indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, com gestos simples mas muito importantes como, por exemplo, um sorriso ou palavras de apoio.

A todos, MUITO OBRIGADO!

## **Agradecimentos**

---

# Resumo

O uso de sistemas de direção não-omnidirecionais em plataformas móveis (nomeadamente em robôs móveis) constitui uma severa limitação em termos de liberdade de movimentos. Este facto leva a um aumento da complexidade dos algoritmos responsáveis pela geração dinâmica das trajetórias, pode implicar um gasto supérfluo de energia, maiores tempos de resposta e resulta ainda na dificuldade ou até impossibilidade de executar determinadas tarefas, em locais congestionados onde o espaço disponível é reduzido. Por outro lado, o elevado tempo de carga das baterias também constitui uma importante limitação em plataformas móveis, uma vez que, quando estas se encontram imobilizadas a carregar, normalmente não são produtivas.

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de uma plataforma móvel omnidirecional baseada em 4 rodas *Mecanum*, possuidora de um sistema de alimentação energeticamente otimizado e totalmente incorporado nela, que lhe confira uma autonomia de algumas dezenas de minutos após um período de carregamento de alguns minutos. A autonomia deve ser de algumas horas quando não há restrições temporais para se efetuar o carregamento.

A plataforma desenvolvida, além de possibilitar um controlo sobre os 3 graus de liberdade do seu sistema de direção, incorpora um sistema de alimentação que lhe confere uma autonomia de 23 minutos e 13 segundos após um tempo de carregamento de 3 minutos e 42 segundos. Quando não há restrições temporais para se efetuar o carregamento, a autonomia é de aproximadamente 9 horas e 40 minutos após um tempo de carregamento de 8 horas e 30 minutos. O sistema de alimentação recorre a uma bateria de ácido-chumbo e a um módulo de ultracondensadores como elementos de armazenamento de energia. Desenvolveu-se também uma aplicação gráfica em C# e um sistema de telecomando baseado numa *IMU* que possibilitam o controlo remoto da plataforma móvel através de uma rede baseada no protocolo *IEEE 802.15.4*. A aplicação gráfica permite ainda a monitorização de diversos parâmetros inerentes ao funcionamento da plataforma móvel. Desta forma, todos os objetivos propostos foram atingidos.

**Palavras-chave:** Plataforma móvel omnidirecional, robô holonómico, rodas *Mecanum*, *IMU*, armazenamento de energia elétrica, conversor eletrónico de potência, ultracondensador, bateria.



# Abstract

The use of non-omnidirectional steering systems in mobile platforms (namely in mobile robots) constitutes a severe limitation in terms of freedom of movements. This fact leads to an increased complexity of the algorithms responsible for the dynamic generation of the trajectories, it may imply a superfluous expenditure of energy, higher response times and it still results in the difficulty or even impossibility of performing certain tasks in congested locations where the available space is reduced. On the other hand, the large charging time required by batteries is also an important limitation in mobile platforms because, when they are immobilized for charging, normally they are not productive.

The main goal of this dissertation is the development of an omnidirectional mobile platform based on 4 Mecanum wheels, possessor of an energetically optimized and fully incorporated power supply system on it, which provides to the mobile platform an autonomy of some tens of minutes after a charging time of a few minutes. Furthermore, the autonomy should be of some hours when there are no time constraints to perform charging.

The developed mobile platform, in addition of providing a control over the 3 degrees of freedom of its steering system, incorporates a power supply system that provides 23 minutes and 13 seconds of autonomy after a charging time of 3 minutes and 42 seconds. When there are no time constraints to perform the charging, the autonomy is of approximately 9 hours and 40 minutes after a charging time of approximately 8 hours and 30 minutes. The power supply system uses a lead-acid battery and an ultracapacitors module as energy storage devices. It was also developed a graphical application in C# language and a remote control system based on an IMU that enable remote control of the mobile platform through a network based on the IEEE 802.15.4 protocol. Furthermore, the graphical application provides the monitoring of some parameters associated to the operation of the mobile platform. Thus, all the proposed goals were achieved.

**Keywords:** Omnidirectional mobile platform, holonomic robot, Mecanum wheels, IMU, electrical energy storage, power electronics converters, ultracapacitor, battery.



---

# Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Índice .....	ix
Índice de figuras .....	xiii
Índice de tabelas.....	xix
Lista de siglas e acrónimos .....	xxi
1. Introdução .....	1
1.1. Plataforma móvel omnidirecional.....	1
1.2. Conversor eletrónico de potência.....	2
1.3. Enquadramento .....	2
1.4. Motivação .....	5
1.5. Objetivos.....	8
1.6. Proposta do trabalho a desenvolver .....	9
1.6.1. O sistema a desenvolver .....	9
1.6.2. Aplicação gráfica num computador .....	11
1.6.3. Sistema de telecomando baseado numa <i>IMU</i> .....	11
1.7. Organização da dissertação.....	12
2. Sistemas de direção com rodas.....	13
2.1. Principais categorias de rodas .....	13
2.1.1. Rodas fixas <i>standard</i> .....	13
2.1.2. Rodas <i>Castor</i> .....	15
2.1.3. Rodas <i>Swedish</i> .....	17
2.1.3.1. Rodas omnidirecionais .....	17
2.1.3.2. Rodas <i>Mecanum</i> .....	19
2.1.4. Rodas esféricas .....	22
2.2. Principais sistemas de direção com rodas .....	24
2.2.1. Sistemas de direção com uma roda .....	24
2.2.2. Sistemas de direção com duas rodas .....	25
2.2.3. Sistemas de direção com 3 rodas .....	27
2.2.4. Sistemas de direção com 4 rodas .....	31

## Índice

---

2.2.5.	Outros sistemas de direção com rodas.....	38
3.	Energia e conversores de potência .....	41
3.1.	Conversores lineares.....	41
3.2.	Conversores comutados.....	45
3.2.1.	Conversor <i>step-down</i> ou <i>buck</i> .....	47
3.2.2.	Conversor <i>step-up</i> ou <i>boost</i> .....	51
3.2.3.	Conversor <i>step-up-down</i> ou <i>buck-boost</i> .....	54
3.2.4.	Conversor <i>SEPIC</i> ( <i>Single Ended Primary Inductance Converter</i> ) .....	57
3.2.5.	Conversor ponte H completa.....	61
4.	Sistema de alimentação.....	67
4.1.	Arquitetura, especificações e vantagens do sistema desenvolvido.....	67
4.1.1.	Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores.....	67
4.1.2.	Gestão otimizada da energia armazenada .....	69
4.1.3.	Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção.....	70
4.2.	Projeto e simulação do sistema desenvolvido.....	70
4.2.1.	Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores.....	70
4.2.1.1.	Transformador abaixador.....	70
4.2.1.2.	Ponte retificadora e filtro CC.....	72
4.2.1.3.	Conversor <i>step-down</i> do tipo fonte de corrente.....	73
4.2.1.4.	Controlador PI digital .....	74
4.2.2.	Gestão otimizada da energia armazenada .....	78
4.2.2.1.	Conversor <i>SEPIC</i> .....	78
4.2.2.2.	Conversor <i>step-up</i> .....	79
4.2.2.3.	Controlador PI digital .....	80
4.2.3.	Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção.....	82
4.2.3.1.	Conversores ponte H completa.....	82
4.2.3.2.	Reguladores de tensão .....	83
4.2.3.3.	Controlador PID digital.....	84
4.3.	Resultados computacionais e resultados experimentais do sistema desenvolvido .....	84
4.3.1.	Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores.....	84
4.3.2.	Gestão otimizada da energia armazenada .....	89
4.3.3.	Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção.....	93
5.	Sistema de controlo da locomoção.....	99
5.1.	A plataforma móvel omnidirecional.....	99
5.1.1.	Sensores .....	104

## Índice

---

5.1.1.1.	<i>Encoders</i> .....	104
5.1.1.2.	Sensores de infravermelhos.....	106
5.1.1.3.	Sensor de temperatura.....	106
5.1.1.4.	Sensor de humidade.....	107
5.1.2.	Controlador PID digital.....	108
5.1.3.	As equações da Cinemática.....	110
5.1.4.	Comunicação <i>Wireless</i> .....	111
5.2.	A aplicação gráfica em computador.....	113
5.2.1.	Primeira janela – Configuração da ligação <i>wireless</i> .....	114
5.2.2.	Segunda janela – Controlo da plataforma móvel omnidirecional.....	115
5.2.3.	Resultados experimentais da interação entre a aplicação e a plataforma.....	121
5.3.	O sistema de telecomando.....	127
5.3.1.	<i>Hardware</i> desenvolvido.....	130
5.3.2.	<i>Software</i> desenvolvido.....	131
5.3.3.	Resultados experimentais.....	134
6.	Conclusões e trabalho futuro.....	139
	Referências.....	143
	Apêndices.....	151
	Apêndice A.....	151
	Apêndice B.....	153
	Apêndice C.....	154
	Apêndice D.....	155
	Apêndice E.....	160
	Apêndice F.....	162
	Apêndice G.....	163
	Apêndice H.....	170
	Apêndice I.....	172
	Apêndice J.....	173
	Apêndice K.....	174
	Apêndice L.....	194
	Apêndice M.....	215
	Apêndice N.....	217



# Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama de uma plataforma móvel omnidirecional num plano bidimensional..	1
Figura 2 - Diagrama de um sistema baseado num conversor eletrónico de potência.	2
Figura 3 - Trajetória descrita por um veículo baseado no sistema de direção <i>Ackermann</i> para ir do ponto A para o ponto B, respeitando a orientação estabelecida.	3
Figura 4 - Trajetória descrita por um veículo omnidirecional para ir do ponto A para o ponto B, respeitando a orientação estabelecida.	6
Figura 5 - Perspetiva geral da arquitetura do sistema que se pretende desenvolver.	9
Figura 6 - Principais blocos do sistema a desenvolver.	10
Figura 7 - Exemplos de rodas fixas <i>standard</i> . A roda em (a) é passiva e é muito comum em robôs móveis. Em (b) evidencia-se uma roda motriz utilizada em motociclos.	14
Figura 8 - Diagrama de uma roda fixa <i>standard</i> acoplada ao chassi de um robô móvel.	14
Figura 9 - À esquerda apresenta-se uma roda <i>Castor</i> passiva, ao centro uma aplicação para esta categoria de rodas: o carrinho de compras do supermercado e à direita uma roda <i>Castor</i> motriz com 2 atuadores – um por cada grau de liberdade.	15
Figura 10 - Diagrama de uma roda <i>Castor</i> acoplada ao chassi de um robô móvel.	16
Figura 11 - Exemplos de rodas omnidirecionais: do lado esquerdo apresenta-se uma roda com uma fileira de roletes e do lado direito uma roda com duas fileiras de roletes.	17
Figura 12 - Representação dos 3 graus de liberdade de uma roda omnidirecional. É possível efetuar translações de forma paralela (eixo das ordenadas) e perpendicular (eixo das abcissas) ao eixo transversal de rotação. Adicionalmente, a roda pode rodar sobre si própria em torno do eixo perpendicular ao plano do solo que atravessa o centro de massa da mesma.	18
Figura 13 - Plataforma móvel omnidirecional baseada em 3 rodas omnidirecionais.	18
Figura 14 - Exemplo de duas rodas <i>Mecanum</i> . À esquerda, a fixação dos roletes é feita pelas extremidades enquanto à direita é feita pelo centro.	19
Figura 15 - As rodas <i>Mecanum</i> com roletes fixados pelas extremidades apresentam uma dificuldade acrescida na adaptação às irregularidades do solo.	20
Figura 16 - Diagrama com a representação dos vetores força que atuam sobre o chassi do robô móvel quando há locomoção. O ângulo entre a força total e as suas duas componentes é de 45°.	20
Figura 17 - Sistemas usados para bloquear os roletes e para ajustar o ângulo do seu eixo de rotação em relação ao eixo transversal da roda. Em algumas situações, estes sistemas melhoram substancialmente a eficiência da roda <i>Mecanum</i> .	21
Figura 18 - À esquerda apresenta-se uma roda esférica passiva e à direita o <i>Pololu 5" Robot Chassis RRC04A</i> que integra duas rodas fixas <i>standard</i> e uma roda esférica.	22
Figura 19 - Rato de computador antigo e obsoleto baseado na roda esférica. Nesta tecnologia usam-se 2 <i>encoders</i> encostados à esfera (mecanicamente desfasados 90°) por forma a medir o deslocamento linear do rato.	23
Figura 20 - O <i>CMU Ballbot</i> é um exemplo de um robô móvel que utiliza uma roda esférica motriz.	23
Figura 21 - Símbolos utilizados para cada definir cada categoria de rodas.	24
Figura 22 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma única roda esférica motriz. Este confere os 3 graus de liberdade à plataforma móvel omnidirecional. À direita evidencia-se o <i>CMU Ballbot</i> pois trata-se de uma aplicação para esta configuração.	25

## Índice de figuras

---

Figura 23 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma roda fixa <i>standard</i> motriz e uma roda <i>Castor</i> passiva. A bicicleta é uma das aplicações possíveis para esta configuração. ....	26
Figura 24 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas fixas <i>standard</i> motrizes. O robô <i>Cye</i> é uma das diversas aplicações para esta configuração.....	26
Figura 25 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma roda esférica passiva e duas rodas fixas <i>standard</i> motrizes. O robô <i>Pololu 5" Robot Chassis RRC04A</i> é uma das possíveis aplicações para esta configuração. ....	28
Figura 26 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma roda <i>Castor</i> passiva e duas rodas fixas <i>standard</i> motrizes. O triciclo <i>Piaggio Ape Kasten</i> é um exemplo de aplicação para esta configuração. ....	28
Figura 27 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 3 rodas <i>Castor</i> sempre sincronizadas mecanicamente. O robô <i>Denning</i> é uma das aplicações desta configuração. ....	29
Figura 28 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 3 rodas omnidirecionais motrizes desfasadas 120° entre si (sistema omnidirecional). À direita apresenta-se uma plataforma móvel omnidirecional que implementa esta configuração. ....	29
Figura 29 - Método gráfico que possibilita a obtenção do centro de rotação instantâneo de uma plataforma móvel baseada no sistema de direção <i>Ackermann</i> . ....	31
Figura 30 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas fixas <i>standard</i> motrizes e por duas rodas esféricas passivas. O <i>Khepera</i> é um robô que usa esta configuração diferencial para se locomover. ....	32
Figura 31 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas <i>Castor</i> dianteiras e duas rodas fixas <i>standard</i> traseiras. Esta configuração pode ser encontrada em praticamente todos os automóveis. ....	32
Figura 32 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas fixas <i>standard</i> dianteiras e por duas rodas <i>Castor</i> traseiras. Trata-se de uma configuração muito comum em empilhadores. ....	33
Figura 33 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 4 rodas <i>Castor</i> motrizes. Trata-se de uma configuração aplicada em alguns veículos usados na agricultura. ....	33
Figura 34 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 4 rodas omnidirecionais motrizes. À direita evidencia-se uma plataforma móvel, desenvolvida no âmbito da publicação, que recorre à configuração omnidirecional para se locomover. ....	34
Figura 35 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção omnidirecional composto por 4 rodas <i>Mecanum</i> motrizes. A plataforma móvel desenvolvida no âmbito da presente dissertação baseia-se nesta configuração omnidirecional. ....	35
Figura 36 - Representação dos movimentos considerados mais básicos para uma plataforma móvel omnidirecional baseada no sistema de direção composto por 4 rodas <i>Mecanum</i> motrizes.....	37
Figura 37 - Aplicações para o sistema de direção baseado em 4 rodas <i>Mecanum</i> motrizes.....	37
Figura 38 - Esquemas de sistemas de direção compostos por 6 rodas. Em ambos os casos, as rodas esféricas passivas limitam-se a conferir estabilidade à plataforma móvel.....	38
Figura 39 - Esquema de um conversor linear do tipo fonte de tensão. Quando o diodo zener Z1 opera na zona de rutura, estabelece-se uma tensão constante para a carga (dentro de determinados limites). A resistência R1 limita a corrente no diodo e na carga. ....	41
Figura 40 - Esquema de um conversor linear, do tipo fonte de tensão, no qual há a possibilidade de ajustar a tensão na carga através do potenciômetro P1.....	42
Figura 41 - Esquemas típicos de ligação para os reguladores de tensão LM78XX e LM317.....	43

## Índice de figuras

Figura 42 - Esquema de um conversor linear do tipo fonte de corrente. Este conversor estabelece uma corrente constante na carga (dentro de certos limites) cujo valor pode ser ajustado através do potenciômetro P1.....	44
Figura 43 - Esquema do circuito eletrônico, baseado no regulador de tensão LM317, que permite a implementação de um conversor linear do tipo fonte de corrente. ....	44
Figura 44 - Visão geral sobre a capacidade que os semicondutores de potência possuem. ....	45
Figura 45 - Onda modulada por <i>PWM</i> na qual estão assinaladas as respetivas grandezas. ....	46
Figura 46 - Obtenção de uma onda modulada por <i>PWM</i> através da comparação de uma portadora triangular com uma referência. ....	47
Figura 47 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor <i>step-down</i> . ....	47
Figura 48 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor <i>step-down</i> durante os instantes de tempo $T_{ON}$ e $T_{OFF}$ da onda modulada por <i>PWM</i> . ....	48
Figura 49 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor <i>step-down</i> . ....	49
Figura 50 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do <i>Pololu D15V35F5S3</i> para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor <i>step-down</i> . ....	50
Figura 51 - Perdas percentuais, em termos médios, em cada componente de um conversor <i>step-down</i> . ....	50
Figura 52 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor <i>step-up</i> . ....	51
Figura 53 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor <i>step-up</i> durante os instantes de tempo $T_{ON}$ e $T_{OFF}$ da onda modulada por <i>PWM</i> . ....	51
Figura 54 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor <i>step-up</i> . ....	53
Figura 55 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do <i>Pololu U1V10F5</i> para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor <i>step-up</i> . ....	53
Figura 56 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor <i>step-up-down</i> . ....	54
Figura 57 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor <i>step-up-down</i> durante os instantes de tempo $T_{ON}$ e $T_{OFF}$ da onda modulada por <i>PWM</i> . ....	54
Figura 58 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor <i>step-up-down</i> . ....	56
Figura 59 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do <i>Pololu S7V7F5</i> para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor <i>step-up-down</i> . ....	56
Figura 60 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor <i>SEPIC</i> . ....	58
Figura 61 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor <i>SEPIC</i> durante os instantes de tempo $T_{ON}$ e $T_{OFF}$ da onda modulada por <i>PWM</i> . ....	58
Figura 62 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor <i>SEPIC</i> . ....	60
Figura 63 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do <i>Pololu S10V2F12</i> para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor <i>SEPIC</i> . ....	61
Figura 64 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor ponte H completa. ....	62
Figura 65 - Formas de onda na ponte H completa quando esta alimenta uma carga resistiva. Considera-se uma fonte com tensão nominal de 10 V, semicondutores a comutarem a 1 kHz e <i>duty-cycle</i> de 10% e 75%. ....	63
Figura 66 - Formas de onda na ponte H completa quando esta alimenta uma carga resistiva. Considera-se uma fonte com tensão nominal de 10 V, semicondutores a comutarem a 500 Hz e <i>duty-cycle</i> de 10% e 75%. ....	64
Figura 67 - Conversor <i>Pololu High-Power Motor Driver 18v25</i> e variadores de velocidade desenvolvidos pela empresa WEG. ....	65
Figura 68 - Arquitetura do sistema de carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores. ....	67
Figura 69 - Bateria de ácido-chumbo e módulo de ultracondensadores fixados à plataforma móvel. ....	68
Figura 70 - Arquitetura do sistema responsável pela gestão otimizada da energia. ....	69
Figura 71 - Arquitetura do sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção. ....	70
Figura 72 - Modelo e características elétricas da rede e do transformador abaixador no simulador <i>PSIM</i> . ....	71

## Índice de figuras

Figura 73 - Transformador abaixador e ligação para a rede elétrica já instalados na plataforma móvel omnidirecional.....	72
Figura 74 - Modelo da ponte retificadora e filtro CC no simulador <i>PSIM</i> .....	72
Figura 75 - Modelo do conversor <i>step-down</i> do tipo fonte de corrente no simulador <i>PSIM</i> .....	73
Figura 76 - Sensor de corrente <i>Pololu ACS711EX</i> . Este sensor foi colocado na saída do conversor <i>step-down</i> por forma a fechar a malha do controlador PI. ....	74
Figura 77 - Modelo do controlador PI implementado no simulador <i>PSIM</i> .....	75
Figura 78 - Fluxograma correspondente ao algoritmo de carregamento do módulo de ultracondensadores. “E” é uma variável de controlo, “V <sub>cc</sub> ” é a tensão no filtro CC, “V <sub>u</sub> ” é a tensão no módulo de ultracondensadores, “I <sub>Ref</sub> ” é a corrente de referência do controlador PI e “I <sub>u</sub> ” é a corrente que é efetivamente injetada no módulo de ultracondensadores. ....	76
Figura 79 - Fluxograma correspondente ao algoritmo de carregamento da bateria de ácido-chumbo. “E” é uma variável de controlo, “V <sub>cc</sub> ” é a tensão no filtro CC, “V <sub>b</sub> ” é a tensão na bateria e “I <sub>b</sub> ” é a corrente que é efetivamente injetada na bateria. ....	77
Figura 80 - Modelo do conversor <i>SEPIC</i> no simulador <i>PSIM</i> .....	78
Figura 81 - Modelo do conversor <i>step-up</i> no simulador <i>PSIM</i> .....	79
Figura 82 - Arquitetura do sistema energeticamente otimizado evidenciando os sinais de comando que controlam os 2 conversores. ....	80
Figura 83 - Fluxograma correspondente ao algoritmo responsável pela gestão otimizada da energia. “V <sub>s</sub> ” é a tensão medida na saída dos conversores, “DC <sub>1</sub> ” é o valor do <i>duty-cycle</i> aplicado ao conversor <i>SEPIC</i> , “DC <sub>2</sub> ” é o valor do <i>duty-cycle</i> aplicado ao conversor <i>step-up</i> , “h” é o período de amostragem, “K <sub>p</sub> ” e “K <sub>i</sub> ” são os ganhos proporcional e integral respetivamente.....	81
Figura 84 - Modelo de um dos conversores ponte H completa no simulador <i>PSIM</i> . Para os restantes motores, o modelo é exatamente igual a este.....	82
Figura 85 - Sensor de corrente <i>Pololu ACS714</i> utilizado para detetar sobreintensidades nos conversores ponte H completa. ....	83
Figura 86 - Arquitetura do bloco responsável pela regulação da tensão. O regulador linear foi colocado em série com o regulador comutado por forma a maximizar o seu rendimento. ....	84
Figura 87 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão, da corrente e da potência no módulo de ultracondensadores (até aos 200 segundos) e na bateria (a partir dos 200 segundos) durante o processo de carregamento dos mesmos. ....	85
Figura 88 - Forma de onda (obtida no simulador <i>PSIM</i> ) da corrente no módulo de ultracondensadores quando o seu valor médio é de aproximadamente 14 A. Como seria espectável, a forma de onda é triangular devido à comutação do <i>MOSFET</i> no conversor <i>step-down</i> do tipo fonte de corrente.....	86
Figura 89 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão e da corrente na rede elétrica quando o sistema está a efetuar um carregamento à potência máxima (80 W). ....	86
Figura 90 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão e da corrente no filtro CC quando o sistema está a efetuar um carregamento à potência máxima. ....	87
Figura 91 - O <i>Pololu USB AVR Programmer</i> foi usado para transferir o programa desenvolvido para o microcontrolador. ....	88
Figura 92 - Diferentes valores de corrente de carregamento no módulo de ultracondensadores. ....	88
Figura 93 - Placa de circuito impresso que implementa o sistema de carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores. ....	89
Figura 94 - À esquerda apresenta-se a forma de onda da tensão na <i>drain (V<sub>ds</sub>)</i> do <i>MOSFET</i> do conversor <i>step-down</i> (250 us/div e 10 V/div). À direita apresenta-se a forma de onda da tensão no filtro CC (5 ms/div e 10 V/div).....	89

## Índice de figuras

Figura 95 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão e da corrente na saída do sistema considerando uma potência de 12,5 W – corresponde a 12,5 V e 1 A. ....	90
Figura 96 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão e da corrente no módulo de ultracondensadores considerando uma potência na saída de 12,5 W – corresponde a 12,5 V e 1 A. ....	91
Figura 97 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão e da corrente na bateria de ácido-chumbo considerando uma potência na saída de 12,5 W – corresponde a 12,5 V e 1 A. ....	91
Figura 98 - Valor de tensão medido na saída do sistema responsável pela gestão otimizada da energia. ....	92
Figura 99 - Placa de circuito impresso que implementa todo o sistema responsável pela gestão otimizada da energia.....	93
Figura 100 - À esquerda apresenta-se a forma de onda da tensão na saída do sistema (25 us/div e 10 V/div). Ao centro apresenta-se a forma de onda do sinal de comando aplicado à <i>gate</i> do <i>MOSFET</i> do conversor <i>SEPIC</i> (25 us/div e 2 V/div). À direita apresenta-se a forma de onda da tensão na <i>drain</i> desse semiconductor (25 us/div e 10 V/div).....	93
Figura 101 - Formas de onda (obtidas no simulador <i>PSIM</i> ) da tensão e da corrente num dos motores da plataforma móvel quando o <i>duty-cycle</i> aplicado a ele é de 75%. ....	94
Figura 102 - Forma de onda (obtida no simulador <i>PSIM</i> ) da corrente na fonte de tensão regulada nos 12,5 V quando esta alimenta um dos motores da plataforma móvel omnidirecional com um <i>duty-cycle</i> de 75%. ....	95
Figura 103 - Placa de circuito impresso que implementa todo o sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção. ....	95
Figura 104 - À esquerda apresenta-se a forma de onda, obtida através de um osciloscópio, da tensão num dos motores, num dado intervalo de tempo (5 us/div e 5 V/div). À direita apresenta-se uma medição da tensão (em volts) na saída do regulador para 5 V. ....	96
Figura 105 - Aspeto inicial da plataforma móvel omnidirecional que foi utilizada. ....	100
Figura 106 - Placa de circuito impresso com circuitos de controlo e <i>interface</i> cujo microcontrolador é o Atmel ATmega 328P e sensor de distância baseado em ultrassons. Ambos vinham incluídos com a plataforma móvel omnidirecional.....	102
Figura 107 - Principais componentes do sistema de alimentação já fixados à plataforma móvel. Os restantes componentes foram colocados num andar superior, suportado pelas 4 barras cinzentas verticais.....	102
Figura 108 - Componentes instalados no fundo da plataforma móvel omnidirecional. ....	103
Figura 109 - Versão final da plataforma móvel omnidirecional, com todo o <i>hardware</i> devidamente fixado. A parte do sistema de controlo da locomoção não incorporada na plataforma móvel é constituída pela aplicação gráfica em computador e pelo sistema de telecomando inercial. ....	104
Figura 110 - Formas de onda da tensão nos canais do <i>encoder</i> quando o seu eixo roda no sentido dos ponteiros do relógio. ....	105
Figura 111 - Formas de onda da tensão nos canais do <i>encoder</i> quando o seu eixo roda no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio. ....	105
Figura 112 - Gráfico que relaciona a tensão na saída do sensor Sharp GP2Y0A21YK0F com a distância efetivamente medida por ele a um objeto.....	106
Figura 113 - Relação entre a humidade relativa e a tensão na saída do sensor HIH-4030. ....	107
Figura 114 - Ligação dos diversos sensores à placa de circuito impresso.....	107
Figura 115 - Fluxograma correspondente ao algoritmo do controlador PID digital aplicado ao motor 1 da plataforma móvel omnidirecional. “Deslocamento_M1” é o deslocamento medido pelo <i>encoder</i> correspondente ao motor 1, “Vel_Ref_M1” é a velocidade desejada para o motor 1, “Kp” é o ganho proporcional, “Ki” é o ganho integral, “Kd” é o ganho derivativo e h é o período de amostragem do controlador. ....	109
Figura 116 - Esquema que relaciona a velocidade de referência com o controlador PID digital e com a atuação nos motores. ....	110

## Índice de figuras

---

Figura 117 - Papel das equações da Cinemática no sistema de controlo da locomoção. ....	110
Figura 118 - Sistema de direção implementado na plataforma móvel omnidirecional. ....	110
Figura 119 - Referencial marcado na plataforma móvel omnidirecional com os 3 eixos devidamente representados. ....	111
Figura 120 - Topologias de rede que é possível formar com módulos <i>XBee Pro Series 2</i> .....	112
Figura 121 - À esquerda apresenta-se a placa de circuito impresso utilizada para programar os módulos. Ao centro e à direita apresentam-se as configurações que foram definidas para o coordenador e para o <i>router</i> respetivamente.....	113
Figura 122 - Primeira janela da aplicação gráfica desenvolvida para a plataforma Windows. ....	114
Figura 123 - Avisos e erros que a primeira janela da aplicação gráfica pode reportar. ....	115
Figura 124 - Primeiro separador da segunda janela – Estado do sistema.....	116
Figura 125 - Segundo separador da segunda janela – Monitorização das rodas.....	117
Figura 126 - Terceiro separador da segunda janela – Seleção de movimentos.....	118
Figura 127 - Erros que a aplicação gráfica pode reportar se os valores de velocidade especificados não forem exequíveis. ....	119
Figura 128 - Quarto separador da segunda janela – Modos Automáticos. ....	119
Figura 129 - Erros que a aplicação gráfica pode reportar se os parâmetros dos 2 modos automáticos não forem corretamente definidos. ....	120
Figura 130 - Diagrama que evidencia as entradas e a saída do controlador proporcional digital no qual o "Modo Seguidor" se baseia.....	121
Figura 131 - Desempenho do controlador PID digital, em regime permanente, quando as 3 componentes da velocidade de referência são 10 cm/s, 10 cm/s e 0,1 rad/s nos eixos das abcissas, das ordenadas e das cotas respetivamente.....	123
Figura 132 - Desempenho do controlador PID digital, em regime permanente, quando é ordenada a velocidade máxima no eixo das ordenadas (referência de 62,5 cm/s). ....	124
Figura 133 - Desempenho do controlador PID digital em regime transitório. Aplicou-se um pulso na referência correspondente a uma velocidade de 40 cm/s durante cerca de 2 segundos (eixo das ordenadas).....	125
Figura 134 - Desempenho do controlador PID em regime transitório. Aplicou-se um degrau na referência de 0 cm/s para 25 cm/s seguido de outro de 25 cm/s para 44 cm/s, ambos no eixo das ordenadas. ....	126
Figura 135 - Desempenho do controlador PID digital quando o "Modo Seguidor" se encontra ativo.....	127
Figura 136 - Aspeto da <i>IMU Pololu MinIMU-9 v2</i> .....	128
Figura 137 - Representação dos 3 eixos de rotação existentes num <i>AHRS</i> : <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i> . Note-se que a origem do referencial coincide com o centro de massa do objeto. ....	129
Figura 138 - Os aviões são um exemplo no qual um <i>AHRS</i> pode ser aplicado.....	129
Figura 139 - <i>Hardware</i> do sistema de telecomando com os principais componentes assinalados.....	130
Figura 140 - Estrutura e sequência das camadas nas quais o <i>software</i> do telecomando se baseia. ....	131
Figura 141 - Referencial usado pelo <i>AHRS</i> no sistema de telecomando (as setas indicam o sentido positivo de cada componente).....	132
Figura 142 - Valores de <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i> numa situação em que o sistema de telecomando foi colocado num plano horizontal.....	135
Figura 143 - Valores de <i>roll</i> , <i>pitch</i> e <i>yaw</i> para duas inclinações: uma para a direita (janela do lado esquerdo) e outra para a frente (janela do lado direito). Ambas foram de 15 graus e foram marcadas em relação a um plano horizontal. ....	135
Figura 144 - Medição da corrente elétrica absorvida pelo sistema de telecomando quando este se encontrava em funcionamento. ....	136

# Índice de tabelas

Tabela 1 - Tempos de carregamento de uma bateria de íões de lítio-polímero e respetivas variações de temperatura para diferentes taxas de carregamento.....	4
Tabela 2 - Principais características do chassi da plataforma móvel omnidirecional.....	100
Tabela 3 - Principais características de cada uma das 4 rodas da plataforma móvel omnidirecional.....	100
Tabela 4 - Principais características de cada motor da plataforma móvel omnidirecional. ....	101
Tabela 5 - Principais características dos <i>encoders</i> presentes na plataforma móvel omnidirecional. ....	101
Tabela 6 - Estrutura das tramas usadas na comunicação <i>wireless</i> .....	113



# Lista de siglas e acrónimos

<b>Abreviatura</b>	<b>Designação completa</b>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
AHRS	<i>Attitude and Heading Reference System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CPR	<i>Counts Per Revolution</i>
DCM	<i>Direction Cosine Matrix</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistor</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICR	<i>Instantaneous Center of Rotation</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
MIPS	<i>Millions of Instructions Per Second</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PSIM	<i>Power Simulator</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
RPM	Rotações por minuto
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
TWI	<i>Two Wire Interface</i>
UART	<i>Universal ASynchronous Receiver/Transmitter</i>



# 1. Introdução

Neste capítulo introdutório apresentam-se, em primeiro lugar, as definições de plataforma móvel omnidirecional e de conversor eletrónico de potência. Seguidamente, faz-se o enquadramento do trabalho a desenvolver e apresentam-se a motivação e os objetivos do mesmo. Por último, apresenta-se a proposta do trabalho a desenvolver e evidencia-se a organização do presente documento.

## 1.1. Plataforma móvel omnidirecional

Uma plataforma móvel omnidirecional é um veículo móvel que, num espaço bidimensional, possibilita a movimentação com 3 graus de liberdade. Significa isto que num plano  $xOy$  há a possibilidade de controlar, de forma independente, a translação no eixo  $Ox$ , a translação no eixo  $Oy$  e a rotação em torno do centro de gravidade [1]. No capítulo 2, apresentam-se os diversos sistemas de direção (baseados nas diferentes categorias de rodas) que possibilitam a movimentação com 3 graus de liberdade. A Figura 1 apresenta o diagrama de uma plataforma móvel omnidirecional num plano  $xOy$ .

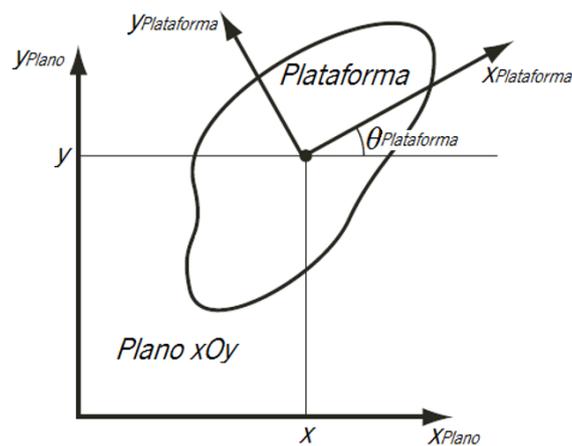


Figura 1 - Diagrama de uma plataforma móvel omnidirecional num plano bidimensional (adaptado de [1]).

Num plano  $xOy$ , as plataformas com sistema de direção tradicional (plataformas não-omnidirecionais) não permitem a movimentação em mais do que 2 graus de liberdade [1]. No subcapítulo 1.3 apresentam-se as limitações e implicações que resultam da ausência dos 3 graus de liberdade.

### 1.2. Conversor eletrônico de potência

Um conversor eletrônico de potência é um circuito eletrônico que tem por objetivo controlar o fluxo de energia elétrica de uma fonte para uma carga através de sinais de controle externos normalmente gerados por microcontroladores [2] [3]. A Figura 2 apresenta o diagrama de um sistema baseado num conversor eletrônico de potência.

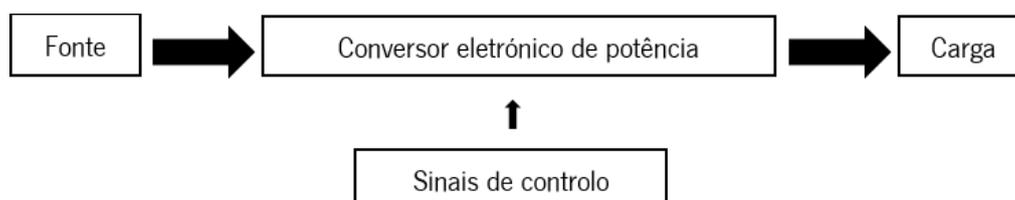


Figura 2 - Diagrama de um sistema baseado num conversor eletrônico de potência.

Um conversor é unidirecional quando a energia flui sempre no mesmo sentido. Se existir a possibilidade de controlar o sentido no qual a energia flui, o conversor é bidirecional. Recorre-se a conversores bidirecionais quando a carga pode absorver ou fornecer energia – os motores elétricos e as baterias são exemplos desse tipo de cargas.

### 1.3. Enquadramento

Em muitas aplicações, o uso de sistemas de direção não-omnidirecionais em plataformas móveis (nomeadamente robôs móveis) constitui uma severa limitação em termos de liberdade de movimentos. Dois exemplos significativos são os *AGVs (Automated Guided Vehicles)* e as cadeiras de rodas elétricas.

Grande parte dos *AGVs* utilizados na indústria possui um sistema de direção com 2 graus de liberdade, o que limita o número de movimentos possíveis. Esta restrição leva a um aumento da complexidade dos algoritmos responsáveis pela geração dinâmica das trajetórias (nomeadamente os que são apresentados em [4]), pode implicar um gasto supérfluo de energia, maiores tempos de resposta e resulta ainda na dificuldade, ou até impossibilidade, de executar determinadas tarefas, em locais em que o espaço disponível para a navegação é reduzido [5].

No dia-a-dia há diversas situações nas quais as cadeiras de rodas elétricas evidenciam uma limitação de movimentos. A maioria desses sistemas não permite a realização movimentos laterais para, por exemplo, percorrer uma montra de uma loja enquanto se observa os produtos lá expostos. Essa limitação tem origem no sistema de direção, que possui somente 2 graus de

liberdade. Em [6] apresenta-se uma cadeira de rodas elétrica cujo propósito é facilitar o transporte de pessoas incapacitadas mas que carece de um sistema de direção omnidirecional. Nesse trabalho recorreu-se ao sistema de direção *Ackermann* [7] que apresenta 2 graus de liberdade.

A Figura 3 evidencia um exemplo da trajetória que um veículo baseado no sistema de direção *Ackermann* tem que descrever por forma a ir do ponto A para o ponto B, respeitando a orientação definida. A figura também mostra que a distância percorrida é mais do que o dobro da distância em linha reta entre os pontos A e B.

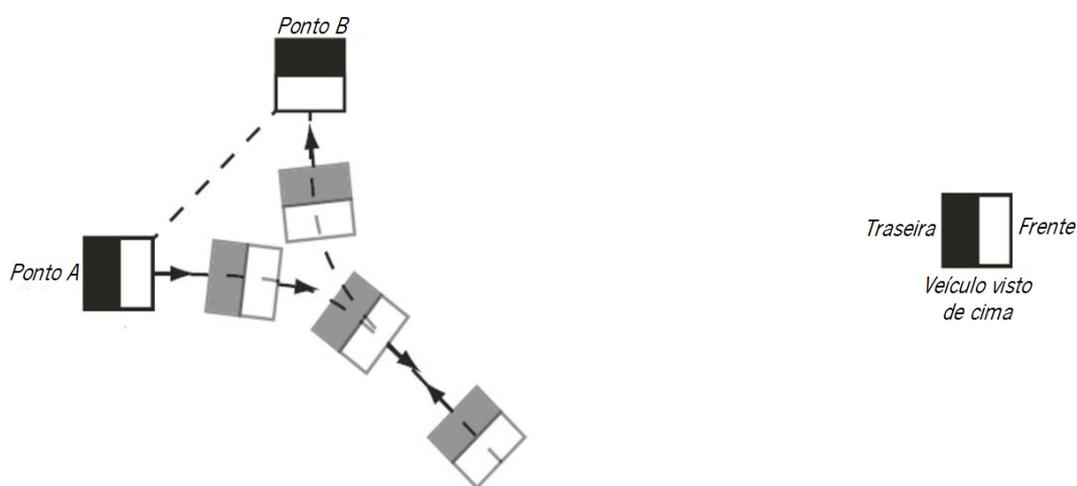


Figura 3 - Trajetória descrita por um veículo baseado no sistema de direção *Ackermann* para ir do ponto A para o ponto B, respeitando a orientação estabelecida (adaptado de [1]).

Para além de todas as limitações que advêm da existência de apenas 2 graus de liberdade no sistema de direção, constata-se que os períodos de carregamento energético são habitualmente um inconveniente importante para plataformas móveis, incluindo os veículos tais como os *AGVs* e as cadeiras de rodas elétricas. Nesses intervalos de tempo os *AGVs* estão imobilizados e, conseqüentemente, não podem transportar cargas – apenas podem executar tarefas que não impliquem locomoção. No segundo caso, durante os períodos de carregamento energético, as cadeiras de rodas elétricas também estão imobilizadas e, por causa disso, indisponíveis para o utilizador se deslocar. Por isso, a redução ao mínimo dos tempos de carregamento energético das plataformas móveis é geralmente de grande importância.

Hoje em dia, a esmagadora maioria dos sistemas elétricos móveis recorre a baterias como fontes de energia. As baterias possuem uma elevada densidade energética (sobretudo as baterias de iões de lítio-polímero [8]). No entanto, atualmente é impossível carregá-las totalmente em menos de meia hora (independentemente da capacidade) sem que se deteriorem

## Introdução

significativamente. A Tabela 1, obtida a partir de [9], evidencia que até as baterias tecnologicamente mais avançadas (íões de lítio-polímero) não podem ser totalmente carregadas em menos de, aproximadamente, meia hora – nesse período há ainda a necessidade de monitorizar a temperatura ambiente e a temperatura da bateria, pois são parâmetros que influenciam substancialmente a estabilidade e durabilidade da mesma. Atualmente, qualquer outra tecnologia de baterias (por exemplo, ácido-chumbo ou níquel-hidreto metálico) apresenta maior tempo de carregamento, o que é um inconveniente. Os resultados apresentados na Tabela 1 são utilizados como referência e fator de comparação no âmbito do sistema de alimentação híbrido desenvolvido e apresentado ao longo da presente dissertação.

Tabela 1 - Tempos de carregamento de uma bateria de íões de lítio-polímero (tensão nominal de 3,7 V e capacidade nominal de 100 Ah) e respetivas variações de temperatura para diferentes taxas de carregamento (adaptado de [9]).

Temperatura ambiente (°C)	Taxa de carregamento	Tempo para atingir 80% da carga máxima (Minutos)	Tempo para atingir o carregamento total (Minutos)	Temperatura da caixa que contém a bateria (°C)
-20	0,5C	96	147	-20 a -7
	1C	48	74	-20 a -12
	2C	25	41	-20 a -1
	3C	Não foi possível carregar a bateria		
	3,2C			
0	0,5C	96	142	0 a 3
	1C	48	76	0 a 7
	2C	24	44	0 a 11
	3C	17	35	0 a 22
	3,2C	16	32	0 a 23
20	0,5C	96	137	20 a 22
	1C	48	78	20 a 22
	2C	24	47	20 a 37
	3C	16	36	20 a 36
	3,2C	15	35	20 a 38

Para além de não poderem ser totalmente carregadas em menos de meia hora (se se forçar um carregamento demasiado rápido, a temperatura aumenta significativamente e, por isso, a bateria degrada-se), as baterias costumam ser o elemento com menor tempo útil de vida num sistema elétrico móvel, constituindo uma das principais causas de manutenção frequente.

### 1.4. Motivação

Uma possível solução para as limitações referidas no subcapítulo 1.3 consiste na integração das seguintes tecnologias: uma plataforma móvel omnidirecional baseada em 4 rodas *Mecanum* [10] que possibilite o controlo com 3 graus de liberdade do sistema de direção, uma bateria e um módulo de ultracondensadores [11].

Um ultracondensador é assim denominado pois tem uma capacidade elétrica (medida em Farads) muito superior à dos condensadores habitualmente utilizados na Eletrónica, permitindo-lhe assim armazenar uma quantidade de energia muito superior. De facto, a quantidade de energia armazenável num condensador depende linearmente da sua capacidade elétrica. Ao contrário do que ocorre nas baterias, um condensador carrega-se energeticamente sem a ocorrência de reações químicas. Devido a isso, um módulo de ultracondensadores pode ser carregado, sem se deteriorar, a um ritmo significativamente mais rápido que uma bateria.

Apesar de já existirem diversas publicações sobre plataformas móveis omnidirecionais baseadas em rodas *Mecanum* (por exemplo, [12]) e publicações sobre a utilização simultânea de baterias e ultracondensadores (por exemplo, [13]), não se encontraram trabalhos que integrassem simultaneamente essas três tecnologias. Além disso, neste trabalho a utilização simultânea de baterias e ultracondensadores tem um propósito diferente daquele que é proposto noutros trabalhos. Neste trabalho a integração visa dotar uma plataforma móvel de uma autonomia razoável, após um período de carregamento muito reduzido, quando os seus elementos armazenadores de energia ficam descarregados e não há tempo suficiente para carregar convenientemente a bateria. Noutros trabalhos, o objetivo da integração visa essencialmente assegurar o fornecimento ou a absorção de picos de potência de valor significativo e de curta duração (por exemplo, na travagem regenerativa em alguns automóveis).

A movimentação omnidirecional baseada em rodas *Mecanum* (existência de 3 graus de liberdade) apresenta as seguintes vantagens relativamente à movimentação não-omnidirecional:

- **Otimização das trajetórias da plataforma móvel.** Minimiza-se a distância que é necessário percorrer para ir de uma posição e orientação para outra posição e orientação, através de movimentos de translação e de rotação em simultâneo. A Figura 4 evidencia a trajetória mais curta que um veículo omnidirecional pode descrever para ir do ponto A para o ponto B, respeitando a orientação definida. A comparação entre a Figura 3 e a Figura 4 evidencia o impacto que a existência de um sistema de direção omnidirecional pode ter na trajetória descrita por um veículo;
- **Possível redução do consumo energético.** O facto de se minimizar a distância percorrida pode traduzir-se uma redução do consumo energético.

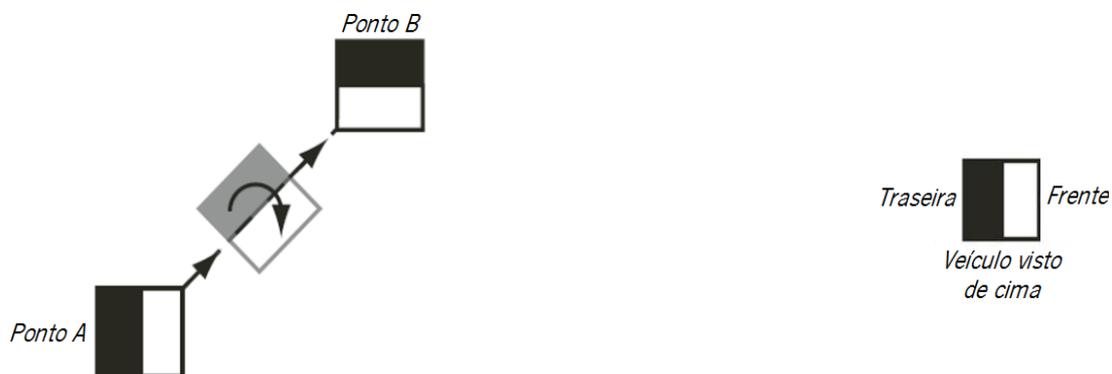


Figura 4 - Trajetória descrita por um veículo omnidirecional para ir do ponto A para o ponto B, respeitando a orientação estabelecida (adaptado de [1]).

Por outro lado, um sistema de alimentação híbrido, composto por uma bateria e um módulo de ultracondensadores, possui as seguintes características:

- **Curtos períodos de carregamento energético do módulo de ultracondensadores.** O módulo de ultracondensadores pode ser carregado muito mais rapidamente que a bateria (sem se deteriorar significativamente) devido ao facto de o processo de carregamento não envolver reações químicas de oxidação-redução;
- **Aumento significativo da autonomia relativamente a um sistema que use exclusivamente ultracondensadores.** A bateria tem uma densidade energética dezenas de vezes superior à densidade energética do módulo de ultracondensadores. Isto permite concluir que, no mesmo volume, é possível armazenar mais energia na bateria do que no módulo de ultracondensadores, o que resulta numa autonomia superior;
- **Gestão otimizada da energia.** O módulo de ultracondensadores suporta muitos mais ciclos de carga e descarga do que a bateria. Por isso, sempre que possível deve-se recorrer

em primeiro lugar à energia armazenada no módulo de ultracondensadores e só posteriormente à energia disponível na bateria. Esta gestão otimizada da energia tem as seguintes implicações:

- **Aumento do tempo útil de vida da bateria.** O facto de se recorrer primeiramente à energia armazenada no módulo de ultracondensadores leva a uma menor utilização da bateria, o que se traduz num aumento do tempo útil de vida da mesma;
- **Redução da frequência de substituição da bateria.** O aumento do tempo útil de vida da bateria leva a uma redução da frequência de substituição da mesma. A longo prazo, este facto resulta numa redução dos custos do sistema no qual a bateria está instalada;
- **O módulo de ultracondensadores pode ser carregado até à tensão nominal e descarregado na totalidade.** Quando o módulo de ultracondensadores é a única fonte de energia numa plataforma móvel, é impossível aproveitar toda a energia armazenada. Isto acontece porque os conversores eletrónicos de potência não têm a capacidade de manter a saída regulada para tensões demasiado baixas na entrada. A utilização simultânea da bateria e do módulo de ultracondensadores possibilita um melhor aproveitamento da capacidade de armazenamento do módulo de ultracondensadores.
- **Aumento significativo da densidade de potência.** O facto do módulo de ultracondensadores apresentar uma impedância interna muito inferior à da bateria, leva a um aumento significativo da potência disponível para o mesmo volume. Esta característica pode ser particularmente relevante para sistemas em que é necessário responder a picos de potência de curta duração e de valor significativo.

Em [13] apresenta-se um sistema de alimentação híbrido aplicado a veículos elétricos que corrobora alguns dos benefícios referidos. Os resultados desse trabalho também permitem concluir que os veículos elétricos têm uma melhoria substancial do desempenho em meios urbanos.

### 1.5. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é o **desenvolvimento de uma plataforma móvel omnidirecional, baseada em 4 rodas *Mecanum*, que possibilite um controlo sobre os 3 graus de liberdade do sistema de direção**. Os outros objetivos desta dissertação são os seguintes:

- **Desenvolvimento de um sistema de alimentação energeticamente otimizado e totalmente incorporado na plataforma móvel omnidirecional.** O sistema de alimentação energeticamente otimizado e totalmente incorporado deve assegurar uma autonomia de algumas dezenas de minutos após um período de carregamento de alguns minutos. Se não existirem restrições temporais para se efetuar o carregamento, a autonomia deve ser de algumas horas. Recorrer-se-á a uma bateria e a um módulo de ultracondensadores, a operarem em simultâneo (sistema híbrido). Este objetivo implica o desenvolvimento de conversores eletrónicos de potência para o controlo do fluxo de energia e de *software* – implementado num microcontrolador.
- **Desenvolvimento de um sistema de telecomando baseado numa *IMU (Inertial Measurement Unit)* para a plataforma móvel omnidirecional.** A *IMU* [14] deverá ser dotada de acelerómetro, giroscópio e bússola. Isto possibilitará um controlo simples, intuitivo e de fácil aprendizagem pelo utilizador final do sistema;
- **Desenvolvimento de uma aplicação gráfica para monitorização e controlo da plataforma móvel.** A aplicação gráfica, que será desenvolvida em linguagem C# [15] para os sistemas operativos Windows, permitirá monitorizar e controlar parâmetros inerentes à plataforma móvel omnidirecional (por exemplo, o consumo energético instantâneo e a definição de trajetórias) através de um computador.
- **Robustez do sistema no que toca à deteção de situações anómalas.** A plataforma móvel omnidirecional deverá imobilizar-se – por forma a salvaguardar a sua integridade – e alertar o utilizador nas seguintes situações anómalas:
  - Impossibilidade de se estabelecer uma ligação *wireless* entre a plataforma móvel e o telecomando ou a aplicação gráfica;
  - Falha ou perda de dados na ligação *wireless* (devido ao alcance limitado);
  - Proximidade excessiva da plataforma móvel a um obstáculo (risco de colisão);

- Excessos de corrente ou sobretensões em quaisquer partes do sistema elétrico híbrido de alimentação.

### 1.6. Proposta do trabalho a desenvolver

Propõe-se o desenvolvimento de uma plataforma móvel omnidirecional energeticamente otimizada, baseada em 4 rodas *Mecanum*, cujas monitorização e definição de trajetórias possam ser feitas remotamente através de uma ligação *wireless*. A ligação *wireless* será estabelecida com recurso a módulos *XBee Pro Series 2*, os quais implementam uma rede baseada no protocolo *IEEE 802.15.4* [16].

O diagrama da Figura 5 apresenta a arquitetura do sistema que se pretende desenvolver, explicitando as duas possibilidades – representadas através de (a) e (b) – que um utilizador tem para monitorizar e comandar a plataforma móvel omnidirecional.

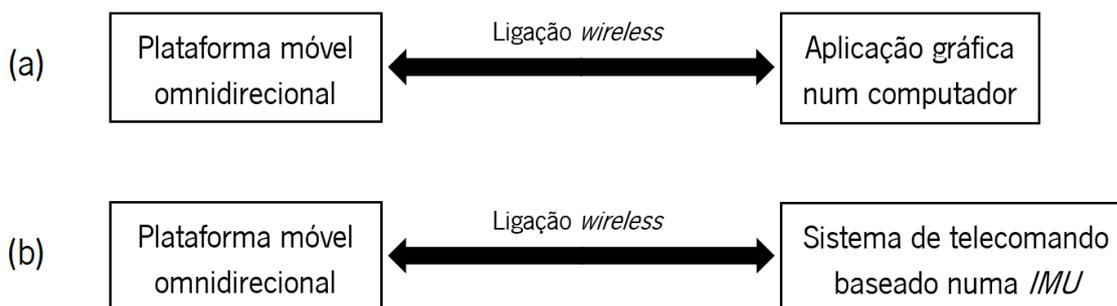


Figura 5 - Perspetiva geral da arquitetura do sistema que se pretende desenvolver.

#### 1.6.1. O sistema a desenvolver

O sistema a desenvolver é composto por uma plataforma móvel omnidirecional cujo sistema de direção é baseado em 4 rodas *Mecanum*, uma aplicação gráfica num computador e um sistema de telecomando baseado numa *IMU*. A Figura 6 apresenta os principais blocos do sistema e o respetivo enquadramento deles.

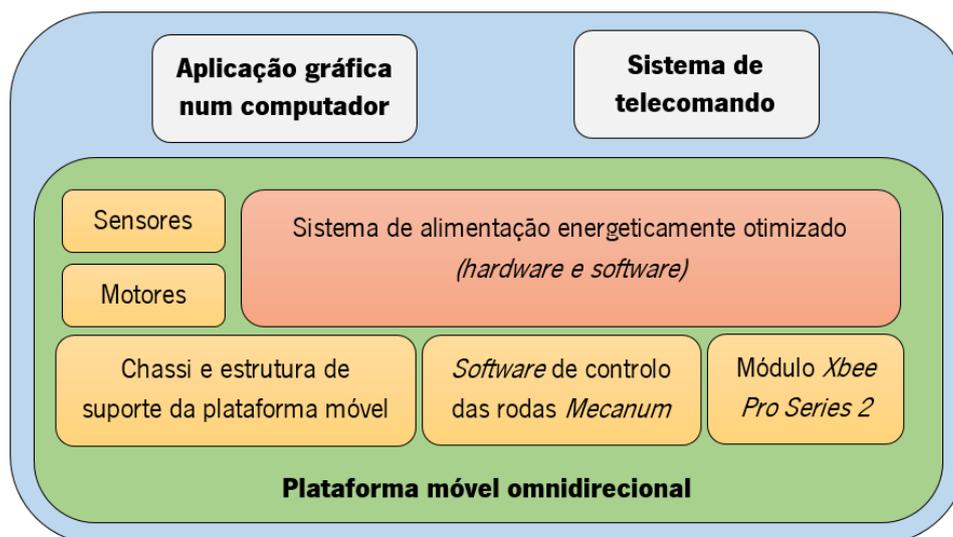


Figura 6 - Principais blocos do sistema a desenvolver.

O sistema apresentado na Figura 6 pode ser decomposto em 2 subsistemas bem diferenciados:

- Sistema de controlo da locomoção;
- Sistema de alimentação energeticamente otimizado.

**O sistema de controlo da locomoção** é composto pela aplicação gráfica num computador, pelo sistema de telecomando e por parte da plataforma móvel omnidirecional. Todos os blocos da Figura 6 pertencem ao sistema de controlo da locomoção exceto o bloco denominado “Sistema de alimentação energeticamente otimizado (*hardware e software*)”. Considera-se “locomoção” o ato de se mover e “controlo da locomoção” tudo aquilo que a locomoção requer exceto a energia (a qual é proveniente do sistema de alimentação energeticamente otimizado). O sistema de controlo da locomoção tem por objetivo executar as ações correspondentes aos comandos gerados pela aplicação gráfica ou pelo sistema de telecomando. Consoante o comando recebido, o sistema deve calcular e impor a velocidade adequada a cada uma das 4 rodas *Mecanum* por forma a realizar o movimento desejado. Para que tal seja possível, propõe-se a implementação de um controlador PID digital em que a realimentação do mesmo é feita através de um *encoder* acoplado ao eixo de cada roda. Para além disto, o sistema deve utilizar sensores que meçam continuamente a distância a obstáculos por forma a evitar colisões. Por fim, propõe-se fazer a medição da temperatura e da humidade relativa do ambiente. A medição destes 2 parâmetros ambientais será incluída no trabalho pois existem muitas aplicações práticas nas quais

tal medição é muito relevante. Deste modo, aumentar-se-á a versatilidade da plataforma móvel omnidirecional.

**O sistema de alimentação energeticamente otimizado** está representado na Figura 6 através do bloco denominado “Sistema de alimentação energeticamente otimizado (*hardware e software*)”. O seu principal objetivo é alimentar adequadamente a parte do sistema de controlo da locomoção que se encontra incorporada na plataforma móvel omnidirecional. A energia provém de uma bateria de ácido-chumbo ou de um módulo de ultracondensadores previamente carregados. Para que isso seja possível, primeiramente, este sistema de alimentação deve ser capaz de extrair energia da rede elétrica e carregar totalmente a bateria ao seu ritmo natural ou então o módulo de ultracondensadores num período substancialmente reduzido (alguns minutos). Posteriormente, o sistema deve fornecer a energia elétrica que a plataforma móvel requer para realizar os movimentos desejados. Deve-se utilizar sempre, em primeiro lugar, a energia disponível no módulo de ultracondensadores e só posteriormente a energia disponível na bateria. Uma forma de se implementar esta gestão da energia consiste na utilização dos seguintes conversores eletrónicos de potência: *step-down*, *step-up*, *SEPIC* e ponte H completa [2].

### 1.6.2. Aplicação gráfica num computador

Propõe-se o desenvolvimento de uma aplicação gráfica num computador, implementada em linguagem C#, que comunique com a plataforma móvel omnidirecional através da ligação *wireless* anteriormente referida. Esta aplicação gráfica, que faz parte do sistema de controlo da locomoção, deve permitir monitorizar parâmetros inerentes à plataforma móvel omnidirecional (por exemplo, o consumo energético instantâneo e a definição de trajetórias) e comandá-la através de um computador.

### 1.6.3. Sistema de telecomando baseado numa *IMU*

Propõe-se o desenvolvimento de um sistema de telecomando que, recorrendo à utilização de uma *IMU* com 9 graus de liberdade (composta por um acelerómetro, um giroscópio e uma bússola), possibilite o controlo remoto da locomoção da plataforma móvel omnidirecional. Consoante a orientação de cada eixo da *IMU*, determina-se o movimento a realizar. Pretende-se

obter um controlo simples, intuitivo e de fácil aprendizagem pelo utilizador final do sistema. O sistema de telecomando é parte integrante do sistema de controlo da locomoção.

### **1.7. Organização da dissertação**

Este documento está dividido em 6 capítulos. Neste capítulo introdutório apresentam-se os conceitos fundamentais, o enquadramento do tema da dissertação e a respetiva motivação. Além disso, elencam-se os objetivos que se pretende atingir e apresenta-se a proposta do trabalho a desenvolver.

No capítulo 2 apresentam-se as principais categorias de rodas e os principais sistemas de direção com rodas aplicáveis a plataformas móveis. Também se descrevem os modelos matemáticos que regem a Cinemática desses sistemas e elencam-se as principais vantagens e inconvenientes de cada categoria de rodas.

No capítulo 3 apresenta-se um estudo dos principais conversores eletrónicos de potência que possibilitam o controlo do fluxo de energia num sistema eletrónico.

No capítulo 4 apresenta-se o trabalho realizado no âmbito do sistema de alimentação energeticamente otimizado. Em primeiro lugar, apresentam-se a arquitetura, as especificações e as vantagens do sistema de alimentação. Seguidamente, apresentam-se o projeto e as simulações computacionais do mesmo. Por fim, evidenciam-se os resultados que advieram quer dos modelos de simulação, quer da implementação prática.

No capítulo 5 apresenta-se o trabalho realizado no âmbito do sistema de controlo da locomoção. É neste capítulo que se apresentam as características, vantagens, implementação prática e resultados experimentais da plataforma móvel omnidirecional, da aplicação gráfica num computador e do sistema de telecomando. O capítulo referente ao sistema de alimentação precede o capítulo 5 porque, para que o sistema de controlo da locomoção funcione convenientemente, é necessário que haja uma implementação prévia do sistema de alimentação.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões gerais do trabalho realizado e algumas sugestões de trabalho futuro.

# 2. Sistemas de direção com rodas

Neste capítulo apresentam-se as principais categorias de rodas e os principais sistemas de direção com rodas aplicáveis a plataformas móveis. Também se descrevem os modelos matemáticos que regem a Cinemática desses sistemas e elencam-se as principais vantagens e inconvenientes de cada categoria de rodas.

## 2.1. Principais categorias de rodas

Na grande maioria das plataformas móveis, a locomoção é feita com recurso a sistemas de direção com rodas. Para se apresentarem os principais sistemas de direção com rodas é necessário, em primeiro lugar, compreender as principais categorias de rodas. A categoria de rodas que é usada em qualquer plataforma móvel é um fator extremamente relevante pois tem implicações diretas na Cinemática, tração, manobrabilidade e controlo da mesma. As principais categorias de rodas são as seguintes: fixas *standard*, *Castor*, *Swedish* e esféricas [17]. Na análise a seguir apresentada (para cada categoria de rodas) fizeram-se as seguintes considerações:

- As rodas da plataforma móvel encontram-se sempre em contacto com o solo;
- Durante a locomoção da plataforma móvel não ocorre deslizamento;
- As rodas mantêm sempre a mesma forma, isto é, são indeformáveis.

### 2.1.1. Rodas fixas *standard*

Esta é a categoria de rodas mais simples e comum. Esta categoria caracteriza-se por possibilitar apenas a rotação da roda em torno do seu eixo transversal (eixo paralelo ao plano do solo que atravessa o centro de massa da roda). Por exemplo, não é possível efetuar uma rotação em torno do eixo vertical que atravessa o centro de massa da roda e o ponto de contacto com o solo. Esta característica, juntamente com as considerações anteriormente estabelecidas, permite concluir que esta categoria de rodas apresenta somente 1 grau de liberdade.

Caso estas rodas possuam tração, também se designam motrizes ou ativas. Se as rodas forem utilizadas somente para conferir estabilidade às plataformas móveis às quais estão acopladas, denominam-se passivas.

A Figura 7 evidencia 2 exemplos de rodas fixas *standard*. A roda que se encontra em (a) é passiva e é frequentemente encontrada em robôs móveis. A roda em (b) é motriz (ou ativa) e encontra-se, por exemplo, na parte traseira dos motociclos.

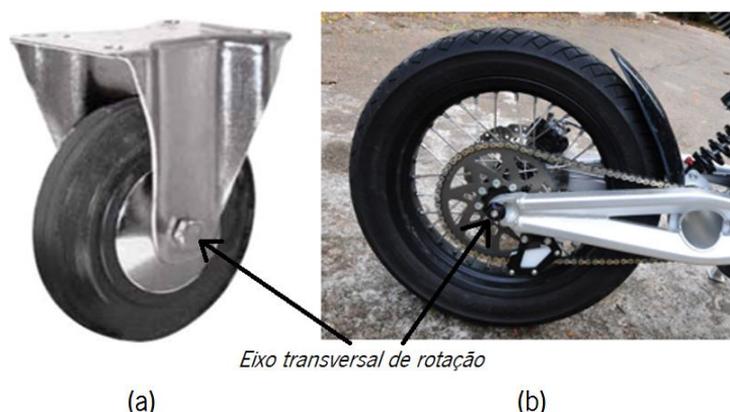


Figura 7 - Exemplos de rodas fixas *standard*. A roda em (a) é passiva e é muito comum em robôs móveis. Em (b) evidencia-se uma roda motriz utilizada em motociclos (adaptado de [18] e [19] respetivamente).

Na Figura 8 apresenta-se o diagrama que evidencia a existência de apenas 1 grau de liberdade. Isto deve-se ao facto de o ângulo  $\beta$  – ângulo formado pela interseção da reta coincidente com o eixo transversal de rotação com a reta que une o centro do chassi do robô ao centro de rotação da roda – ser constante e invariante no tempo. O vetor que representa a força exercida pela roda tem sempre sentido igual ou oposto ao vetor velocidade linear da mesma, mas ambos têm sempre a mesma direção [17].

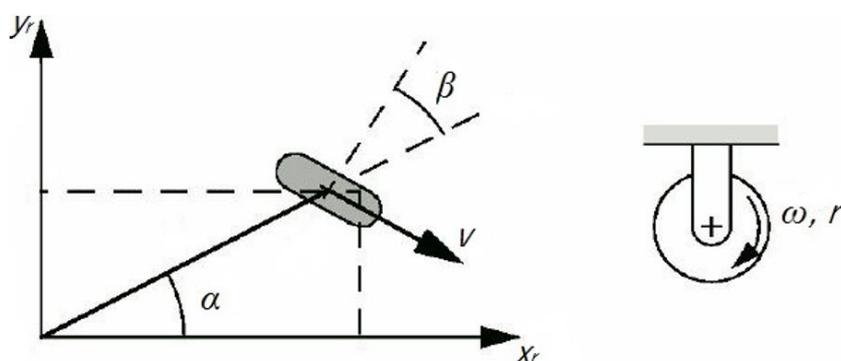


Figura 8 - Diagrama de uma roda fixa *standard* acoplada ao chassi de um robô móvel (adaptado de [17]).

Considerando uma roda fixa *standard* com velocidade angular  $\omega$  e raio  $r$ , a velocidade de translação  $v$  é dada por:

$$v = w \cdot r \quad (1)$$

As principais vantagens desta categoria de rodas são a simplicidade do sistema mecânico (sobretudo se as rodas forem passivas), a capacidade para transportar cargas pesadas, a robustez às irregularidades do solo e o facto de a geometria da roda possibilitar um contacto permanente com o solo, o que minimiza as trepidações. Em relação aos inconvenientes, é de salientar a complexidade do sistema mecânico quando as rodas são motrizes e a limitação de movimentos que advém da existência de apenas 1 grau de liberdade [1] [17].

### 2.1.2. Rodas *Castor*

Esta categoria de rodas, conhecida popularmente por rodízio, apresenta muitas semelhanças com a anterior. A grande diferença entre elas consiste no facto de esta possibilitar adicionalmente a rotação sobre um eixo vertical que é perpendicular ao plano do solo. Assim, é possível concluir que as rodas *Castor* apresentam 2 graus de liberdade. Tal como as rodas fixas *standard*, estas também podem ser motrizes ou passivas. As rodas *Castor* passivas nunca têm o eixo vertical de rotação a atravessar simultaneamente o centro de massa da roda e o ponto de contacto com o solo – se tal acontecesse, na perspetiva da Cinemática, a roda passaria a ser vista como uma roda fixa *standard* [17].

Na Figura 9 apresenta-se do lado esquerdo uma roda *Castor* passiva, ao centro um carrinho de compras típico dos supermercados (trata-se de um exemplo prático no qual esta categoria de rodas é aplicada) e à direita uma roda *Castor* motriz com atuadores para o eixo vertical para o eixo transversal (ambos são de rotação).



Figura 9 - À esquerda apresenta-se uma roda *Castor* passiva (adaptado de [20]), ao centro uma aplicação para esta categoria de rodas: o carrinho de compras do supermercado [21] e à direita uma roda *Castor* motriz com 2 atuadores [1] – um por cada grau de liberdade.

Na Figura 10 apresenta-se o diagrama que evidencia a existência dos 2 graus de liberdade: um devido à rotação em torno do eixo vertical (perpendicular ao plano do solo) e outro devido à rotação em torno do eixo transversal (paralelo ao plano do solo). Nesta categoria de rodas o ângulo  $\beta$  – ângulo formado pela interseção da reta coincidente com o eixo transversal com a reta que une o centro do chassi do robô ao centro de rotação da roda – é variável no tempo e pode ser descrito por uma função  $\beta(t)$ . O comportamento da função  $\beta(t)$  pode ser imposto naturalmente pela dinâmica de translação e rotação do robô móvel ou pode, em alternativa, ser definido por um atuador – normalmente um servomotor – por forma a realizar movimentos específicos. Por exemplo, é possível construir uma plataforma móvel omnidirecional estável recorrendo a 4 rodas *Castor* [1].

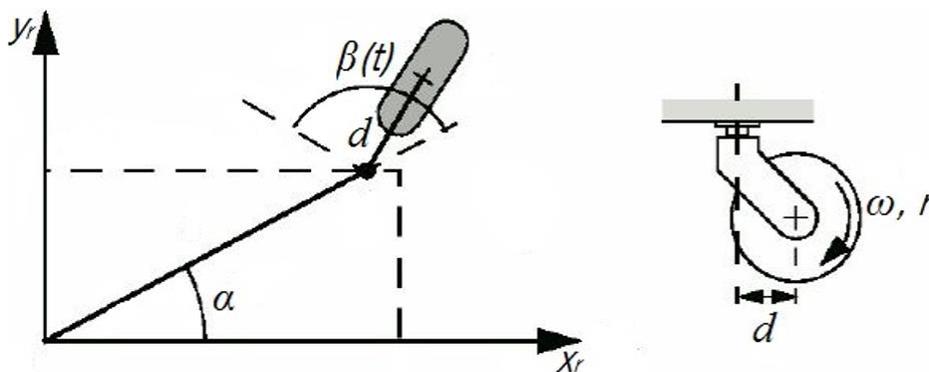


Figura 10 - Diagrama de uma roda *Castor* acoplada ao chassi de um robô móvel (adaptado de [17]).

A equação (1) também é válida para esta categoria de rodas. Contrariamente ao que se passa nas rodas fixas *standard*, durante a locomoção, o vetor velocidade linear da roda não tem que ter necessariamente a mesma direção que o vetor velocidade linear do chassi do robô móvel. Isto deve-se ao facto de a distância  $d$  (representada na Figura 10) não ser nula.

As principais vantagens das rodas *Castor* são o facto de a geometria das mesmas possibilitar um contacto permanente com o solo durante a locomoção (isto leva a uma minimização da trepidação), a capacidade para transportar cargas pesadas e a robustez às irregularidades do solo. As principais desvantagens são a complexidade do sistema mecânico (sobretudo se existirem atuadores para cada um dos graus de liberdade) e o elevado atrito com o solo quando há uma rotação segundo o eixo vertical, o que pode levar a gastos energéticos significativos durante esse procedimento [1] [17].

### 2.1.3. Rodas *Swedish*

Do ponto de vista da geometria, as rodas *Swedish* são rodas fixas *standard* com um conjunto de roletes móveis acoplados na superfície circular exterior [17]. Consoante a disposição desses roletes, é possível dividir as rodas *Swedish* em duas subcategorias: rodas omnidirecionais e rodas *Mecanum*. Apesar de ambas possuírem características mecânicas bem distintas, elas têm em comum o facto de ser possível aplicar os mesmos princípios cinemáticos.

#### 2.1.3.1. Rodas omnidirecionais

As rodas *Swedish* cujo eixo transversal de rotação é perpendicular ao eixo de rotação dos roletes, designam-se por rodas omnidirecionais ou por rodas *Swedish* 90°. A primeira roda omnidirecional foi desenvolvida e patenteada por Joseph Grabowiecki em 1919 nos Estados Unidos da América [22].

As rodas omnidirecionais podem ser simples, duplas ou triplas consoante possuam uma, duas ou 3 fileiras de roletes respetivamente (sempre a 90° em relação ao eixo transversal). Para o caso de existirem várias fileiras, há a necessidade de desfasar as que são adjacentes. A utilização de rodas omnidirecionais com mais do que uma fileira, tem por objetivo garantir uma maior área de contacto entre os roletes e o solo durante a locomoção, o que se traduz numa redução da trepidação e num aumento da força de tração. Caso a roda possua apenas uma fileira, é impossível garantir um contacto permanente dos roletes com o solo durante a locomoção [23]. A Figura 11 evidencia 2 exemplos de rodas omnidirecionais.

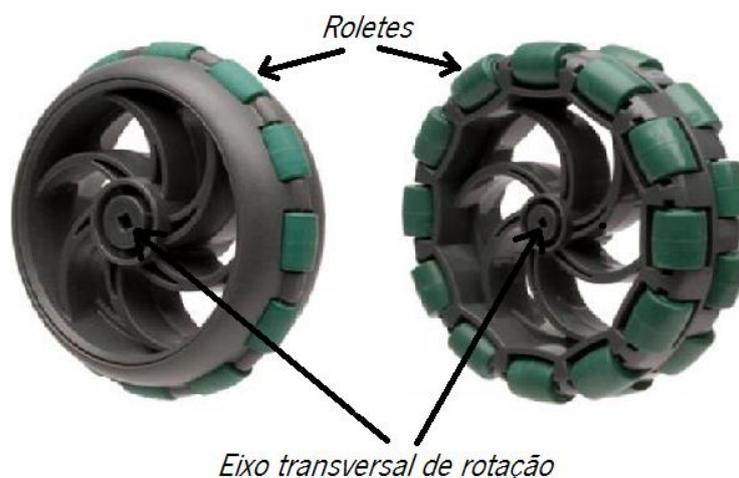


Figura 11 - Exemplos de rodas omnidirecionais: do lado esquerdo apresenta-se uma roda com uma fileira de roletes e do lado direito uma roda com duas fileiras de roletes (adaptado de [24] e [25] respetivamente).

As rodas omnidirecionais possuem 3 graus de liberdade. Há a possibilidade de efetuar translações de forma paralela e perpendicular ao eixo transversal de rotação e ainda uma rotação em torno de si própria (eixo perpendicular ao plano do solo que atravessa o centro de massa da roda). Na Figura 12 evidencia-se a representação gráfica das diversas direções para as quais uma roda omnidirecional se pode movimentar com baixo atrito.

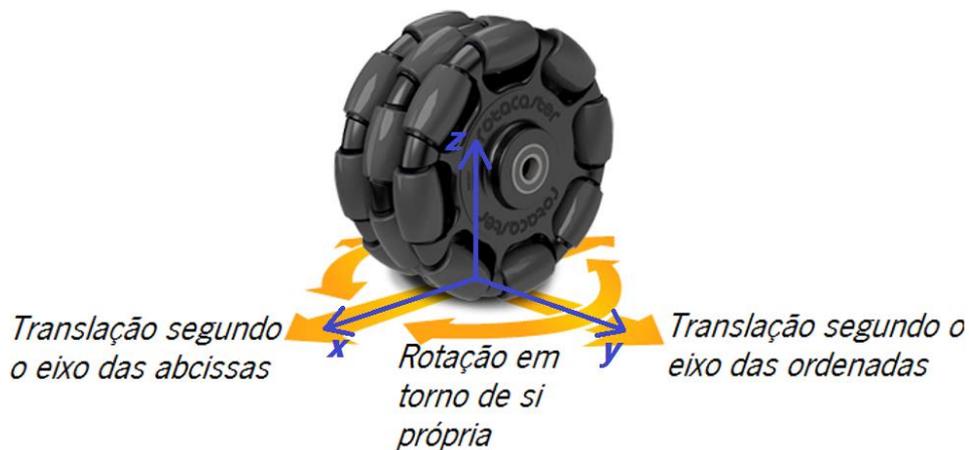


Figura 12 - Representação dos 3 graus de liberdade de uma roda omnidirecional. É possível efetuar translações de forma paralela (eixo das ordenadas) e perpendicular (eixo das abcissas) ao eixo transversal de rotação. Adicionalmente, a roda pode rodar sobre si própria em torno do eixo perpendicular ao plano do solo que atravessa o centro de massa da mesma (adaptado de [26]).

Com recurso a 3 rodas omnidirecionais é possível construir uma plataforma móvel omnidirecional estável como aquela que é descrita no trabalho [27]. A Figura 13 evidencia a plataforma desenvolvida no âmbito desse trabalho. No subcapítulo 2.2.3 apresenta-se um estudo sobre esse tipo de plataformas no qual se evidenciam as características mecânicas e a Cinemática inerente.

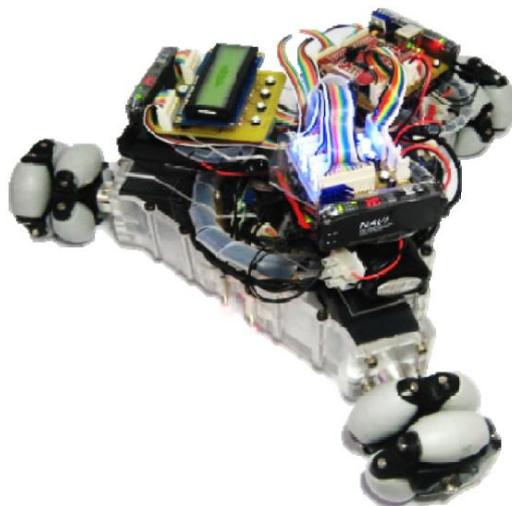


Figura 13 - Plataforma móvel omnidirecional baseada em 3 rodas omnidirecionais [27].

Quanto às vantagens das rodas omnidirecionais, salienta-se a existência de 3 graus de liberdade, o baixo peso, a simplicidade do sistema mecânico e o *design* compacto. Em relação aos inconvenientes, destaca-se a complexidade da Cinemática das plataformas móveis que usam esta categoria de rodas, a alta sensibilidade às irregularidades do solo, a baixa capacidade para transportar cargas pesadas (comparando com as outras categorias de rodas) e a reduzida área de contacto dos roletes com o solo [1] [17].

### 2.1.3.2. Rodas *Mecanum*

Existem rodas *Swedish* cujo eixo transversal de rotação estabelece um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo de rotação dos roletes. Essas rodas designam-se por rodas *Mecanum* ou rodas *Swedish*  $45^\circ$ . Foram desenvolvidas pelo engenheiro Bengt Ilon – trabalhador da empresa sueca Mecanum AB – em 1973 e patenteadas em 1975 [28].

Nesta subcategoria de rodas, os roletes podem ser fixados à restante estrutura pelas extremidades ou pelo centro. A Figura 14 evidencia ambas as situações.



Figura 14 - Exemplo de duas rodas *Mecanum*. À esquerda, a fixação dos roletes é feita pelas extremidades enquanto à direita é feita pelo centro (adaptado de [29] e [12] respetivamente).

As rodas *Mecanum* com roletes fixados pelo centro adaptam-se melhor às irregularidades do solo, no entanto, o peso máximo suportado por esta arquitetura é inferior ao das rodas cuja fixação dos roletes é feita pelas extremidades [12]. A Figura 15 evidencia a limitação que pode ocorrer devido às irregularidades do solo.

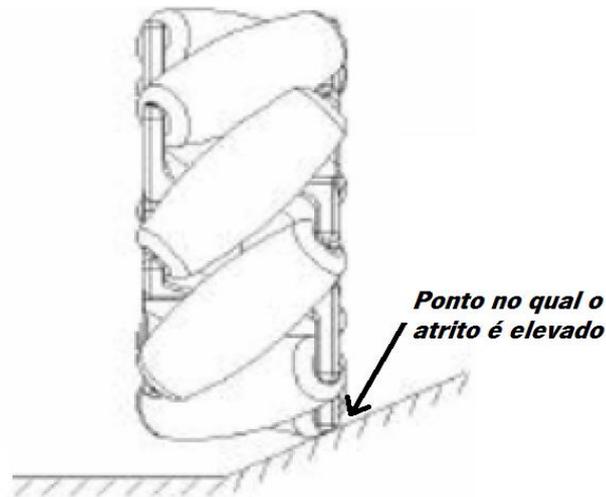


Figura 15 - As rodas *Mecanum* com roletes fixados pelas extremidades apresentam uma dificuldade acrescida na adaptação às irregularidades do solo (adaptado de [5]).

Tal como as rodas omnidirecionais, as rodas *Mecanum* também possuem 3 graus de liberdade: rotação em torno do eixo transversal da roda, rotação em torno do eixo do rolete e ainda rotação em torno de si própria (eixo perpendicular ao plano do solo que atravessa o centro de massa da roda e o ponto de contacto com o solo) [5].

Devido ao facto de o eixo transversal da roda *Mecanum* formar um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo de rotação dos roletes, uma parte do binário exercido pelo atuador (normalmente um motor CC) é convertida numa força segundo a direção de rotação e a outra parte é convertida noutra força segundo a normal à direção de rotação. A Figura 16 evidencia o diagrama com a representação da força total e das suas duas componentes.

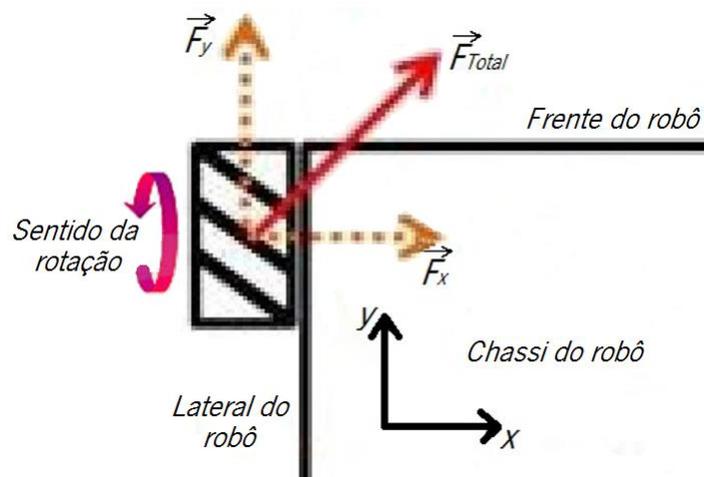


Figura 16 - Diagrama com a representação dos vetores força que atuam sobre o chassi do robô móvel quando há locomoção. O ângulo entre a força total e as suas duas componentes é de  $45^\circ$  (adaptado de [30]).

Com recurso a 4 rodas *Mecanum*, é possível construir uma plataforma móvel omnidirecional em que a força total é dada pela soma vetorial das componentes de cada roda. Para um movimento frontal a componente segundo o eixo das abcissas tem que se cancelar (tendo por base o referencial da Figura 16). Este movimento deve-se apenas à soma não nula das 4 componentes segundo o eixo das ordenadas. Em algumas situações, o não aproveitamento das componentes segundo o eixo das abcissas é o principal fator que leva a uma redução da eficiência da roda *Mecanum*. No sentido de colmatar esta limitação, desenvolveram-se duas técnicas:

- **Bloqueio de roletes.** Esta técnica consiste em bloquear os roletes sempre que necessário, impedindo-os de rodar. Quando os roletes estão bloqueados, a roda *Mecanum* passa a comportar-se, do ponto de vista da Cinemática, como uma roda fixa *standard*;
- **Ajuste dinâmico do ângulo entre o eixo de rotação dos roletes e o eixo transversal da roda.** Esta técnica consiste num sistema que é capaz de variar o ângulo que se forma entre o eixo transversal da roda e o eixo de rotação dos roletes. Isto traduz-se na capacidade de variar a amplitude de cada componente de cada roda independentemente. O resultado final é a possibilidade de evitar o aparecimento de componentes que se cancelem. Só aparecerão as componentes cuja soma vetorial resulte num valor não nulo, isto é, cujo resultado produza uma força efetiva.

Estas duas técnicas são extremamente complexas do ponto de vista mecânico e substancialmente dispendiosas. Até ao momento, estas duas desvantagens impediram o aparecimento de produtos comerciais que implementassem as técnicas referidas – existem apenas protótipos [5]. A Figura 17 evidencia essas técnicas.

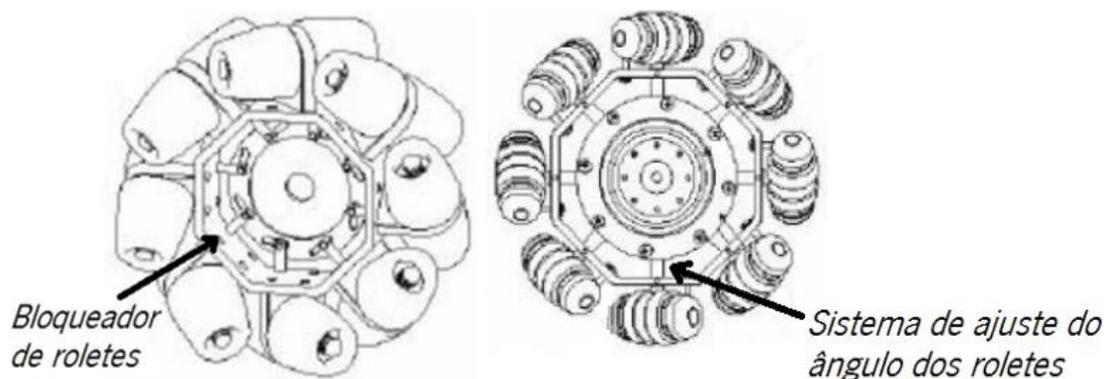


Figura 17 - Sistemas usados para bloquear os roletes e para ajustar o ângulo do seu eixo de rotação em relação ao eixo transversal da roda. Em algumas situações, estes sistemas melhoram substancialmente a eficiência da roda *Mecanum* (adaptado de [5]).

Desde a sua criação, as rodas *Mecanum* têm sido utilizadas em muitas aplicações. Esta subcategoria de rodas possibilita uma maior manobrabilidade em áreas cujo espaço de navegação é reduzido, tais como algumas linhas de montagem. Por exemplo, desde 2007, a empresa Mercedes-Benz utiliza empilhadores baseados em rodas *Mecanum* para transporte de cargas dentro das suas instalações [10].

As principais vantagens das rodas *Mecanum* são a capacidade para transportar cargas pesadas (sobretudo se os roletes forem fixados pelas extremidades), a existência de 3 graus de liberdade, a elevada capacidade de tração (comparando com as rodas omnidirecionais) e o *design* compacto. A nível de inconvenientes, é de referir a complexidade da Cinemática das plataformas móveis que usam esta subcategoria de rodas, a complexidade do sistema mecânico que as implementa, o preço elevado (comparando com as outras categorias de rodas), a alta sensibilidade às irregularidades do solo, a reduzida área de contacto da roda com o solo e a redução da eficiência quando não é possível bloquear os roletes nem ajustar o ângulo dos mesmos [1] [17].

### 2.1.4. Rodas esféricas

As rodas esféricas são uma categoria de rodas cuja estrutura mecânica consiste essencialmente em ter uma esfera apoiada sobre uns rolamentos. Estas rodas apresentam 3 graus de liberdade porque a esfera pode rodar com baixo atrito em qualquer direção. Caso possuam tração, denominam-se motrizes ou ativas. Se as rodas forem utilizadas somente para conferir estabilidade às plataformas móveis às quais estão acopladas, denominam-se passivas.

A Figura 18 evidencia à esquerda uma roda esférica passiva e à direita um robô móvel que usa esta categoria de rodas apenas para conferir estabilidade.



Figura 18 - À esquerda apresenta-se uma roda esférica passiva [31] e à direita o *Pololu 5" Robot Chassis RRC04A* que integra duas rodas fixas *standard* e uma roda esférica (adaptado de [32]).

Uma das aplicações mais comuns e relevantes para esta categoria de rodas consiste na medição do deslocamento linear nos antigos e obsoletos ratos de computador com esfera. Nessa aplicação recorre-se a uma roda esférica passiva com dois *encoders* encostados (mecanicamente desfasados 90°) por forma a medir o deslocamento nos 2 graus de liberdade do rato. A Figura 19 evidencia a aplicação referida.

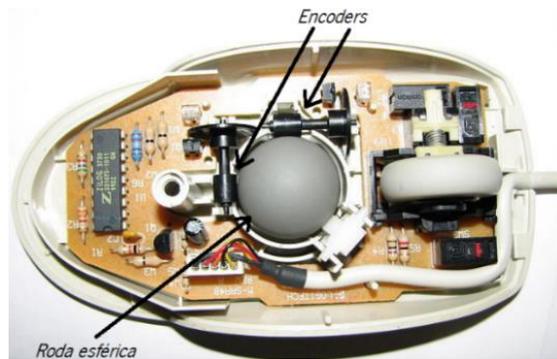


Figura 19 - Rato de computador antigo e obsoleto baseado na roda esférica. Nesta tecnologia usam-se 2 *encoders* encostados à esfera (mecanicamente desfasados 90°) por forma a medir o deslocamento linear do rato (adaptado de [33]).

Há aplicações em que a roda esférica é motriz. Para se conseguir tal característica, basta recorrer exatamente ao mesmo princípio que foi referido para o rato de computador trocando os *encoders* por roletes acoplados a atuadores, nomeadamente motores CC. Em 2005 desenvolveu-se o *CMU Ballbot* (Figura 20). Trata-se de um robô móvel cuja dinâmica é intrinsecamente instável (em malha aberta) mas que é possível estabilizar utilizando uma roda esférica motriz e um complexo sistema de controlo em malha fechada [34].



Figura 20 - O *CMU Ballbot* é um exemplo de um robô móvel que utiliza uma roda esférica motriz [34].

As principais vantagens das rodas esféricas são a capacidade para transportar cargas pesadas, a robustez às irregularidades do solo, a reduzida derrapagem devido ao baixo atrito que a esfera apresenta em qualquer direção que se movimente e a simplicidade da Cinemática das plataformas móveis que utilizam esta categoria de rodas. Os principais inconvenientes a salientar são a complexidade do sistema mecânico quando a roda é motriz e o facto de esta ser a categoria de rodas que limita mais a velocidade máxima de uma plataforma móvel [1] [17].

### 2.2. Principais sistemas de direção com rodas

Os principais sistemas de direção com rodas podem ser classificados consoante o número de rodas utilizadas [17] [35]. Nos próximos 5 subcapítulos faz-se a apresentação desses sistemas e evidenciam-se as principais características. Cada categoria de rodas foi definida tendo por base os símbolos apresentados na Figura 21.

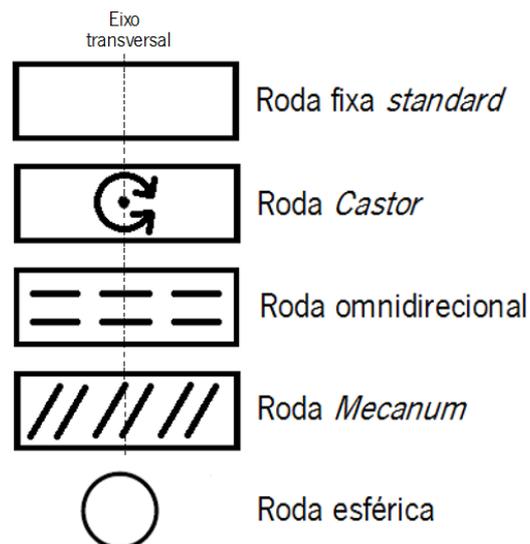


Figura 21 - Símbolos utilizados para cada definir cada categoria de rodas.

#### 2.2.1. Sistemas de direção com uma roda

Os sistemas de direção baseados numa única roda são pouco comuns no dia-a-dia pois são intrinsecamente instáveis, caros e exigem um controlador (normalmente eletrónico) complexo.

As plataformas móveis que recorrem a estes sistemas para se locomoverem são geralmente omnidirecionais pois possuem 3 graus de liberdade. A configuração típica destes sistemas consiste numa roda esférica motriz colocada no centro geométrico da base circular de

uma plataforma móvel. A Figura 22 apresenta o esquema dessa configuração. O robô *CMU Ballbot* [34] (apresentado no subcapítulo 2.1.4) é baseado na configuração descrita.

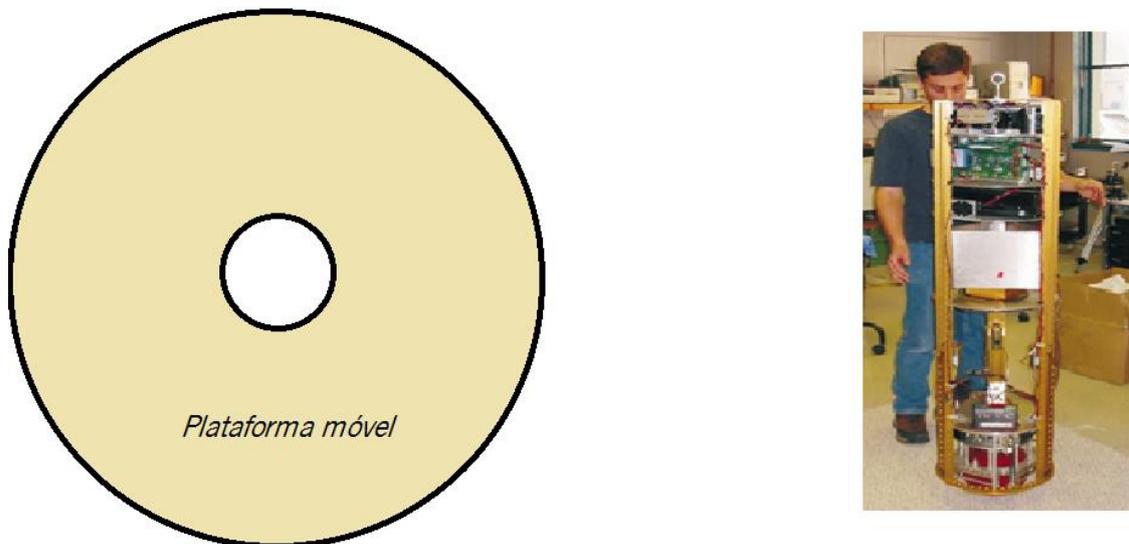


Figura 22 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma única roda esférica motriz. Este confere os 3 graus de liberdade à plataforma móvel omnidirecional. À direita evidencia-se o *CMU Ballbot* pois trata-se de uma aplicação para esta configuração [34].

### 2.2.2. Sistemas de direção com duas rodas

Os sistemas de direção que recorrem exclusivamente a duas rodas também são sempre intrinsecamente instáveis. Na prática, estes sistemas necessitam sempre de um controlador humano ou não-humano (por exemplo, um controlador eletrónico) por forma a garantir a sua própria estabilidade quando estão a operar.

Estes sistemas possuem duas configurações típicas. Na primeira utilizam-se uma roda fixa *standard* motriz e uma roda *Castor* passiva com a disposição apresentada no lado esquerdo da Figura 23 – nessa figura também se apresenta uma bicicleta pois trata-se de uma aplicação prática. Nesta primeira configuração, o centro de rotação instantâneo (*ICR – Instantaneous Center of Rotation*) é dado pela interseção das retas imaginárias que atravessam os eixos transversais de rotação das duas rodas [17] [35].



Figura 23 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma roda fixa *standard* motriz e uma roda *Castor* passiva. A bicicleta é uma das aplicações possíveis para esta configuração [36].

Na segunda configuração típica recorre-se a duas rodas fixas *standard* motrizes com a disposição que é apresentada no lado esquerdo da Figura 24. A locomoção do robô *Cye* [37] é baseada nesta configuração.

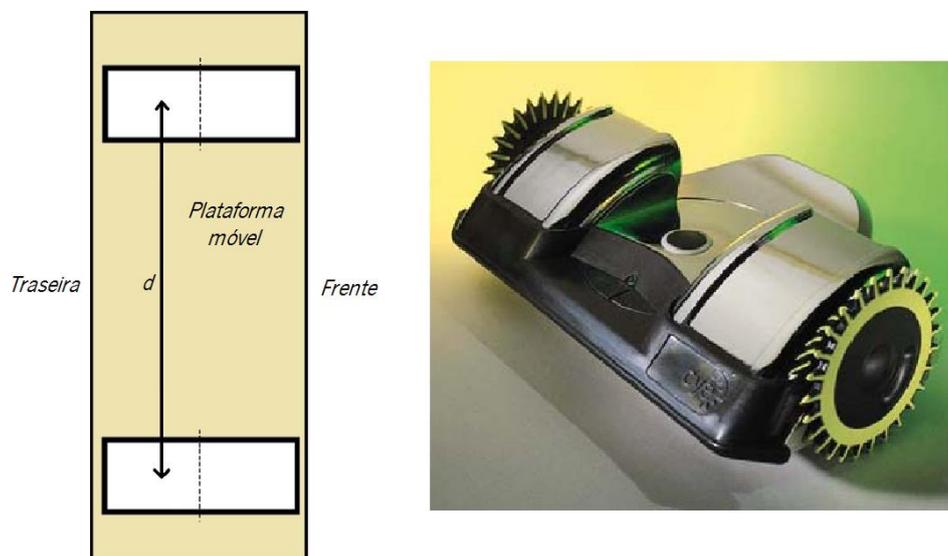


Figura 24 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas fixas *standard* motrizes. O robô *Cye* é uma das diversas aplicações para esta configuração [37].

Esta configuração pode ser denominada diferencial porque os movimentos de rotação são realizados à custa da diferença de velocidade das rodas fixas *standard* [35]. Os valores da

velocidade linear e da velocidade angular de uma plataforma móvel baseada nesta configuração diferencial são dados pelas seguintes expressões matemáticas:

$$v = \frac{(w_D + w_E) \cdot r}{2} \quad (2)$$

$$w = \frac{(w_D - w_E) \cdot r}{d} \quad (3)$$

Em que:

- $v$  é a velocidade linear da plataforma móvel;
- $w$  é a velocidade angular da plataforma móvel;
- $w_E$  é a velocidade angular da roda esquerda;
- $w_D$  é a velocidade angular da roda direita;
- $r$  é o raio das rodas;
- $d$  é a distância entre os centros das duas rodas (assinalada na Figura 24).

### 2.2.3. Sistemas de direção com 3 rodas

Os sistemas de direção com 3 rodas são comuns no dia-a-dia pois são baratos, intrinsecamente estáveis e normalmente podem transportar cargas substancialmente pesadas pois é possível fazer uma distribuição uniforme do peso pelas 3 rodas. Todas as configurações destes sistemas tem em comum o facto de a disposição das rodas formar um triângulo. Para maximizar a estabilidade, o triângulo deve ser equilátero e o centro de massa da plataforma móvel deve coincidir com o centro geométrico do triângulo [17] [35].

A primeira configuração típica que se apresenta é constituída por duas rodas fixas *standard* motrizes e uma roda esférica passiva, conforme a Figura 25 evidencia. Esta configuração apresenta semelhanças com a configuração diferencial dos sistemas de direção com duas rodas – é possível aplicar as mesmas equações da Cinemática a ambos os casos. Nesta configuração a roda esférica, por ser omnidirecional e passiva, não tem quaisquer implicações na Cinemática do sistema – limita-se a conferir estabilidade uma vez que contribui para o deslocamento do centro de massa para dentro do triângulo formado pelas 3 rodas. O robô *Pololu 5" Robot Chassis RRC04A* [32] (apresentado no subcapítulo 2.1.4) é baseado nesta configuração.

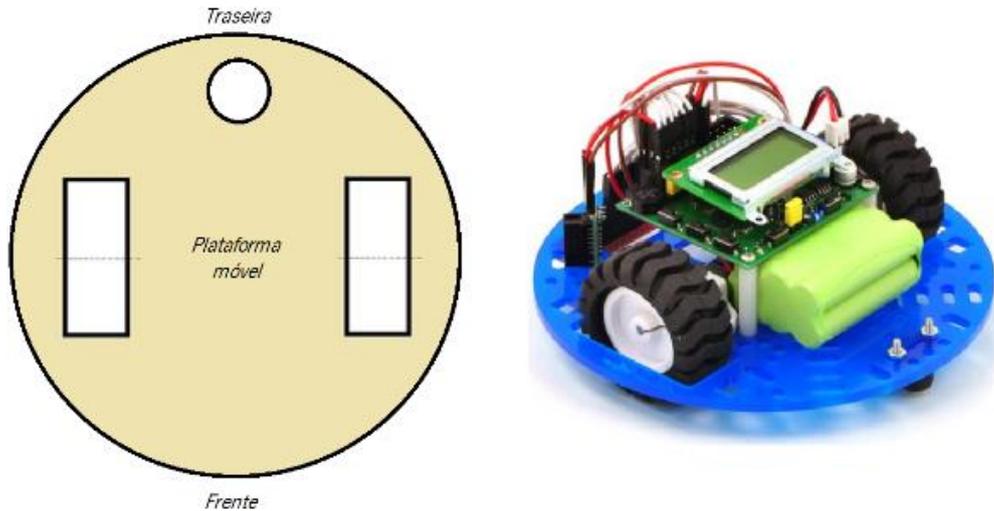


Figura 25 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma roda esférica passiva e duas rodas fixas *standard* motrizes. O robô *Pololu 5" Robot Chassis RRC04A* é uma das possíveis aplicações para esta configuração [32].

A segunda configuração consiste na utilização de duas rodas fixas *standard* motrizes e uma roda *Castor* passiva, conforme a Figura 26 ilustra. O centro de rotação instantâneo deste sistema é dado pela interseção das retas imaginárias que atravessam os eixos transversais de rotação das 3 rodas. O triciclo *Piaggio Ape Kasten* [38] é um veículo cujo sistema de direção se baseia nesta configuração.

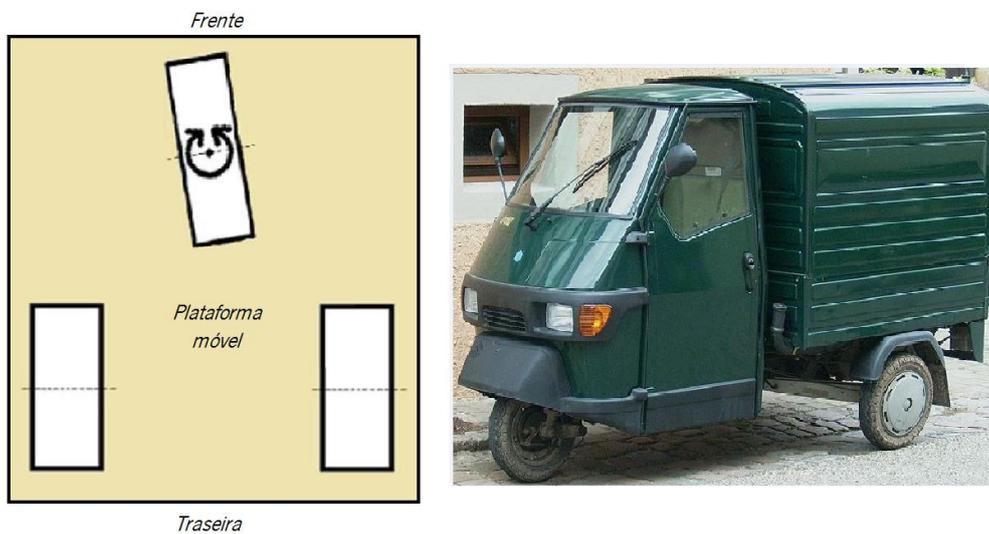


Figura 26 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por uma roda *Castor* passiva e duas rodas fixas *standard* motrizes. O triciclo *Piaggio Ape Kasten* é um exemplo de aplicação para esta configuração [38].

A terceira configuração recorre a 3 rodas *Castor* motrizes sempre sincronizadas, conforme a Figura 27 apresenta. O sincronismo é normalmente garantido através de uma corrente de transmissão (sistema mecânico) ou através de um servomotor acoplado ao eixo vertical de rotação

de cada roda (sistema eletrónico). A principal característica desta configuração é o facto de os 3 eixos transversais de rotação serem sempre paralelos. O principal inconveniente a salientar é o tempo de resposta elevado pois é necessário ajustar a direção dos eixos transversais antes de efetuar um movimento [17]. O sistema de direção do robô *Denning* [39] é baseado nesta configuração.

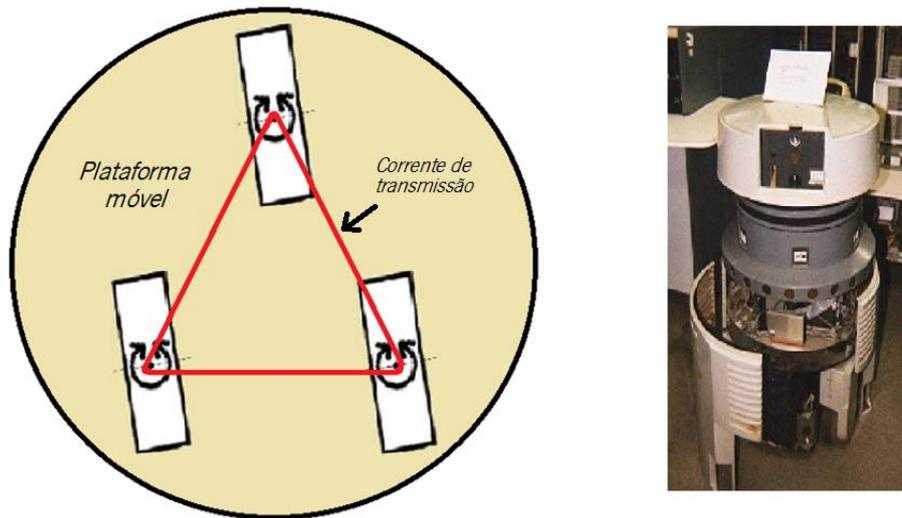


Figura 27 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 3 rodas *Castor* sempre sincronizadas mecanicamente. O robô *Denning* é uma das aplicações desta configuração [39].

A última configuração típica consiste na utilização de 3 rodas omnidirecionais motrizes com os eixos transversais desfasados  $120^\circ$  entre si, conforme a Figura 28 apresenta.

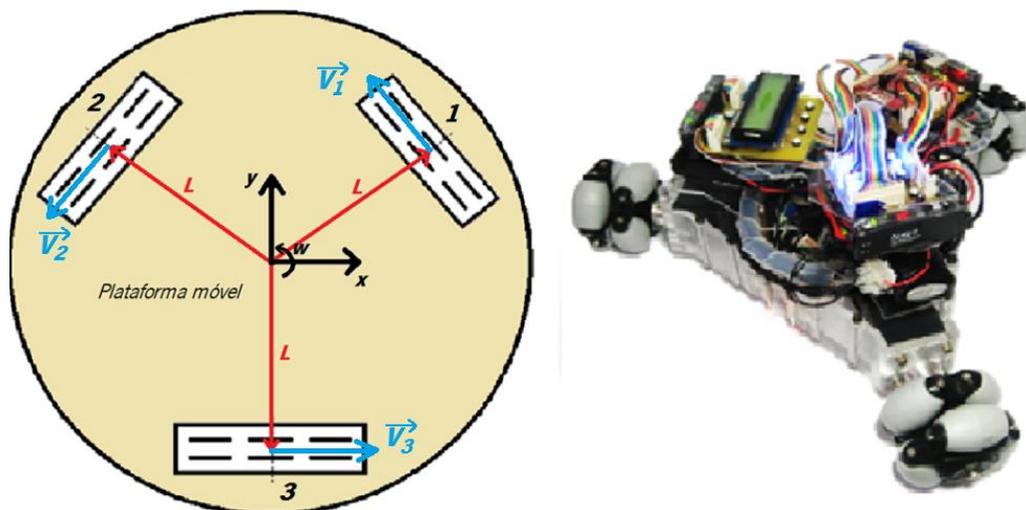


Figura 28 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 3 rodas omnidirecionais motrizes desfasadas  $120^\circ$  entre si (sistema omnidirecional). À direita apresenta-se uma plataforma móvel omnidirecional que implementa esta configuração [27].

Esta configuração é omnidirecional pois oferece 3 graus de liberdade – possibilita movimentos independentes no eixo das abcissas, eixo das ordenadas e rotação em torno de si própria. Tendo por base o referencial, a numeração atribuída e o sentido dos vetores velocidade de cada uma das rodas (definidos na Figura 28), é possível estabelecer o seguinte modelo matemático [40]:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Em que:

- $v_x$  é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das abcissas;
- $v_y$  é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das ordenadas;
- $w_z$  é a velocidade angular da plataforma móvel;
- $L$  é a distância entre o centro geométrico da base circular (origem do referencial) e o centro de cada roda (assinalada na Figura 28);
- $v_1$  é a velocidade linear da roda 1;
- $v_2$  é a velocidade linear da roda 2;
- $v_3$  é a velocidade linear da roda 3.

Esta configuração apresenta como principal vantagem a combinação da estabilidade com a existência de 3 graus de liberdade (no entanto, a estabilidade é inferior à das plataformas móveis que recorrem a um sistema de direção com 4 ou mais rodas). Os principais inconvenientes a salientar são a necessidade de um sistema de controlo complexo (cada roda necessita de um atuador independente) e o facto de haver movimentos em que uma das rodas não exerce tração, o que reduz a força total de tração ou travagem da plataforma móvel (por exemplo, através do modelo matemático (4) é possível concluir que a roda 3 não exerce força de tração ou travagem para movimentos segundo o eixo das ordenadas – tendo por base o referencial da Figura 28) [27] [40].

#### 2.2.4. Sistemas de direção com 4 rodas

Os sistemas de direção com 4 rodas são extremamente banais no dia-a-dia. É possível encontrá-los, por exemplo, em automóveis. Estes sistemas são sempre intrinsecamente estáveis e podem transportar cargas mais pesadas que qualquer outro sistema de direção com menos de 4 rodas. A disposição das rodas normalmente forma um quadrado ou um retângulo. Para maximizar a estabilidade, o centro de massa das plataformas móveis deve coincidir com o centro geométrico dessas figuras [17] [35].

Caso o sistema de direção possua somente rodas fixas *standard* e/ou rodas *Castor*, o centro de rotação instantâneo da plataforma móvel é dado pela interseção das retas imaginárias que atravessam todos os eixos transversais. A Figura 29 apresenta esse método gráfico aplicado ao sistema de direção *Ackermann* [7].

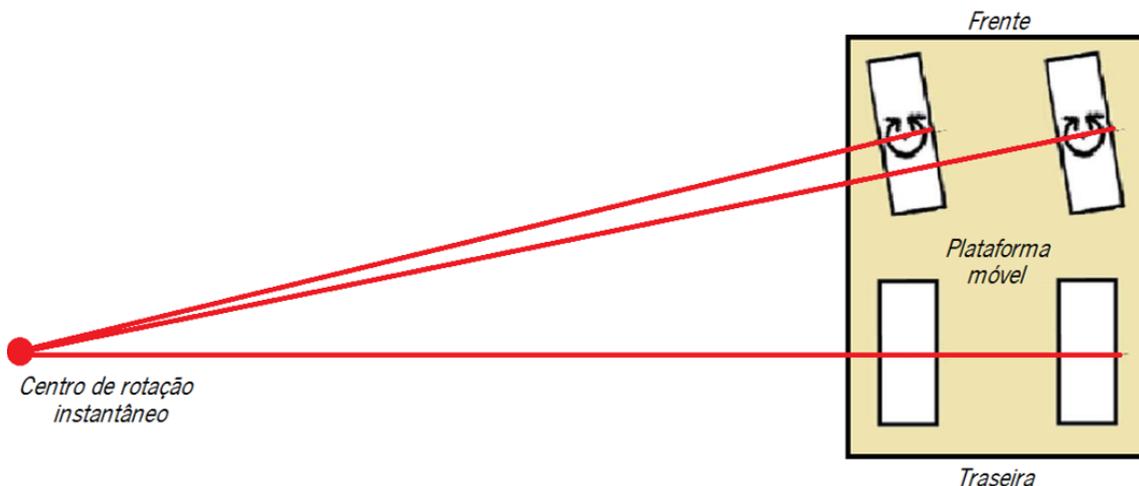


Figura 29 - Método gráfico que possibilita a obtenção do centro de rotação instantâneo de uma plataforma móvel baseada no sistema de direção *Ackermann*.

A primeira configuração típica que se apresenta é constituída por duas rodas fixas *standard* motrizes e duas rodas esféricas passivas, conforme a Figura 30 evidencia. Trata-se de uma configuração muito semelhante à configuração diferencial dos sistemas de direção com duas ou 3 rodas – é possível aplicar diretamente as equações (2) e (3). Nesta configuração, as rodas esféricas, por serem passivas e omnidirecionais, não têm quaisquer implicações na Cinemática do sistema – apenas contribuem para uma maior estabilidade do mesmo. O robô *Khepera* locomove-se recorrendo à configuração descrita.

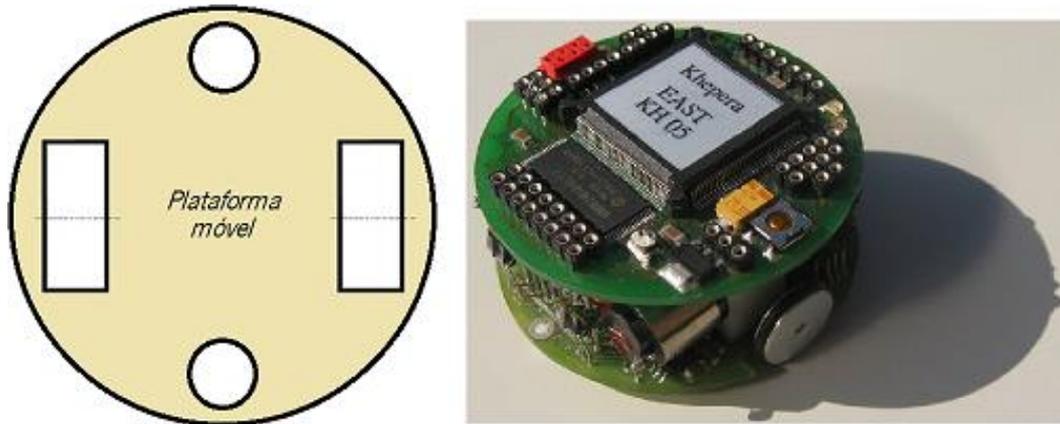


Figura 30 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas fixas *standard* motrizes e por duas rodas esféricas passivas. O *Khepera* é um robô que usa esta configuração diferencial para se locomover [41].

A segunda configuração, também denominada sistema de *Ackermann* [7], consiste na utilização de duas rodas *Castor* dianteiras (podem ser motrizes ou passivas) e duas rodas fixas *standard* traseiras (também podem ser motrizes ou passivas), conforme a Figura 31 evidencia.



Figura 31 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas *Castor* dianteiras e duas rodas fixas *standard* traseiras. Esta configuração pode ser encontrada em praticamente todos os automóveis [42].

A terceira configuração (evidenciada na Figura 32) é muito semelhante à anterior. A diferença consiste no facto de as rodas dianteiras serem fixas *standard* e as rodas traseiras serem *Castor*. Esta configuração é normalmente encontrada em empilhadores porque, quando estes transportam cargas substancialmente pesadas, a maior parte do peso incide sobre as rodas fixas *standard* (estas rodas podem suportar um peso maior do que aquele que é suportado pelas rodas *Castor*).

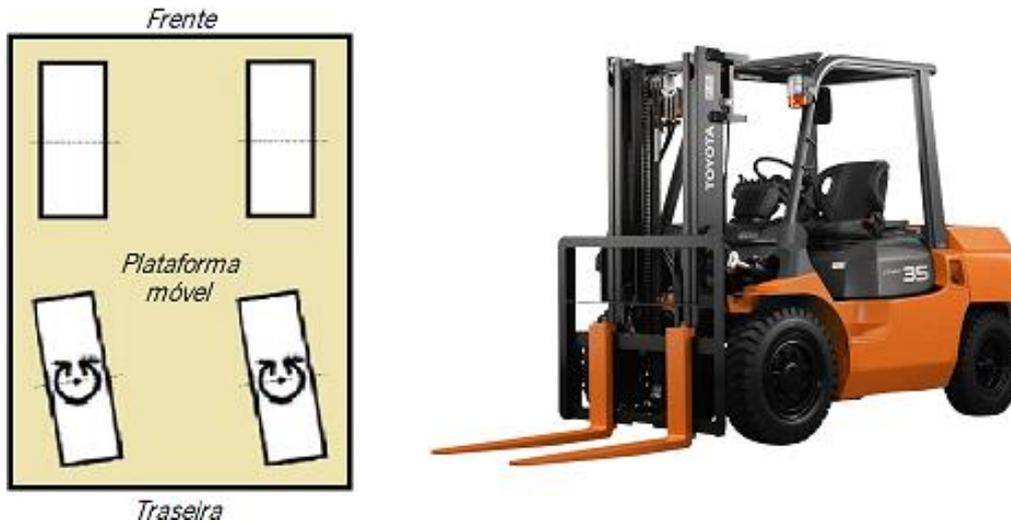


Figura 32 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por duas rodas fixas *standard* dianteiras e por duas rodas *Castor* traseiras. Trata-se de uma configuração muito comum em empilhadores [43].

Uma configuração frequentemente encontrada em veículos agrícolas consiste na utilização de 4 rodas *Castor* motrizes com a disposição apresentada na Figura 33. Comparativamente às duas configurações anteriormente referidas, esta possibilita a realização de manobras em espaços mais reduzidos pois é possível ter o centro de rotação instantâneo mais próximo da plataforma móvel.

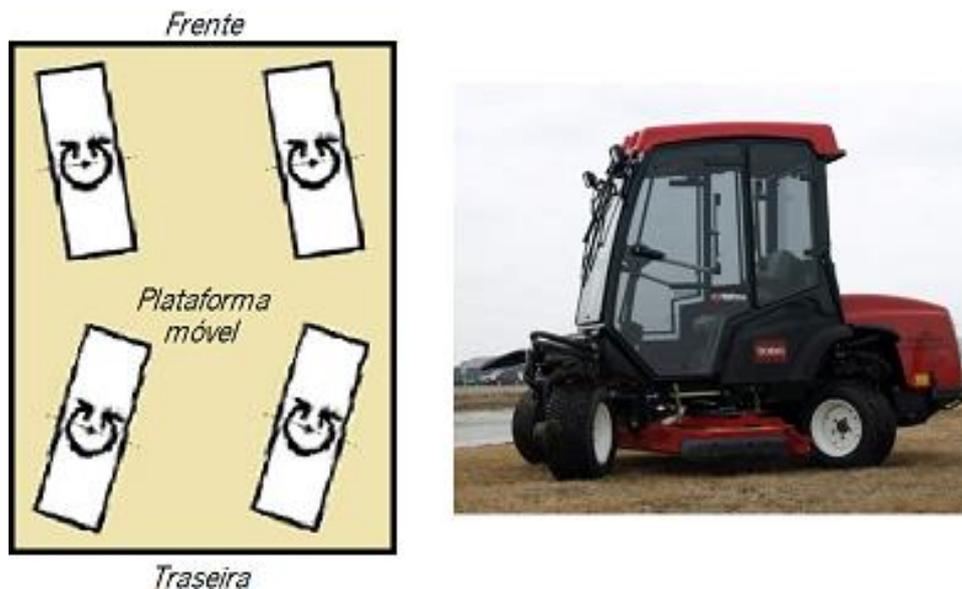


Figura 33 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 4 rodas *Castor* motrizes. Trata-se de uma configuração aplicada em alguns veículos usados na agricultura [44].

Os sistemas de direção com 4 rodas também possuem configurações que possibilitam uma movimentação omnidirecional num plano. Na Figura 34 evidencia-se uma configuração que

confere 3 graus de liberdade à plataforma móvel – recorre-se a 4 rodas omnidirecionais motrizes desfasadas 90° entre si e todas à mesma distância do centro geométrico da plataforma móvel.

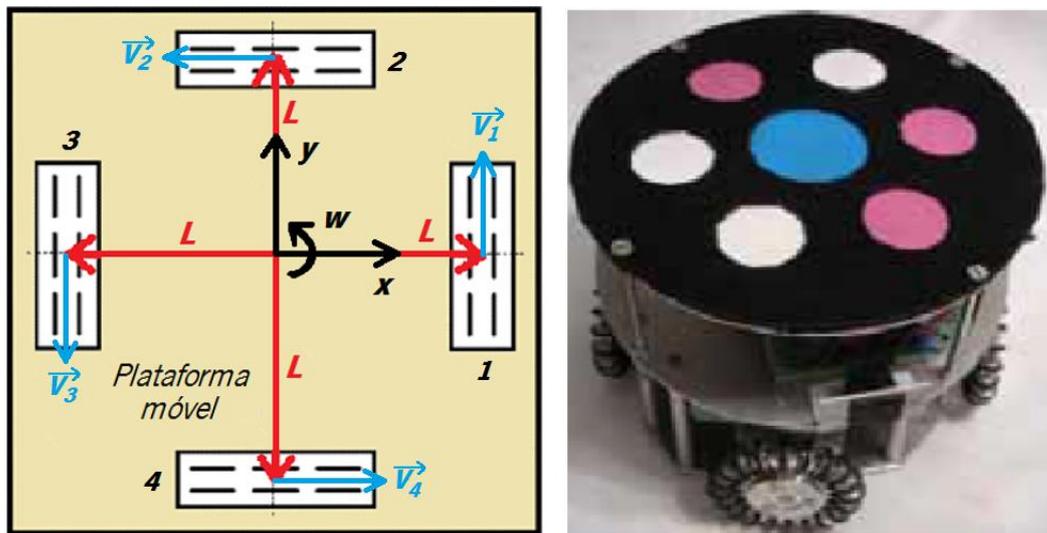


Figura 34 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção composto por 4 rodas omnidirecionais motrizes. À direita evidencia-se uma plataforma móvel, desenvolvida no âmbito da publicação [45], que recorre à configuração omnidirecional para se locomover.

Nesta configuração cada roda exerce uma força (que pode ser decomposta numa componente segundo o eixo das abcissas e noutra segundo o eixo das ordenadas) sobre a plataforma móvel. Todos os movimentos realizáveis resultam do somatório das 4 forças (uma por cada roda). Tendo por base o referencial, a numeração atribuída e o sentido dos vetores velocidade de cada uma das rodas (definidos na Figura 34), esta configuração omnidirecional é regida pelo seguinte modelo matemático [45]:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & L \\ -1 & 0 & L \\ 0 & -1 & L \\ 1 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Em que:

- $v_x$  é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das abcissas;
- $v_y$  é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das ordenadas;
- $w_z$  é a velocidade angular da plataforma móvel;
- $L$  é a distância entre o centro da plataforma móvel e o centro das rodas (assinalada na Figura 34);
- $v_i$  é a velocidade linear da roda  $i$ ;

- $v_2$  é a velocidade linear da roda 2;
- $v_3$  é a velocidade linear da roda 3;
- $v_4$  é a velocidade linear da roda 4.

As principais vantagens desta configuração são a elevada estabilidade (intrínseca a todos os sistemas de direção com 4 rodas) e a existência de 3 graus de liberdade. Em relação aos inconvenientes, salienta-se a complexidade do sistema de controlo (cada roda necessita de um atuador individual) e o facto de o modelo matemático (5) só ser válido quando todas as rodas estão em contacto com o solo.

A plataforma móvel desenvolvida no âmbito da presente dissertação é omnidirecional e baseia-se na configuração que se apresenta na Figura 35. Esta configuração caracteriza-se essencialmente por utilizar 4 rodas *Mecanum* motrizes, conforme essa figura evidencia.

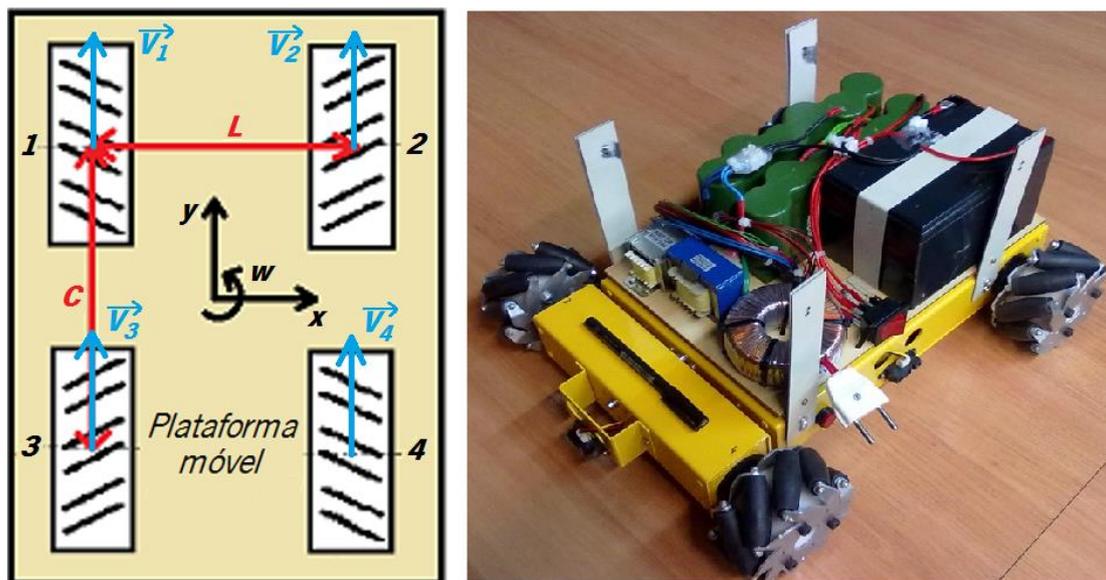


Figura 35 - À esquerda apresenta-se o esquema de um sistema de direção omnidirecional composto por 4 rodas *Mecanum* motrizes. A plataforma móvel desenvolvida no âmbito da presente dissertação baseia-se nesta configuração omnidirecional.

Quando a plataforma móvel se locomove, cada roda exerce uma força que forma um ângulo de  $45^\circ$  com o respetivo eixo transversal de rotação. Essa força pode ser decomposta em duas componentes de igual amplitude: uma coincidente com o eixo transversal de rotação e outra normal a esse eixo. A Figura 16, apresentada no subcapítulo 2.1.3.2, representa o respetivo diagrama de forças. A força total que incide sobre o centro de massa da plataforma móvel é dada pelo somatório de todas as componentes de todas as rodas.

Tendo por base o referencial, a numeração atribuída e o sentido dos vetores velocidade de cada uma das rodas (definidos na Figura 35), esta configuração omnidirecional é caracterizada pelo seguinte modelo matemático [12] [46] [47]:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\frac{C+L}{2} \\ -1 & 1 & \frac{C+L}{2} \\ -1 & 1 & -\frac{C+L}{2} \\ 1 & 1 & \frac{C+L}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em que:

- $v_x$  é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das abcissas;
- $v_y$  é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das ordenadas;
- $w_z$  é a velocidade angular da plataforma móvel;
- $L$  é a distância entre os centros das rodas 1 e 2 ou 3 e 4 (assinalada na Figura 35);
- $C$  é a distância entre os centros das rodas 1 e 3 ou 2 e 4 (assinalada na Figura 35);
- $v_1$  é a velocidade linear da roda 1;
- $v_2$  é a velocidade linear da roda 2;
- $v_3$  é a velocidade linear da roda 3;
- $v_4$  é a velocidade linear da roda 4.

Este modelo matemático possibilita o cálculo da velocidade linear a aplicar a cada uma das 4 rodas *Mecanum* com o intuito de realizar qualquer movimento desejado num plano. A conversão entre velocidade linear e velocidade angular é dada pela equação (1).

Através da análise do modelo matemático foi possível fazer a Figura 36. Essa figura evidencia todos os movimentos considerados mais básicos para esta configuração – há movimentos intuitivos e de simples compreensão (por exemplo, o movimento frontal) e movimentos cujo sentido de rotação das rodas não é óbvio (por exemplo, os movimentos laterais).

## Sistemas de direção com rodas

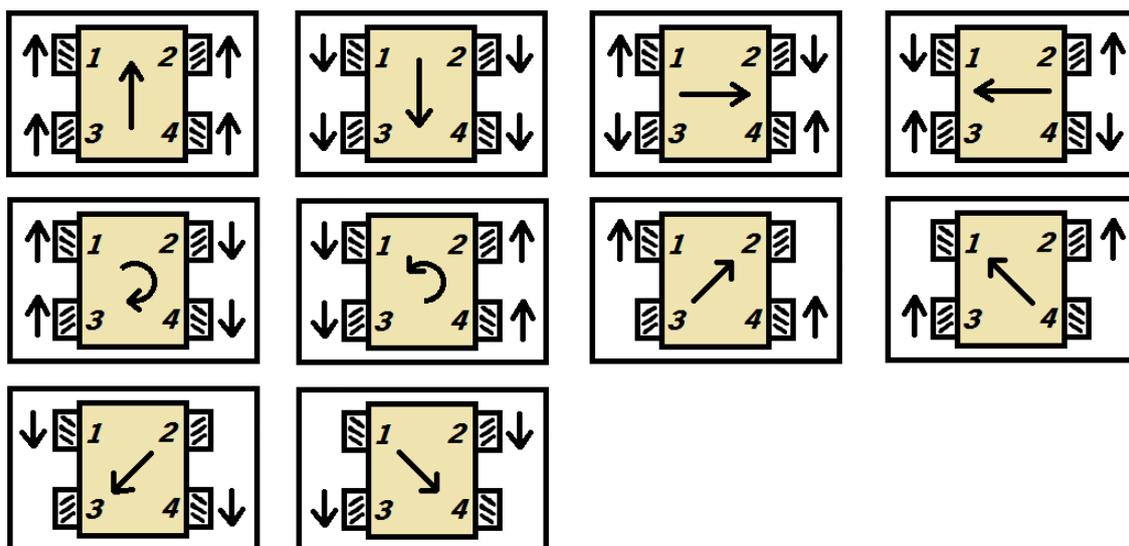


Figura 36 - Representação dos movimentos considerados mais básicos para uma plataforma móvel omnidirecional baseada no sistema de direção composto por 4 rodas *Mecanum* motrizes.

Apesar de ser pouco comum no dia-a-dia, esta configuração é amplamente usada em aplicações muito específicas. A empresa Omnix Technology Systems desenvolve veículos baseados nesta configuração para efetuar a inspeção de locais inacessíveis a humanos e para o transporte de cargas pesadas em ambientes militares (devido à excelente manobrabilidade). Para além destes casos concretos, há muitas outras aplicações: veículos para exploração da Lua e de Marte em futuras missões espaciais, empilhadores para o transporte de cargas, cadeiras de rodas omnidirecionais, entre outras [5]. A Figura 37 apresenta algumas dessas aplicações.



Figura 37 - Exemplos de aplicações para o sistema de direção baseado em 4 rodas *Mecanum* motrizes (adaptado de [5]).

As principais vantagens desta configuração são a elevada estabilidade (intrínseca a todos os sistemas de direção com 4 rodas), a existência de 3 graus de liberdade e, conseqüentemente, a possibilidade de realizar qualquer movimento, em qualquer instante, num plano. Quanto aos inconvenientes, é de referir a complexidade do sistema de controlo (cada roda necessita de um atuador individual), o facto de o modelo matemático (6) ser válido somente quando todas as rodas estão em contacto com o solo e o custo substancialmente elevado desta configuração (sobretudo devido às rodas).

### 2.2.5. Outros sistemas de direção com rodas

Há aplicações que requerem plataformas móveis extremamente estáveis e com capacidade para transportar cargas muito pesadas. Nessas aplicações, normalmente recorre-se a sistemas de direção com 6 ou mais rodas [17]. A Figura 38 apresenta duas configurações que reúnem os requisitos estabelecidos: uma delas é composta por 4 rodas esféricas passivas e duas rodas *Castor* motrizes (lado esquerdo) enquanto a outra é composta por 4 rodas esféricas passivas e duas rodas fixas *standard* motrizes (lado direito). A primeira configuração é considerada omnidirecional desde que os eixos transversais de rotação das rodas *Castor* estejam sincronizados e sempre paralelos. A segunda configuração é diferencial pois baseia-se nos princípios cinemáticos que já foram anteriormente referidos para outras configurações diferenciais.

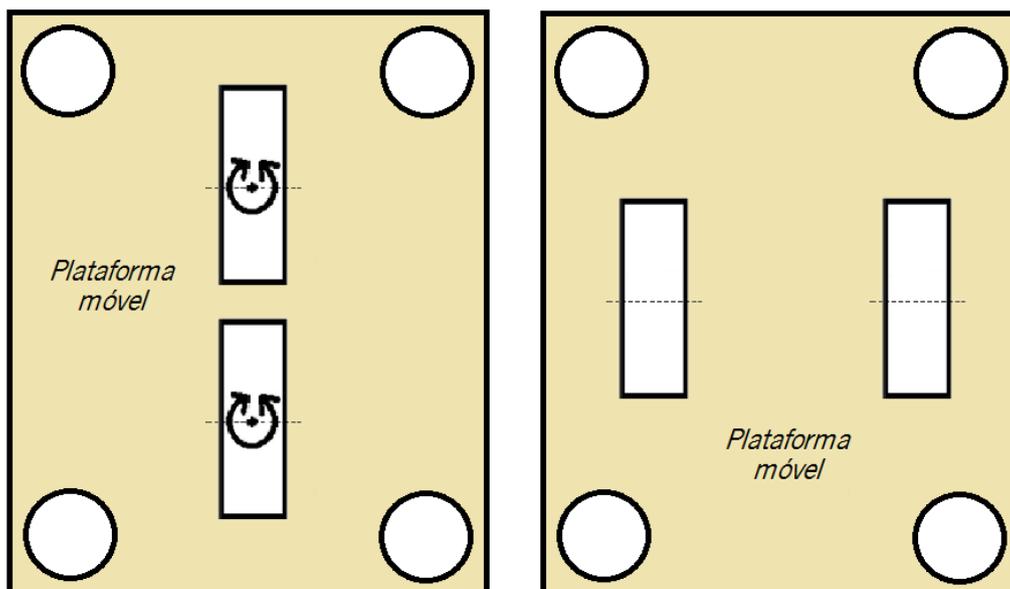


Figura 38 - Esquemas de sistemas de direção compostos por 6 rodas. Em ambos os casos, as rodas esféricas passivas limitam-se a conferir estabilidade à plataforma móvel.

### **Sistemas de direção com rodas**

---

Como já foi referido, estes sistemas de direção privilegiam a estabilidade, a capacidade para transportar cargas muito pesadas e ainda a força de tração. Em relação aos inconvenientes, destaca-se o custo substancialmente elevado e o facto de a grande quantidade de rodas impedir o alcance de velocidades tão elevadas como nos sistemas de direção com 3 ou 4 rodas.



# 3. Energia e conversores de potência

Neste capítulo apresenta-se um estudo dos principais conversores eletrónicos de potência que possibilitam o controlo do fluxo de energia num sistema eletrónico. Os conversores eletrónicos de potência podem ser divididos em duas categorias bem distintas: conversores lineares e conversores comutados [2] [3]. Controlar o fluxo de energia significa impor um valor desejado de tensão e/ou corrente à saída de um conversor a partir de uma gama de valores de tensão e/ou corrente à entrada do mesmo. Salvo referência contrária, consideram-se todos os componentes eletrónicos ideais.

Este estudo é importante para a seleção, dimensionamento, simulação e implementação dos conversores de potência mais adequados ao desenvolvimento do sistema de alimentação energeticamente otimizado.

## 3.1. Conversores lineares

Os conversores eletrónicos de potência lineares são circuitos elétricos que possibilitam o controlo do fluxo de energia com recurso a componentes eletrónicos a funcionarem na zona ativa (também denominada zona linear) [2]. Normalmente recorre-se a transístores bipolares a operarem na zona ativa ou a díodos zener a operarem na zona de rutura. Na Figura 39 evidencia-se o esquema do circuito mais simples que possibilita a implementação de um conversor linear.

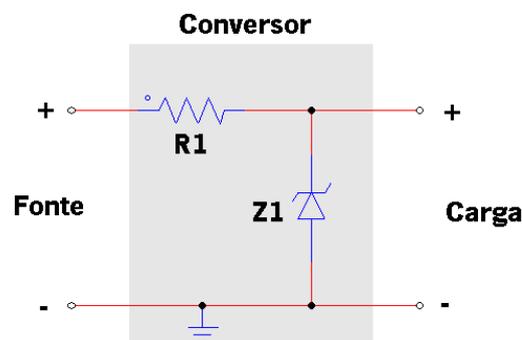


Figura 39 - Esquema de um conversor linear do tipo fonte de tensão. Quando o diodo zener Z1 opera na zona de rutura, estabelece-se uma tensão constante para a carga (dentro de determinados limites). A resistência R1 limita a corrente no diodo e na carga.

Na Figura 40 evidencia-se outro esquema de um conversor linear. Comparando esse conversor com o que foi apresentado na figura anterior, destaca-se a capacidade de variar o valor da tensão na carga através do ajuste de um potenciômetro. Em termos elétricos, o ajuste do potenciômetro provoca uma variação da corrente na base do transistor bipolar, o que se reflete na variação da tensão na carga. Quando o cursor do potenciômetro se encontra na posição A, obtém-se a tensão máxima na carga. Se o cursor se encontrar na posição B, a tensão na carga é nula.

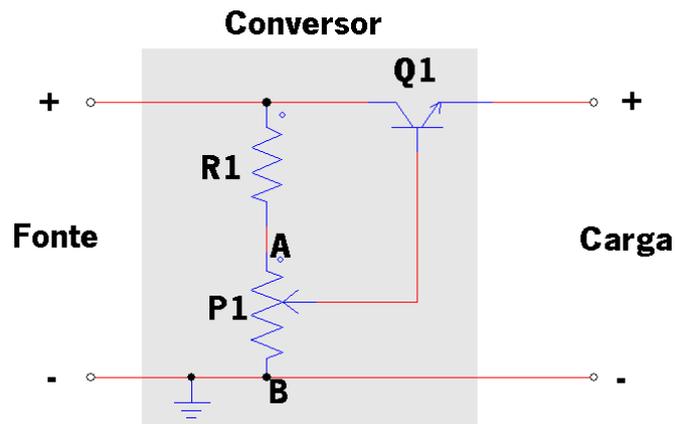


Figura 40 - Esquema de um conversor linear, do tipo fonte de tensão, no qual há a possibilidade de ajustar a tensão na carga através do potenciômetro P1. O transistor Q1 tem um comportamento idêntico ao de uma resistência variável.

Pela análise do circuito da Figura 40, é notório que o transistor bipolar Q1 está em série com a fonte e com a carga. Desta forma, conclui-se que a tensão entre o coletor e o emissor é dada pela diferença entre a tensão da fonte e a tensão da carga. Considerando que a corrente que atravessa R1 e P1 é desprezável face à corrente consumida pela carga, conclui-se que a corrente à entrada (na fonte) assume o mesmo valor que a corrente que atravessa o transistor e a carga. Desta forma, a potência dissipada pelo conversor é dada essencialmente pela seguinte expressão:

$$P = V_{CE} \cdot I \quad (7)$$

Em que:

- $P$  é a potência dissipada pelo conversor;
- $V_{CE}$  é a tensão entre o coletor e o emissor do transistor bipolar;
- $I$  é a corrente que atravessa a fonte, o transistor bipolar e a carga.

Através da equação (7) conclui-se que as perdas no conversor variam linearmente com a diferença de tensão entre a fonte e a carga. Por fim, constata-se que a eficiência do conversor é dada pela seguinte expressão:

$$n = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} = \frac{V_S \cdot I}{V_E \cdot I} = \frac{V_S}{V_E} \quad (8)$$

Em que:

- $n$  é o rendimento do conversor, o qual está compreendido na gama [0, 1] (idealmente);
- $P_{Saída}$  é a potência disponibilizada à saída do conversor;
- $P_{Entrada}$  é a potência fornecida pela fonte de alimentação à entrada do conversor;
- $V_E$  é a tensão à entrada do conversor;
- $V_S$  é a tensão à saída do conversor;
- $I$  é a corrente que entra no conversor e que atravessa o transistor bipolar e a carga.

Por exemplo, se a tensão à entrada for de 12 V e o conversor impuser na saída 5 V, a eficiência do sistema será de apenas 41,67%.

Os conversores lineares, também designados por reguladores de tensão, são muito facilmente encontrados no mercado. Os reguladores de tensão mais comuns são o LM78XX [48] para tensões fixas e o LM317 [49] para tensões ajustáveis através de um potenciômetro. A Figura 41 apresenta os esquemas típicos de ligação para esses 2 casos.

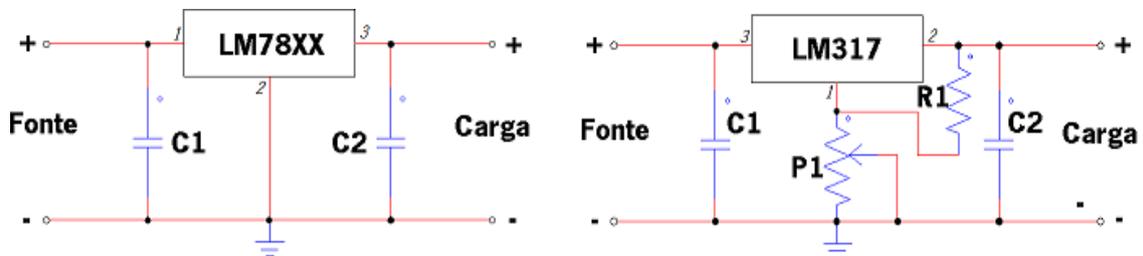


Figura 41 - Esquemas típicos de ligação para os reguladores de tensão LM78XX e LM317.

Os conversores lineares apresentados são do tipo fonte de tensão, isto é, são circuitos que estabelecem uma tensão desejada (constante ou variável no tempo) na respetiva carga. Também existem conversores do tipo fonte de corrente. Estes caracterizam-se por estabelecer uma corrente desejada (constante ou variável no tempo) na respetiva carga. A Figura 42 apresenta um esquema típico de um conversor linear do tipo fonte de corrente.

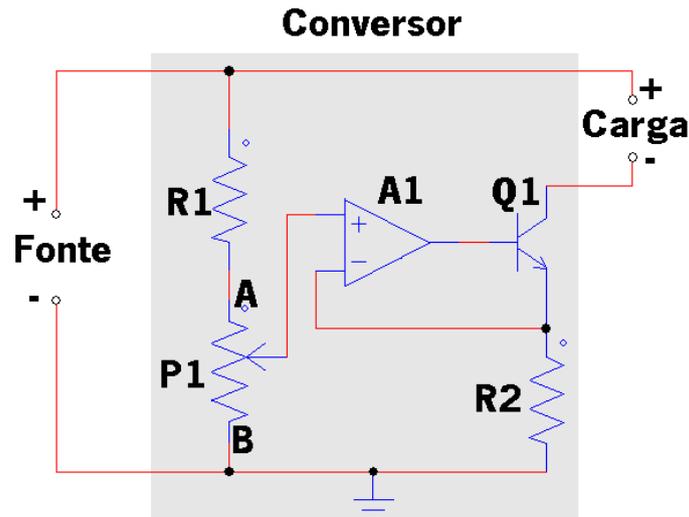


Figura 42 - Esquema de um conversor linear do tipo fonte de corrente. Este conversor estabelece uma corrente constante na carga (dentro de certos limites) cujo valor pode ser ajustado através do potenciômetro P1.

O conversor apresentado na Figura 42 possibilita o ajuste da corrente na carga através do potenciômetro P1. Quando o cursor deste se encontra na posição A a corrente na carga é máxima e quando o cursor se encontra na posição B a corrente na carga é nula. Tal como nos reguladores de tensão, o transistor bipolar Q1 opera na região linear o que leva normalmente, mais uma vez, a um baixo rendimento do sistema. O regulador de tensão LM317 [49] permite a implementação de um conversor linear do tipo fonte de corrente através do esquema apresentado na Figura 43.

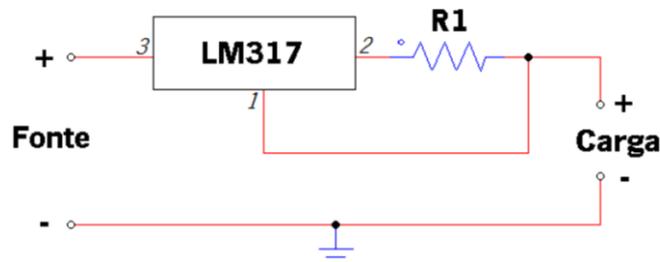


Figura 43 - Esquema do circuito eletrônico, baseado no regulador de tensão LM317, que permite a implementação de um conversor linear do tipo fonte de corrente.

No esquema apresentado na Figura 43 se, por exemplo, a resistência R1 for de  $24 \Omega$ , então a corrente estabelecida na carga será de 50 mA independentemente do valor da tensão à entrada (dentro de determinados limites) [49].

As principais vantagens a destacar dos conversores lineares são a simplicidade do circuito eletrônico que os implementa, o baixo custo e a ausência de comutações de semicondutores – o que reduz o risco de interferência eletromagnética com outros circuitos na proximidade. Em relação aos inconvenientes, é de referir o baixíssimo rendimento (tipicamente compreendido entre

os 10% e os 50%), a impossibilidade de obter tensões ou correntes à saída de valor superior às tensões ou correntes à entrada e o elevado peso e volume (comparando com os conversores comutados) [2] [3]. Estas características fazem com que os conversores lineares sejam usados somente em algumas aplicações cuja potência elétrica não exceda algumas dezenas de watts.

### 3.2. Conversores comutados

Os conversores eletrônicos de potência comutados são circuitos eletrônicos que possibilitam o controlo do fluxo de energia com recurso a semicondutores que operam num estado de condução plena (“ligado”) ou num estado de corte total (“desligado”) [2] [3].

Um semicondutor cujo estado (ligado ou desligado) possa sempre ser definido por um sinal de controlo externo, denomina-se interruptor totalmente controlável (por exemplo, o transistor bipolar). Se um dos estados depender do circuito envolvente, denomina-se interruptor controlável (por exemplo, o tiristor). Se ambos os estados dependerem do circuito envolvente, denomina-se interruptor não-controlável (por exemplo, o diodo) [3].

Os semicondutores mais conhecidos e utilizados em conversores comutados são os díodos, os transistores bipolares, os *MOSFETs* (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), os *IGBTs* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), os tiristores, os *TRIACs* (*Triode for Alternating Current*) e os *GTOs* (*Gate Turn-Off Thyristor*). A Figura 44 apresenta uma visão geral da capacidade que esses semicondutores possuem em termos de tensão, corrente e frequência de comutação.

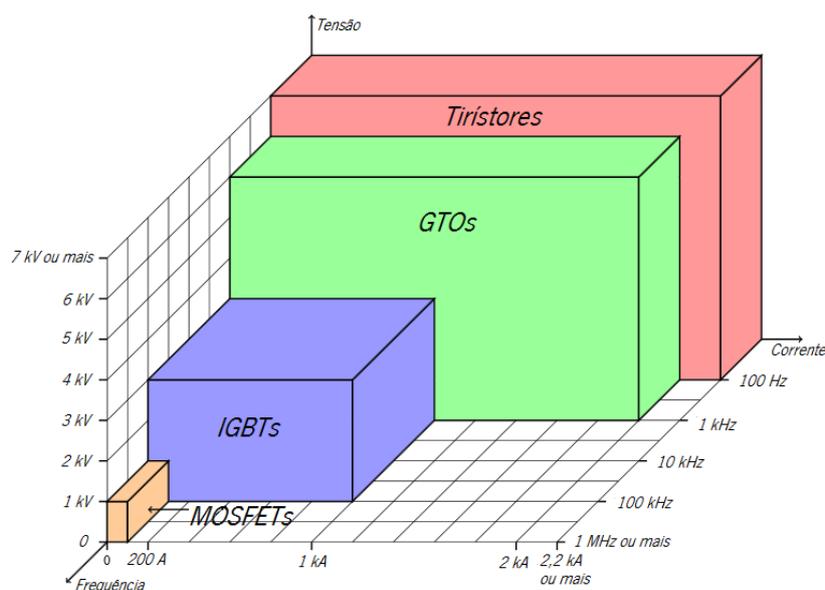


Figura 44 - Visão geral sobre a capacidade que os principais semicondutores de potência possuem (adaptado de [50]).

Para se apresentarem as principais topologias de conversores comutados, é necessário abordar um conceito associado à comutação dos semicondutores – Modulação por Largura de Impulso ou *PWM* (*Pulse Width Modulation*). A modulação *PWM* é uma técnica que consiste na aplicação de um sinal de comando digital (de frequência fixa) a um interruptor totalmente controlável [3]. Na modulação *PWM*, o *duty-cycle* é um parâmetro que se define pela seguinte expressão:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{T_{ON}}{T} = f \cdot T_{ON} \quad (9)$$

Em que:

- $D$  é o *duty-cycle*, que está compreendido na gama [0, 1] (alternativamente, pode ser expresso em percentagem);
- $T_{ON}$  é o intervalo de tempo no qual o interruptor está em condução ou ligado;
- $T_{OFF}$  é o intervalo de tempo no qual o interruptor está ao corte ou desligado;
- $T$  é o período de comutação (resulta da soma de  $T_{ON}$  com  $T_{OFF}$ );
- $f$  é a frequência de comutação (inverso do período de comutação).

A Figura 45 evidencia uma onda modulada por *PWM* com as respetivas grandezas assinaladas.

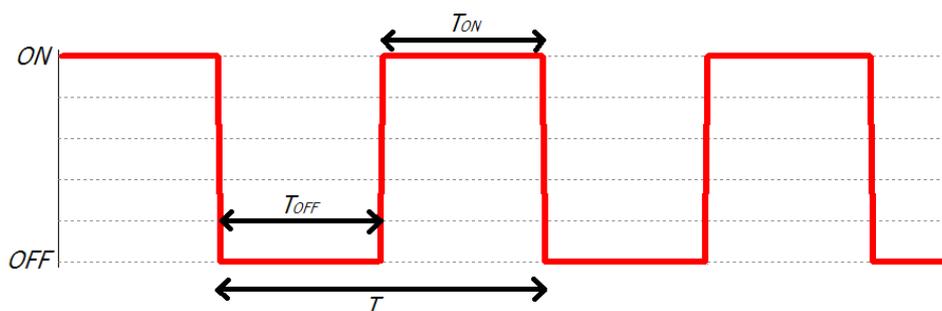


Figura 45 - Onda modulada por *PWM* na qual estão assinaladas as respetivas grandezas.

Uma das formas de gerar uma onda por modulação *PWM* consiste em comparar (analgica ou digitalmente) uma onda portadora de frequência fixa (normalmente triangular) com uma referência. Para todos os instantes de tempo, se a portadora for inferior ou igual à referência liga-se o interruptor. Caso a portadora seja superior à referência desliga-se o interruptor. Na Figura 46 apresenta-se um caso no qual se obteve uma onda modulada por *PWM* com um *duty-cycle* de 80%, a partir da comparação de uma portadora triangular com uma referência constante.

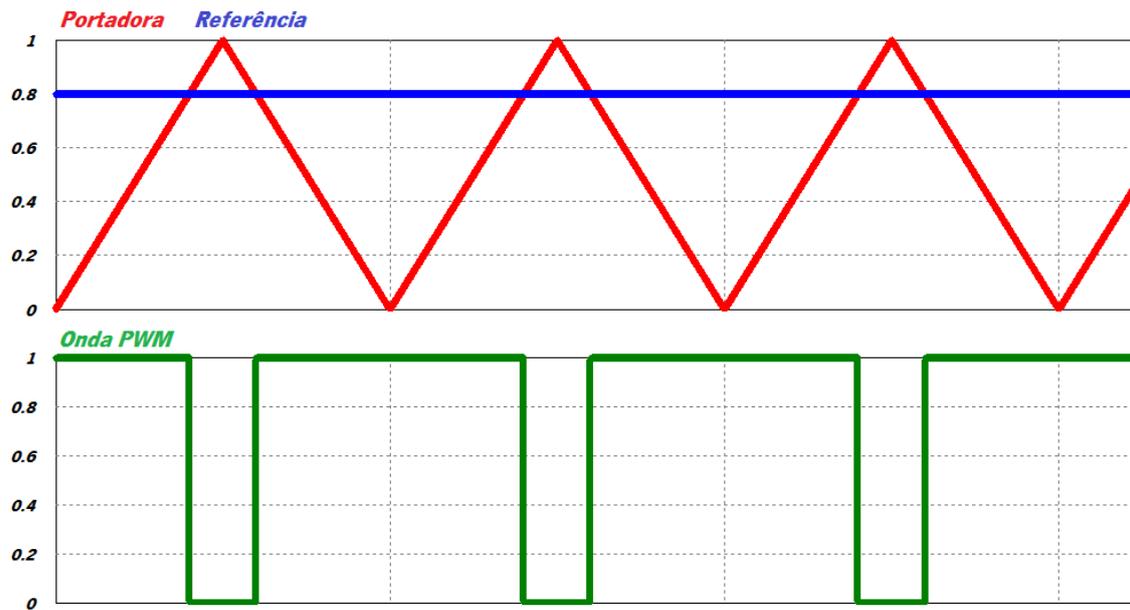


Figura 46 - Obtenção de uma onda modulada por *PWM* através da comparação de uma portadora triangular com uma referência.

As principais topologias de conversores comutados CC – CC (Corrente Contínua – Corrente Contínua) são o *step-down* ou *buck*, o *step-up* ou *boost*, o *step-up-down* ou *buck-boost*, o *SEPIC* (*Single Ended Primary Inductance Converter*) e a ponte H completa [51] [52]. Seguidamente faz-se a apresentação dessas topologias e evidenciam-se as suas principais características, vantagens e inconvenientes.

### 3.2.1. Conversor *step-down* ou *buck*

Este conversor CC – CC, que é do tipo fonte de tensão, permite ajustar convenientemente os níveis de tensão entre uma fonte e uma carga desde que a tensão na carga seja sempre inferior ou igual à da fonte [51]. A Figura 47 apresenta o esquema do circuito elétrico que implementa o conversor *step-down*.

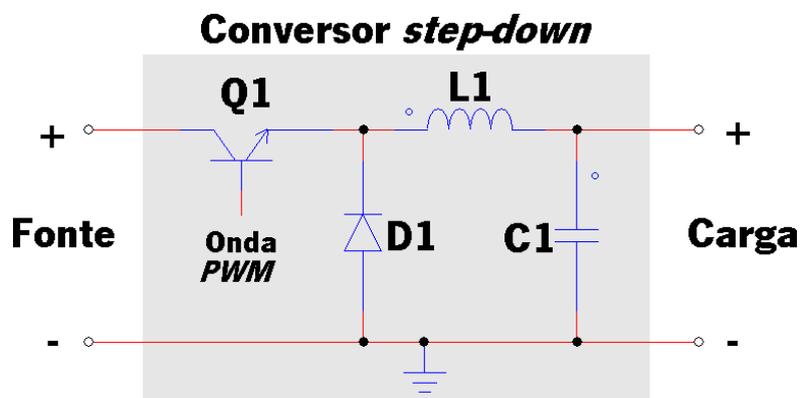


Figura 47 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor *step-down*.

Para se fazer uma análise ao funcionamento deste conversor é necessário considerar duas situações distintas: quando o transistor Q1 está em condução (corresponde ao período  $T_{ON}$  da onda modulada por *PWM*) e quando o transistor Q1 está ao corte (corresponde ao período  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*). A Figura 48 apresenta os esquemas dos circuitos equivalentes para essas duas situações.

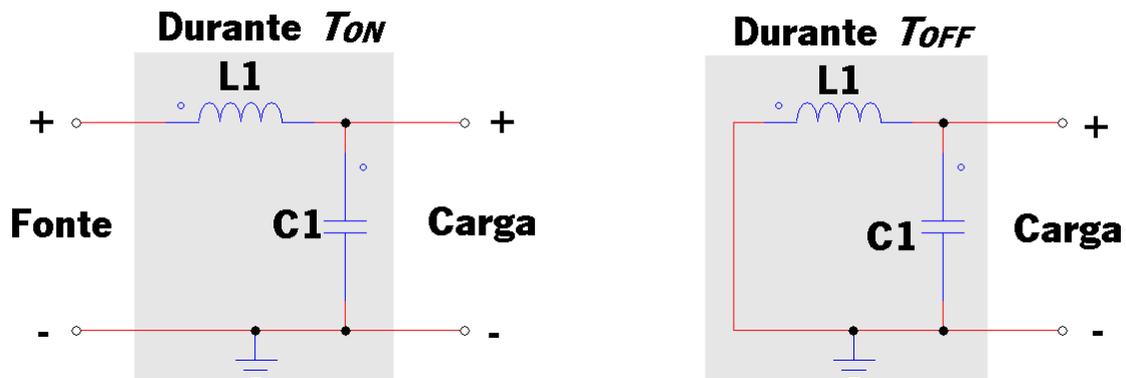


Figura 48 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor *step-down* durante os instantes de tempo  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*.

Durante a análise a seguir apresentada, considera-se que o conversor alimenta uma carga puramente resistiva, que se encontra em regime permanente e em modo de condução contínuo, isto é, assume-se que a corrente na bobina L1 nunca se anula.

A bobina L1 é o elemento fundamental deste conversor pois é responsável por armazenar energia durante  $T_{ON}$  e libertá-la durante  $T_{OFF}$ . Toda a energia que flui para a carga passa pela bobina. Considerando a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga, a corrente  $i_L$  na bobina com indutância L é definida pela seguinte derivada (durante  $T_{ON}$ ):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_E - V_S}{L} \quad (10)$$

Ou por esta derivada (durante  $T_{OFF}$ ):

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_S}{L} \quad (11)$$

A relação entre a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga depende do *duty-cycle*  $D$  da onda modulada por *PWM* através da seguinte relação:

$$\frac{V_S}{V_E} = D \quad (12)$$

O valor médio da corrente  $i_E$  na fonte relaciona-se com o valor médio da corrente  $i_S$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  através da seguinte expressão:

$$\frac{i_S}{i_E} = \frac{1}{D} \quad (13)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta i_L$  na bobina com indutância  $L$  depende do *duty-cycle*  $D$ , da frequência de comutação  $f$ , da tensão  $V_E$  na fonte e da tensão  $V_S$  na carga. Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot (V_E - V_S)}{f \cdot L} \quad (14)$$

O *ripple* de tensão  $\Delta V_S$  na carga depende da bobina com indutância  $L$ , do condensador com capacidade  $C$ , da frequência de comutação  $f$ , da tensão  $V_S$  na carga e do *duty-cycle*  $D$ . Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta V_S = \frac{V_S \cdot (1 - D)}{8 \cdot f^2 \cdot L \cdot C} \quad (15)$$

Na Figura 49 apresentam-se as formas de onda ideais em alguns componentes do conversor *step-down*.

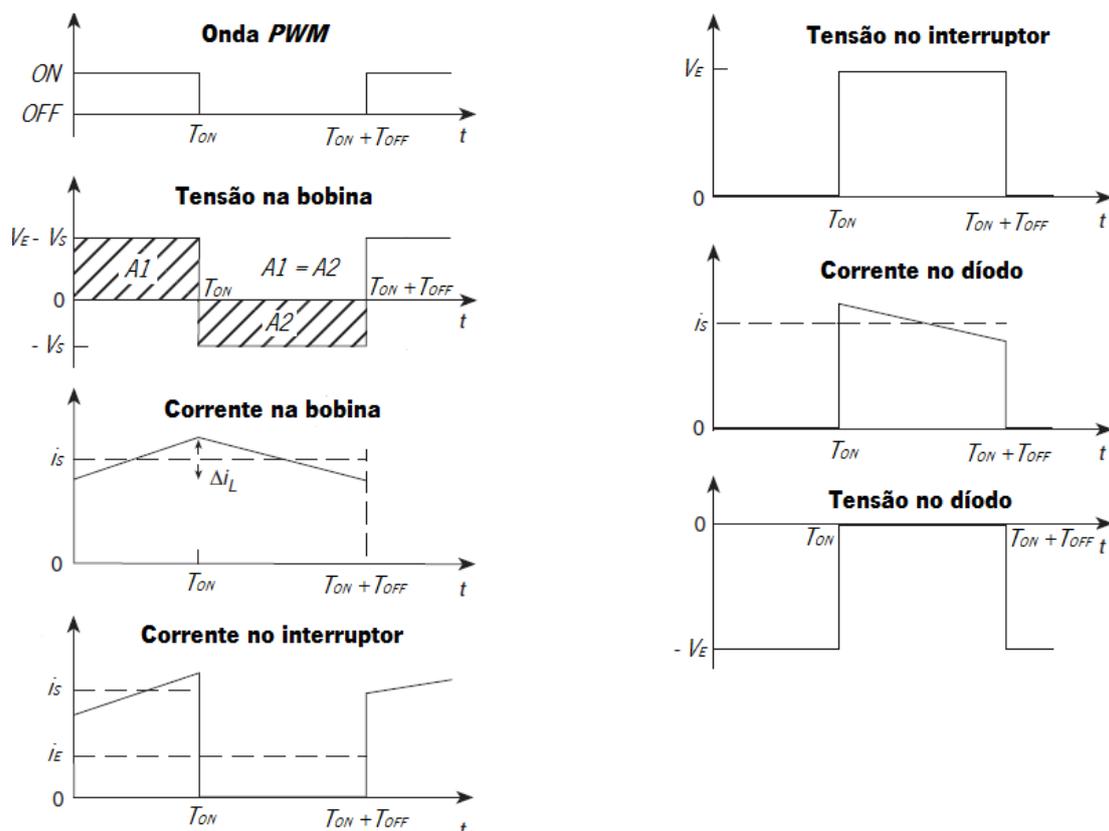


Figura 49 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor *step-down* (adaptado de [51]).

Ao contrário dos conversores lineares, o conversor *step-down* apresenta sempre um rendimento de 100% caso todos os componentes sejam considerados ideais. Na prática, o

rendimento é elevado, situando-se geralmente entre os 70% e os 95%. Por exemplo, o conversor *Pololu D15V35F5S3* [53] apresenta o rendimento descrito pelo gráfico da Figura 50.

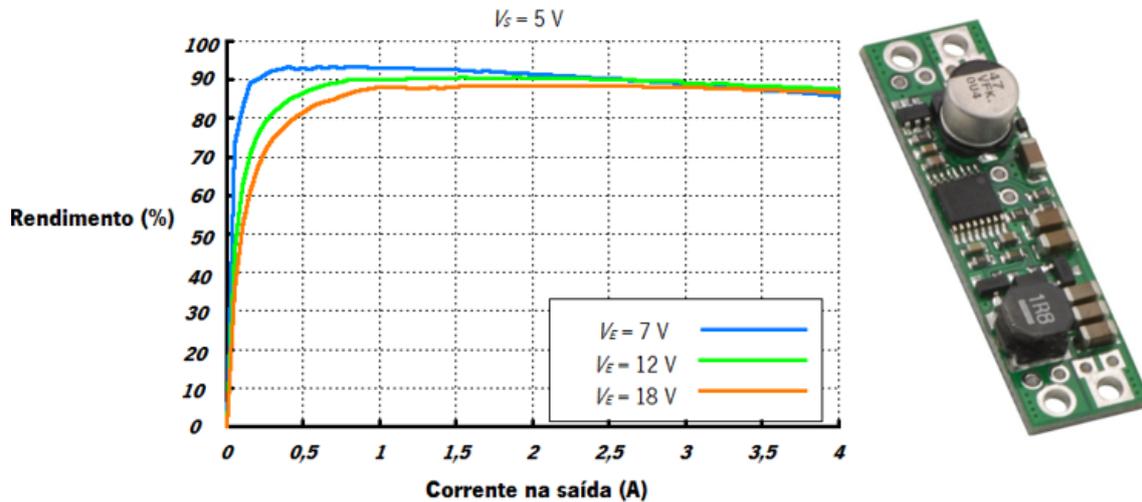


Figura 50 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do *Pololu D15V35F5S3* para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor *step-down* (adaptado de [53]).

Na Figura 51 apresenta-se um gráfico circular que evidencia as perdas (de forma percentual), em termos médios, em cada componente de um conversor *step-down*.

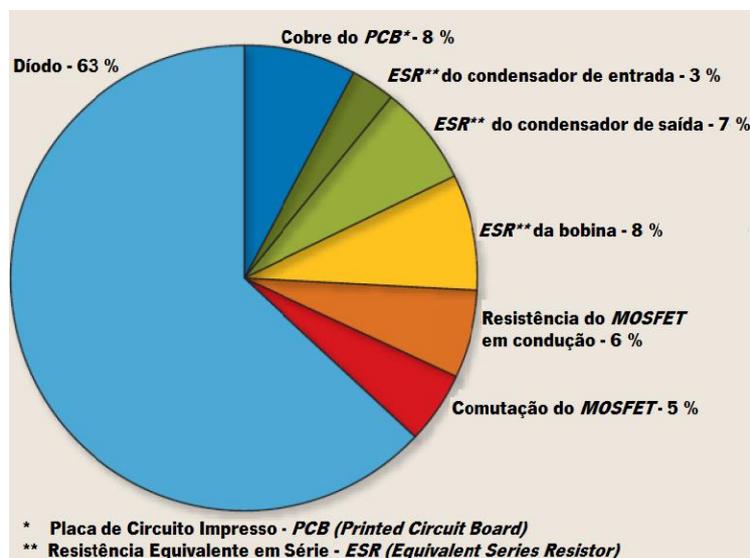


Figura 51 - Perdas percentuais, em termos médios, em cada componente de um conversor *step-down* (adaptado de [54]).

As principais vantagens do conversor *step-down* são o elevado rendimento (mesmo para diferenças significativas de tensão entre a fonte e a carga) e a vasta gama de aplicabilidade. Os principais inconvenientes são o risco de interferência eletromagnética (devido às comutações em alta frequência), a complexidade do projeto e o custo substancialmente elevado [3] [51].

### 3.2.2. Conversor *step-up* ou *boost*

Este conversor CC – CC, que é do tipo fonte de tensão, permite ajustar convenientemente os níveis de tensão entre uma fonte e uma carga desde que a tensão na carga seja sempre igual ou superior à da fonte [51]. A Figura 52 apresenta o esquema do circuito elétrico que implementa o conversor *step-up*.

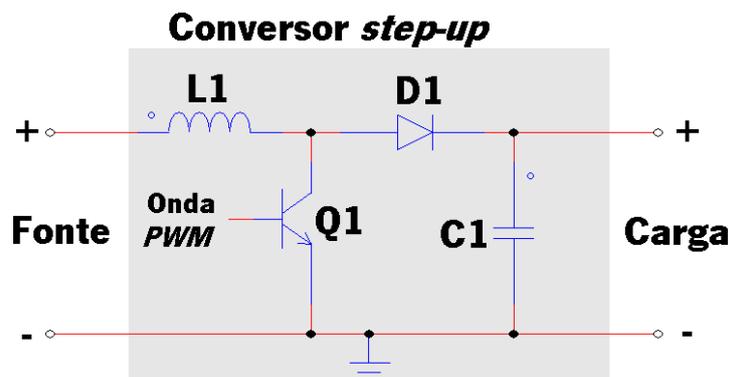


Figura 52 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor *step-up*.

Para se fazer uma análise ao funcionamento do conversor *step-up* é necessário considerar duas situações distintas: quando o transistor Q1 está em condução (corresponde ao período  $T_{ON}$  da onda modulada por *PWM*) e quando o transistor Q1 está ao corte (corresponde ao período  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*). A Figura 53 apresenta os esquemas dos circuitos equivalentes para essas duas situações.

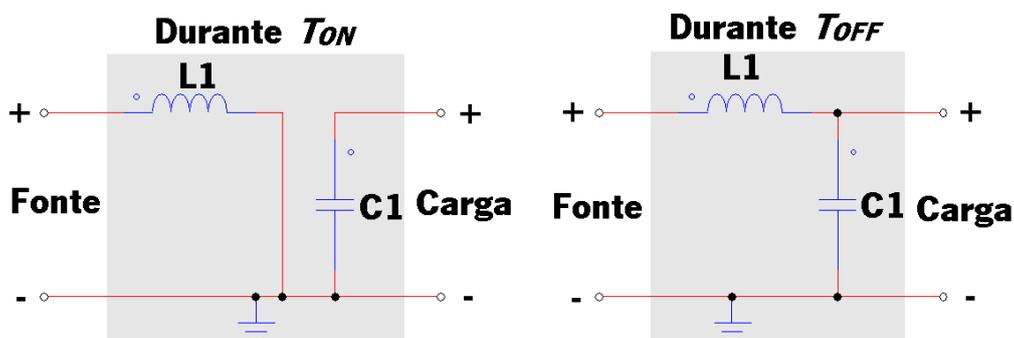


Figura 53 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor *step-up* durante os instantes de tempo  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*.

Durante a análise a seguir apresentada, considera-se que o conversor alimenta uma carga puramente resistiva, que se encontra em regime permanente e em modo de condução contínuo, isto é, assume-se que a corrente na bobina L1 nunca se anula.

Tal como no conversor *step-down*, a bobina L1 é o elemento fundamental deste conversor pois é responsável por armazenar energia durante  $T_{ON}$  e libertá-la durante  $T_{OFF}$  [55]. Toda a energia

que flui para a carga passa pela bobina. Considerando a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga, a corrente  $i_L$  na bobina com indutância  $L$  é definida pela seguinte derivada (durante  $T_{ON}$ ):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_E}{L} \quad (16)$$

Ou por esta derivada (durante  $T_{OFF}$ ):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_E - V_S}{L} \quad (17)$$

A relação entre a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga depende do *duty-cycle*  $D$  da onda modulada por *PWM* através da seguinte relação:

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{1}{1 - D} \quad (18)$$

O valor médio da corrente  $i_E$  na fonte relaciona-se com o valor médio da corrente  $i_S$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  através da seguinte expressão:

$$\frac{i_S}{i_E} = 1 - D \quad (19)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta I_L$  na bobina com indutância  $L$  depende do *duty-cycle*  $D$ , da frequência de comutação  $f$  e da tensão  $V_E$  na fonte. Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot V_E}{f \cdot L} \quad (20)$$

O *ripple* de tensão  $\Delta V_S$  na carga depende do condensador com capacidade  $C$ , da frequência de comutação  $f$ , do valor médio da corrente  $i_S$  na carga e do *duty-cycle*  $D$ . Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta V_S = \frac{D \cdot i_S}{f \cdot C} \quad (21)$$

Na Figura 54 apresentam-se as formas de onda ideais em alguns componentes do conversor *step-up*.

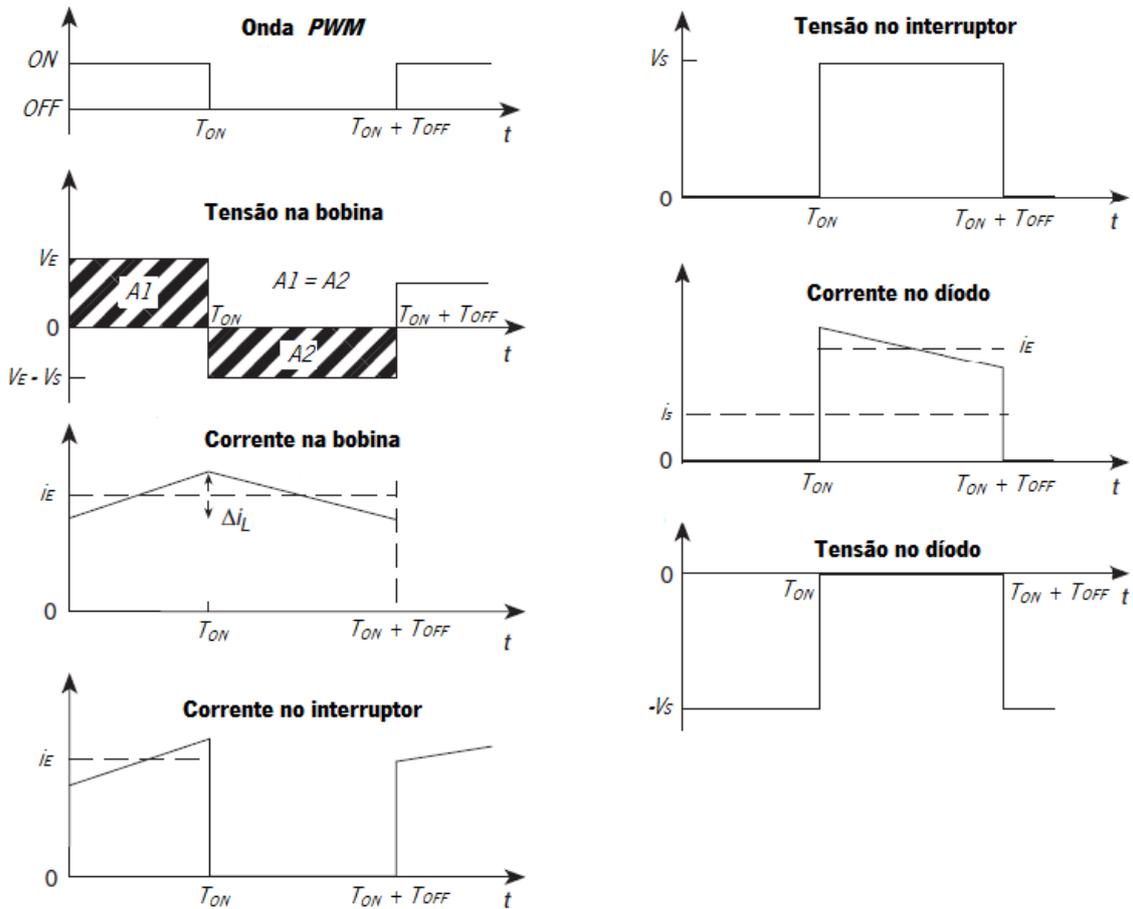


Figura 54 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor *step-up* (adaptado de [51])

Em oposição aos conversores lineares, o conversor *step-up* apresenta sempre um rendimento de 100% caso todos os componentes sejam considerados ideais. Na prática, o rendimento é elevado, situando-se geralmente entre os 70% e os 95%. Por exemplo, o conversor *Pololu U1V10F5* [56] apresenta o rendimento descrito pelo gráfico da Figura 55.

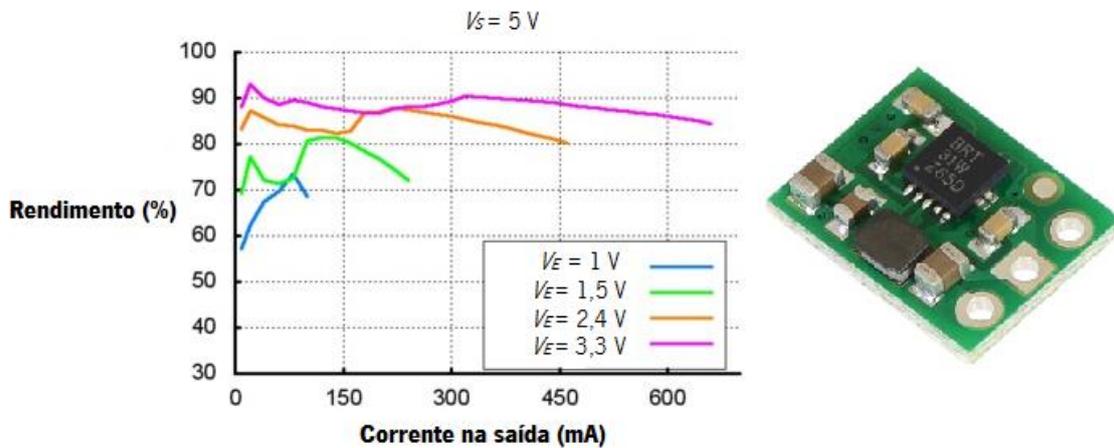


Figura 55 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do *Pololu U1V10F5* para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor *step-up* (adaptado de [56]).

As principais vantagens do conversor *step-up* são o elevado rendimento, a vasta gama de aplicabilidade e a possibilidade de obter valores de tensão na carga superiores aos da fonte. As principais desvantagens são o risco de interferência eletromagnética (devido às comutações em alta frequência), a complexidade do projeto, o custo substancialmente elevado e o facto de os efeitos parasitas no conversor limitarem o valor máximo da tensão na carga a cerca de 3 a 4 vezes o valor da tensão na fonte (corresponde tipicamente a um *duty-cycle* máximo de 85%) [3] [51].

### 3.2.3. Conversor *step-up-down* ou *buck-boost*

O conversor *step-up-down*, que é do tipo fonte de tensão, permite ajustar convenientemente os níveis de tensão entre uma fonte e uma carga para valores de tensão na carga inferiores, iguais ou superiores aos da fonte [51]. A tensão na carga tem sempre a polaridade invertida em relação à da fonte, conforme a Figura 56 evidencia.

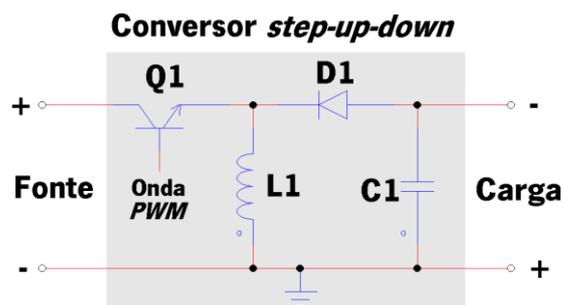


Figura 56 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor *step-up-down*.

Para se fazer uma análise ao funcionamento deste conversor é necessário considerar duas situações distintas: quando o transistor Q1 está em condução (corresponde ao período  $T_{ON}$  da onda modulada por *PWM*) e quando o transistor Q1 está ao corte (corresponde ao período  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*). A Figura 57 apresenta os esquemas dos circuitos equivalentes para essas duas situações.

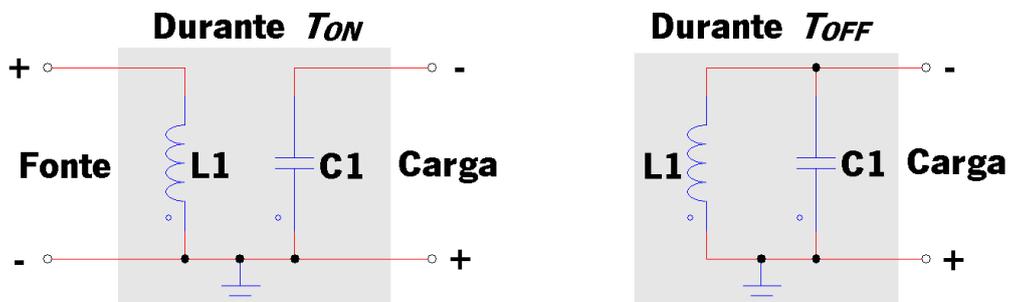


Figura 57 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor *step-up-down* durante os instantes de tempo  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*.

Durante a análise a seguir apresentada, quando se fizer referência à tensão  $V_S$  na carga considera-se sempre o módulo dessa tensão. Considera-se também que o conversor alimenta uma carga puramente resistiva, que se encontra em regime permanente e em modo de condução contínuo, isto é, assume-se que a corrente na bobina L1 nunca se anula.

Tal como no conversor *step-up*, a bobina L1 é o elemento fundamental deste conversor pois é responsável por armazenar energia durante  $T_{ON}$  e libertá-la durante  $T_{OFF}$  [57]. Toda a energia que flui para a carga passa pela bobina. Considerando a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga, a corrente  $i_L$  na bobina com indutância L é definida pela seguinte derivada (durante  $T_{ON}$ ):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_E}{L} \quad (22)$$

Ou por esta derivada (durante  $T_{OFF}$ ):

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_S}{L} \quad (23)$$

A relação entre a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga depende do *duty-cycle*  $D$  da onda modulada por *PWM* através da seguinte relação:

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{D}{1-D} \quad (24)$$

O valor médio da corrente  $i_E$  na fonte relaciona-se com o valor médio da corrente  $i_S$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  através da seguinte expressão:

$$\frac{i_S}{i_E} = \frac{1-D}{D} \quad (25)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta I_L$  na bobina com indutância L depende do *duty-cycle*  $D$ , da frequência de comutação  $f$  e da tensão  $V_E$  na fonte. Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot V_E}{f \cdot L} \quad (26)$$

O *ripple* de tensão  $\Delta V_S$  na carga depende do condensador com capacidade C, da frequência de comutação  $f$ , do valor médio da corrente  $i_S$  na carga e do *duty-cycle*  $D$ . Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta V_S = \frac{D \cdot i_S}{f \cdot C} \quad (27)$$

Na Figura 58 apresentam-se as formas de onda ideais em alguns componentes do conversor *step-up-down*.

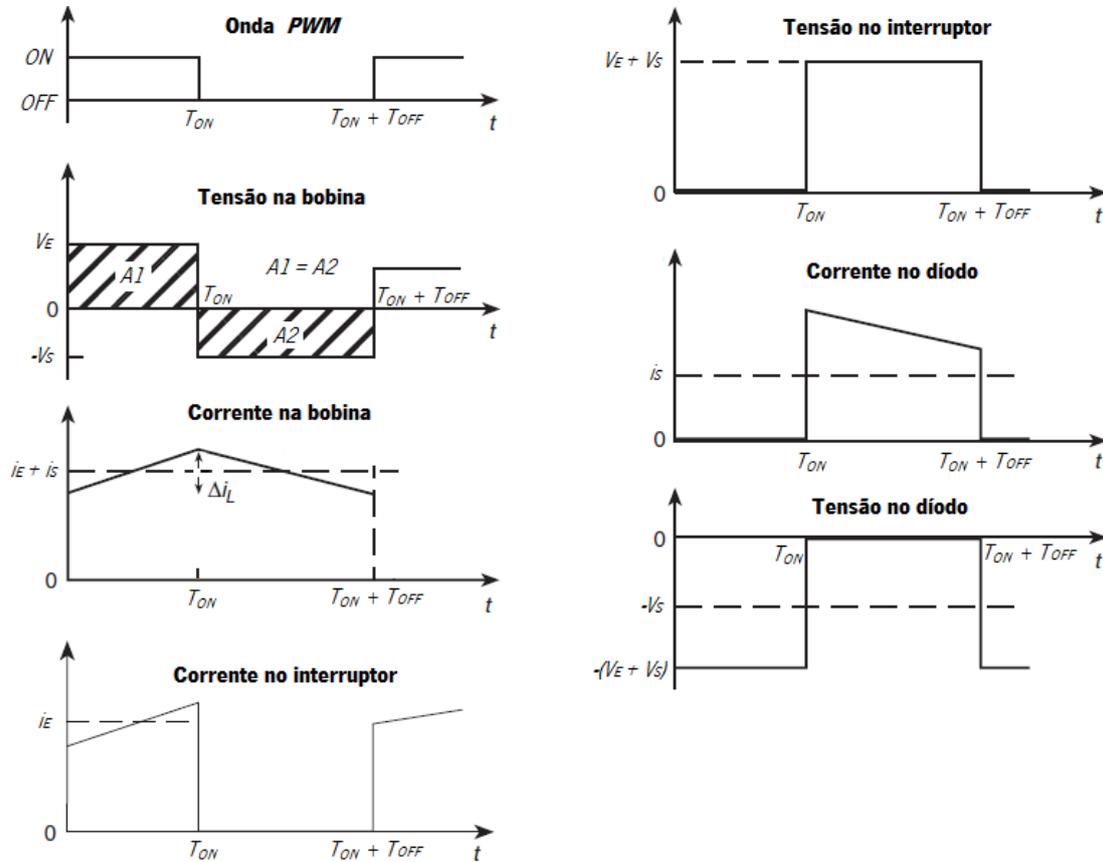


Figura 58 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor *step-up-down* (adaptado de [51])

Em oposição aos conversores lineares, o conversor *step-up-down* apresenta sempre um rendimento de 100% caso todos os componentes sejam considerados ideais. Na prática, o rendimento é elevado, situando-se geralmente entre os 70% e os 95%. Por exemplo, o conversor *Pololu S7V7F5* [58] apresenta o rendimento descrito pelo gráfico da Figura 59.

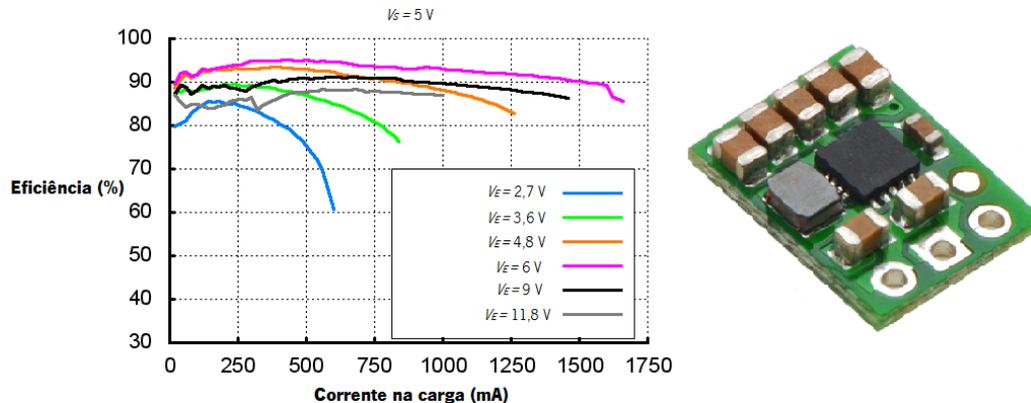


Figura 59 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do *Pololu S7V7F5* para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor *step-up-down* (adaptado de [58]).

As principais vantagens do conversor *step-up-down* são o elevado rendimento, a vasta gama de aplicabilidade e a possibilidade de obter valores de tensão na carga inferiores, iguais ou superiores aos da fonte. As principais desvantagens são o facto de a tensão na carga ter sempre a polaridade invertida em relação à tensão da fonte, o risco de interferência eletromagnética (devido às comutações em alta frequência), a complexidade do projeto, o custo substancialmente elevado e o facto de os efeitos parasitas no conversor limitarem o valor máximo da tensão na carga a cerca de 3 a 4 vezes o valor da tensão na fonte (corresponde tipicamente a um *duty-cycle* máximo de 85%) [3] [51].

### 3.2.4. Conversor *SEPIC* (*Single Ended Primary Inductance Converter*)

O conversor *SEPIC*, que é do tipo fonte de tensão, permite ajustar convenientemente os níveis de tensão entre uma fonte e uma carga para valores de tensão na carga inferiores, iguais ou superiores aos da fonte. Este conversor reúne, num único circuito, as principais vantagens dos conversores *step-down*, *step-up* e *step-up-down* [59] [60]:

- O valor da tensão na carga pode ser inferior, igual ou superior ao da fonte;
- A tensão na carga tem a mesma polaridade que a tensão na fonte;
- O interruptor totalmente controlável é referenciado à massa do circuito (normalmente recorre-se um *MOSFET* de canal N), o que simplifica o circuito de *drive* do mesmo;
- Quando o interruptor totalmente controlável é permanentemente desligado, o valor da tensão na carga tende efetivamente para 0 V;
- A existência de uma bobina em série com a fonte possibilita o consumo de corrente elétrica com forma de onda triangular, o que aumenta o tempo útil de vida da fonte e minimiza o risco de interferência eletromagnética com circuitos na proximidade. A forma de onda da corrente na entrada dos conversores *step-down* e *step-up-down* é quadrada, o que geralmente é prejudicial para a fonte (sobretudo se se tratar de uma bateria).

Na Figura 60 apresenta-se o esquema do circuito elétrico que implementa o conversor *SEPIC*.

### Conversor *SEPIC*

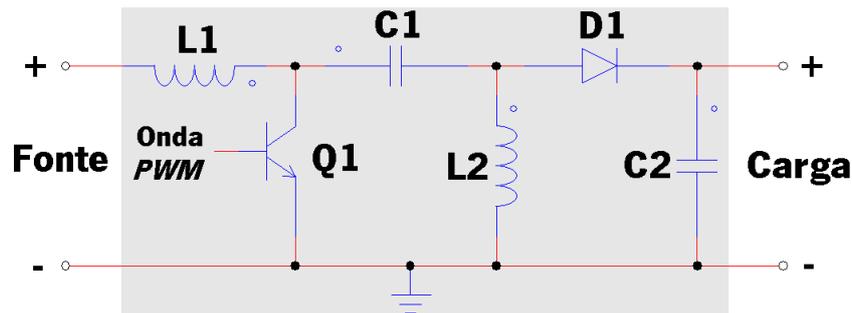


Figura 60 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor *SEPIC*.

Para se fazer uma análise ao funcionamento deste conversor é necessário considerar duas situações distintas: quando o transistor Q1 está em condução (corresponde ao período  $T_{ON}$  da onda modulada por *PWM*) e quando o transistor Q1 está ao corte (corresponde ao período  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*). A Figura 61 apresenta os esquemas dos circuitos equivalentes para essas duas situações.

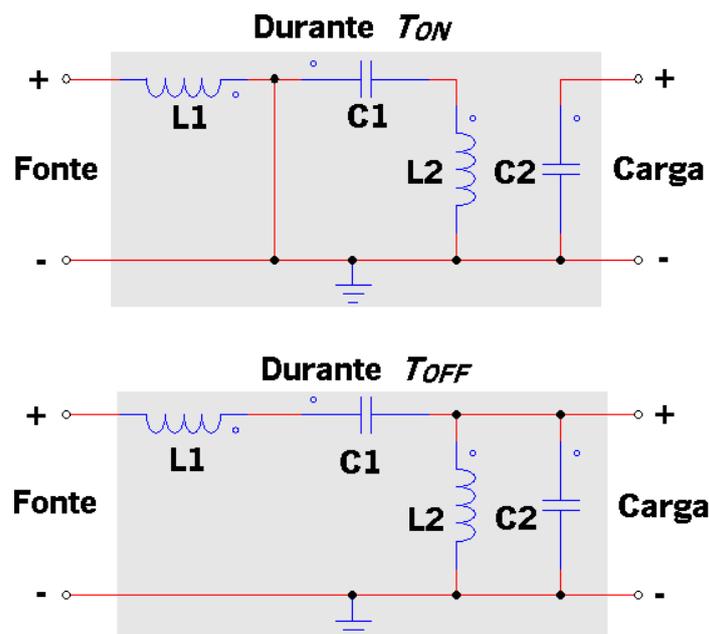


Figura 61 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor *SEPIC* durante os instantes de tempo  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  da onda modulada por *PWM*.

Durante a análise a seguir apresentada, considera-se que o conversor alimenta uma carga puramente resistiva, que se encontra em regime permanente e em modo de condução contínuo, isto é, assume-se que a corrente na bobina L1 nunca se anula.

A bobina L1 é um dos elementos fundamentais deste conversor pois é responsável por armazenar energia durante  $T_{ON}$  e libertá-la durante  $T_{OFF}$  [60]. Toda a energia que flui para a carga

passa por essa bobina. Considerando a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga, a corrente  $i_{L1}$  na bobina L1 com indutância L é definida pela seguinte derivada (durante  $T_{ON}$ ):

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_E}{L} \quad (28)$$

Ou por esta derivada (durante  $T_{OFF}$ ):

$$\frac{di_{L1}}{dt} = -\frac{V_S}{L} \quad (29)$$

Considerando a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga, a corrente  $i_{L2}$  na bobina L2 com indutância L é definida pela seguinte derivada (durante  $T_{ON}$ ):

$$\frac{di_{L2}}{dt} = -\frac{V_E}{L} \quad (30)$$

Ou por esta derivada (durante  $T_{OFF}$ ):

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (31)$$

A relação entre a tensão  $V_E$  na fonte e a tensão  $V_S$  na carga depende do *duty-cycle*  $D$  da onda modulada por *PWM* através da seguinte relação:

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{D}{1-D} \quad (32)$$

O valor médio da corrente  $i_E$  na fonte relaciona-se com o valor médio da corrente  $i_S$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  através da seguinte expressão:

$$\frac{i_S}{i_E} = \frac{1-D}{D} \quad (33)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta I_{L1}$  na bobina L1 com indutância L depende do *duty-cycle*  $D$ , da frequência de comutação  $f$  e da tensão  $V_E$  na fonte. Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta I_{L1} = \frac{D \cdot V_E}{f \cdot L} \quad (34)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta I_{L2}$  na bobina L2 com indutância L depende do *duty-cycle*  $D$ , da frequência de comutação  $f$  e da tensão  $V_E$  na fonte. Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta I_{L2} = \frac{D \cdot V_E}{f \cdot L} \quad (35)$$

As expressões (34) e (35) são iguais, o que significa que o valor do *ripple* de corrente em ambas as bobinas depende dos mesmos fatores. Para além disto, constata-se que em cada instante é aplicada a mesma tensão às duas bobinas – este facto permite fazer o acoplamento magnético das mesmas, baixando para metade o *ripple* de corrente nelas.

O *ripple* de tensão  $\Delta V_S$  na carga depende do condensador com capacidade  $C$ , da frequência de comutação  $f$ , do valor médio da corrente  $i_S$  na carga e do *duty-cycle*  $D$ . Essa dependência é descrita pela seguinte expressão:

$$\Delta V_S = \frac{D \cdot i_S}{f \cdot C} \quad (36)$$

Na Figura 62 apresentam-se as formas de onda ideais em alguns componentes do conversor *SEPIC*.

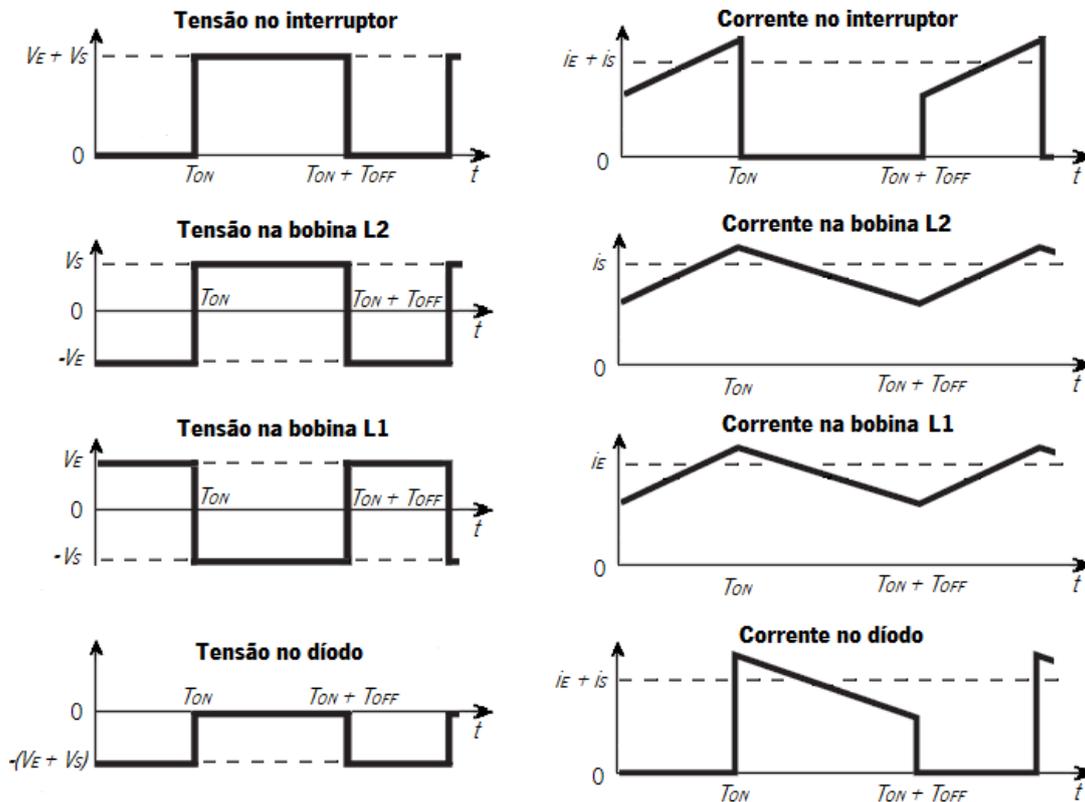


Figura 62 - Formas de onda ideais em alguns dos componentes do conversor *SEPIC* (adaptado de [60]).

Por se tratar de um conversor comutado, o *SEPIC* apresenta sempre um rendimento elevado, situando-se geralmente entre os 70% e os 85%. Por exemplo, o conversor *Pololu S10V2F12* [61] apresenta o rendimento descrito pelo gráfico da Figura 63.

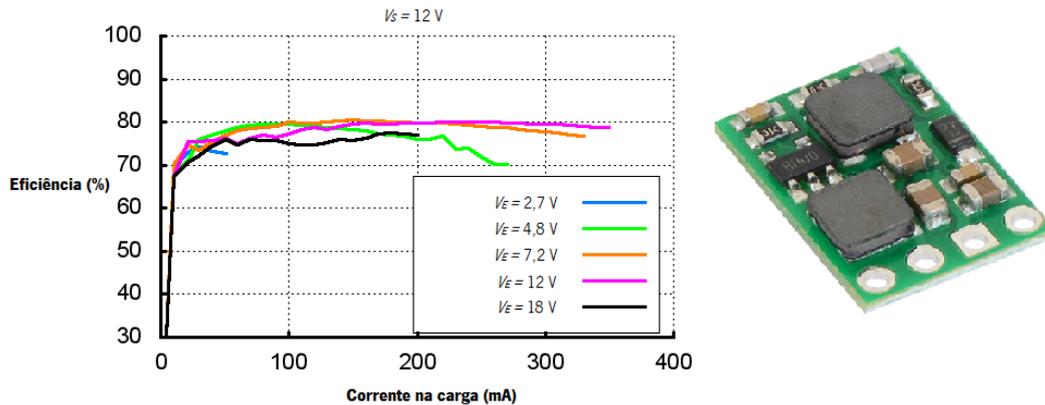


Figura 63 - À esquerda apresenta-se um gráfico que evidencia o rendimento do *Pololu S10V2F12* para diferentes pontos de funcionamento. À direita evidencia-se esse conversor *SEPIC* (adaptado de [61]).

As principais vantagens do conversor *SEPIC* são o elevado rendimento (quase tão elevado como o dos conversores *step-down*, *step-up* e *step-up-down*), a vasta gama de aplicabilidade e o facto de juntar num único circuito as vantagens dos 3 conversores comutados anteriormente apresentados. Os principais inconvenientes a referir são o facto de o circuito usar um número substancialmente maior de componentes eletrónicos que os 3 conversores comutados anteriormente apresentados, o risco de interferência eletromagnética (devido às comutações em alta frequência), a complexidade do projeto, o custo substancialmente elevado e o facto de os efeitos parasitas no conversor limitarem o valor máximo da tensão na carga a cerca de 3 a 4 vezes o valor da tensão na fonte (corresponde tipicamente a um *duty-cycle* máximo de 85%) [59] [60].

### 3.2.5. Conversor ponte H completa

A ponte H completa trata-se de um conversor eletrónico de potência que possibilita o ajuste dos níveis de tensão entre uma fonte e uma carga desde que o módulo do valor da tensão na carga seja sempre igual ou inferior ao da fonte [51]. Trata-se de um dos conversores mais usados na indústria para fazer o acionamento de máquinas elétricas uma vez que, comparativamente a todos os que já foram referidos, apresenta as seguintes vantagens:

- Se necessário, a tensão na carga pode inverter a polaridade em relação à tensão da fonte;
- Possibilidade de operar nos 4 quadrantes, isto é, os valores de tensão e/ou de corrente na carga podem ser positivos ou negativos. Significa isto que a ponte H completa é bidirecional pois oferece a possibilidade de a energia elétrica fluir nos 2 sentidos.

Na Figura 64 apresenta-se o esquema do circuito elétrico que implementa o conversor ponte H completa.

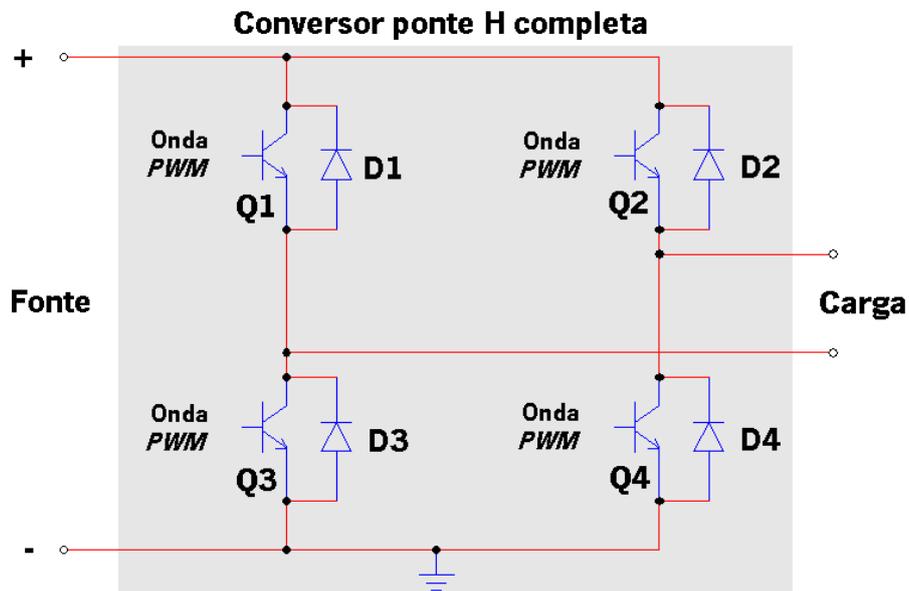


Figura 64 - Esquema elétrico do circuito que implementa o conversor ponte H completa.

Este conversor apresenta uma complexidade adicional no circuito de comando pois há a necessidade de fazer a gestão do estado dos 4 interruptores totalmente controláveis. Os diodos são necessários para evitar sobretensões nos interruptores totalmente controláveis sempre que a carga tem uma componente indutiva (por exemplo, os motores elétricos de corrente contínua). Os diodos entram naturalmente em condução sempre que o fluxo normal de energia é invertido, isto é, sempre que energia flui da carga para a fonte.

Tendo por base a nomenclatura da Figura 64, as seguintes situações nunca podem ocorrer pois provocam um curto-circuito (normalmente o circuito de comando já as prevê através de funções diretamente implementadas em *hardware* tais como o *interlock* e o *dead-time*) [51]:

- Transistores Q1 e Q3 em condução simultaneamente;
- Transistores Q2 e Q4 em condução simultaneamente.

Os transistores da ponte H completa podem ser comandados através de uma modulação bipolar ou unipolar [3] [51]. Considerando a onda modulada por *PWM* no transistor Q1, na modulação bipolar aplica-se a seguinte estratégia de controlo:

- Durante  $T_{ON}$ : transistores Q1 e Q4 em condução e transistores Q2 e Q3 desligados;
- Durante  $T_{OFF}$ : transistores Q2 e Q3 em condução e transistores Q1 e Q4 desligados;

Na Figura 65 apresenta-se as formas de onda resultantes da modulação bipolar aplicada à ponte H completa quando esta alimenta uma carga resistiva. De salientar que a tensão na carga pode assumir apenas 2 valores instantâneos (tensão na fonte ou simétrico da tensão na fonte).

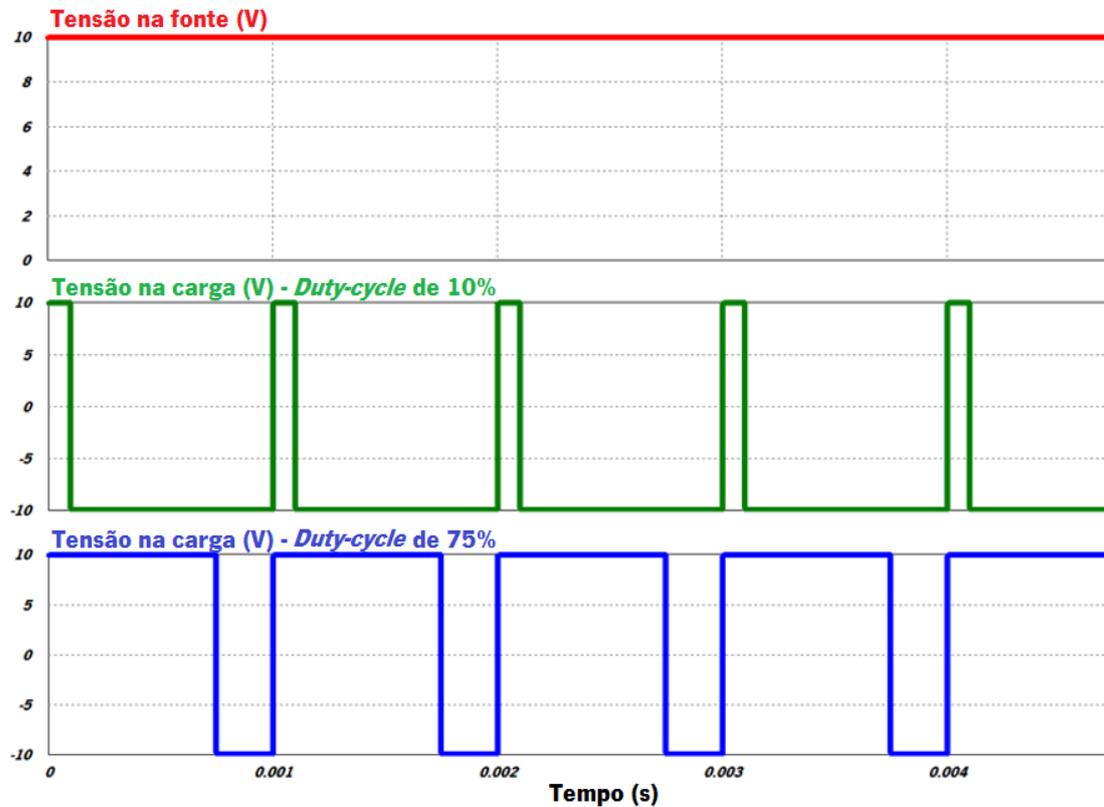


Figura 65 - Formas de onda ideais na ponte H completa quando esta alimenta uma carga resistiva. Considera-se uma fonte com tensão nominal de 10 V, semicondutores a comutarem a 1 kHz e *duty-cycle* de 10% e 75%.

Na modulação bipolar, a relação entre o valor médio da tensão  $V_E$  na fonte e da tensão  $V_S$  na carga depende do *duty-cycle*  $D$  da onda modulada por *PWM* através da seguinte relação:

$$\frac{V_S}{V_E} = 2 \cdot D - 1 \quad (37)$$

Considerando a onda modulada por *PWM* no transistor Q1, na modulação unipolar aplica-se a seguinte estratégia de controlo:

- Se o valor médio da tensão na carga for igual ou superior a zero:
  - Durante  $T_{ON}$ : transístores Q1 e Q4 em condução e transístores Q2 e Q3 desligados;
  - Durante  $T_{OFF}$ : transístores Q3 e Q4 em condução e transístores Q1 e Q2 desligados.
- Se o valor médio da tensão na carga for inferior a zero:
  - Durante  $T_{ON}$ : transístores Q2 e Q3 em condução e transístores Q1 e Q4 desligados;
  - Durante  $T_{OFF}$ : transístores Q1 e Q2 em condução e transístores Q3 e Q4 desligados.

Na Figura 66 apresenta-se as formas de onda resultantes da modulação unipolar aplicada à ponte H completa. De salientar que a tensão na carga pode assumir apenas 3 valores instantâneos (tensão na fonte, zero ou simétrico da tensão na fonte) e que a sua frequência é o dobro da frequência de comutação dos semicondutores.

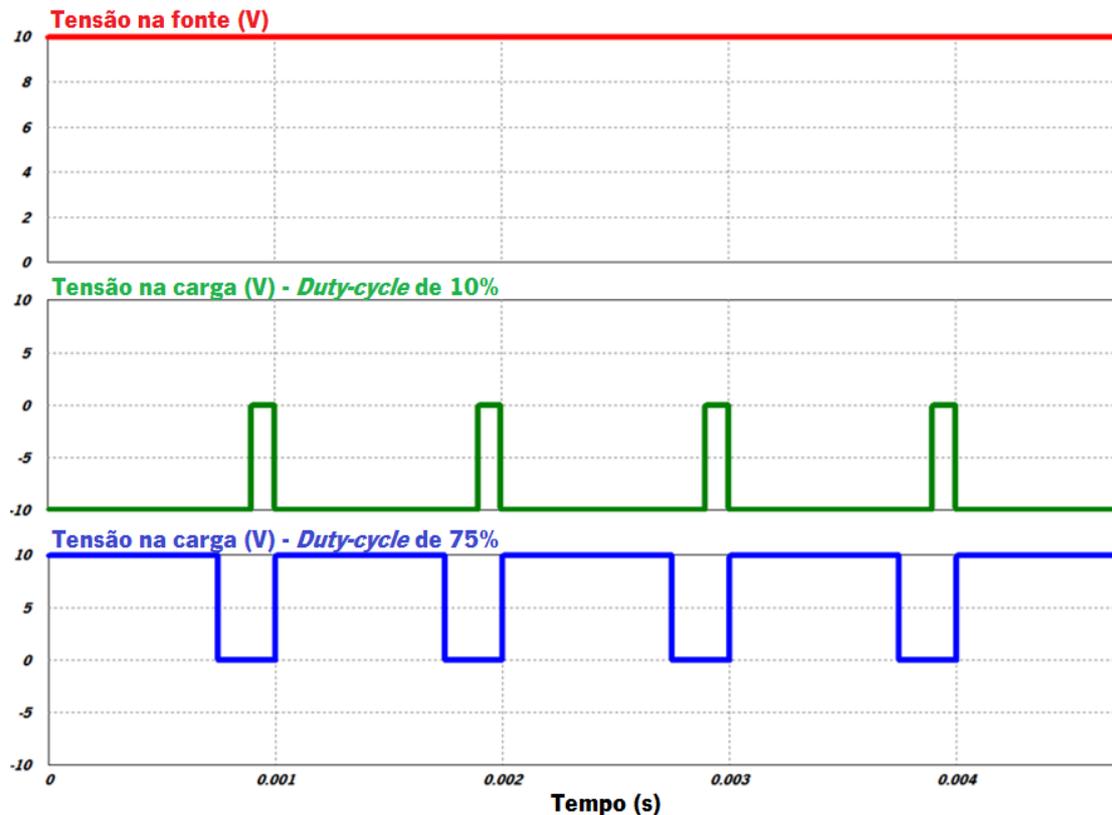


Figura 66 - Formas de onda ideais na ponte H completa quando esta alimenta uma carga resistiva. Considera-se uma fonte com tensão nominal de 10 V, semicondutores a comutarem a 500 Hz e *duty-cycle* de 10% e 75%.

A equação (37) que relaciona o valor médio da tensão  $V_E$  na fonte com a tensão  $V_S$  na carga é válida para a modulação unipolar. As duas figuras anteriores apresentam exemplos de modulação bipolar e unipolar em que o valor do *duty-cycle* da onda modulada por *PWM* é constante (10% e 75%). A ponte H completa possibilita a obtenção de uma tensão alternada sinusoidal, a partir da tensão contínua da fonte, se forem adicionados filtros entre a saída do conversor e a carga e se o *duty-cycle* for definido da seguinte forma:

$$D = 0,5 + A \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) \tag{38}$$

Em que:

- $D$  é o *duty-cycle*, o qual está compreendido na gama [0, 1];
- $\alpha$  é a fase da onda sinusoidal sintetizada que está compreendida na gama [0,  $2\pi$ ];

- $A$  é um parâmetro que define a amplitude da onda sinusoidal sintetizada e que está compreendido na gama  $[0; 0,5]$ ;
- $\omega$  é frequência angular da onda sinusoidal sintetizada;
- $t$  é o instante de tempo.

Esta técnica de modulação designa-se *SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)* [3] [51]. Os variadores eletrónicos de velocidade, amplamente utilizados na indústria, são um dos exemplos mais comuns de dispositivos que recorrem à ponte H completa e à modulação *SPWM* para fazer o acionamento de motores eléctricos de indução.

Na Figura 67 apresenta-se o conversor *Pololu High-Power Motor Driver 18v25* e uns variadores eletrónicos de velocidade desenvolvidos pela empresa WEG, pois são exemplos de aplicações para a ponte H completa.



Figura 67 - Conversor *Pololu High-Power Motor Driver 18v25* e variadores de velocidade desenvolvidos pela empresa WEG (adaptado de [62] e [63] respetivamente).

As principais vantagens da ponte H completa são o elevado rendimento (por se tratar de um conversor comutado), a vasta gama de aplicabilidade (sobretudo na indústria para fazer o acionamento de motores eléctricos), o facto de ser possível inverter a polaridade da tensão na carga, a bidirecionalidade do conversor e o facto de, o mesmo circuito, ser capaz de operar como um conversor CC-CC ou CC-CA. Os principais inconvenientes a referir são a complexidade acrescida do circuito de comando pois é necessário gerir o estado de todos os interruptores totalmente controláveis, o risco de interferência eletromagnética (devido às comutações em alta frequência), a complexidade do projeto e o custo substancialmente elevado (sobretudo quando a potência na carga é da ordem dos milhares de watts) [3] [51] [64].



## 4. Sistema de alimentação

Neste capítulo apresenta-se o trabalho realizado no âmbito do sistema de alimentação energeticamente otimizado, cujo principal objetivo é alimentar adequadamente o sistema de controlo da locomoção da plataforma móvel omnidirecional.

O complexo sistema de alimentação energeticamente otimizado dá continuidade ao trabalho apresentado em [65] e pode ser decomposto nos seguintes subsistemas (em que cada um apresenta um propósito bem definido e bem diferenciado):

- Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores;
- Gestão otimizada da energia armazenada;
- Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção.

Neste capítulo, em primeiro lugar, apresentam-se a arquitetura, as especificações e as vantagens que o sistema de alimentação possui. Seguidamente, apresentam-se o projeto e as simulações computacionais (realizadas no simulador *PSIM*) do mesmo. Por fim, evidenciam-se os resultados que advieram quer dos modelos de simulação, quer da implementação prática.

### 4.1. Arquitetura, especificações e vantagens do sistema desenvolvido

#### 4.1.1. Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores

Este subsistema do sistema de alimentação tem como principal objetivo extrair energia da rede elétrica e carregar convenientemente uma bateria de ácido-chumbo e um módulo de ultracondensadores. O cerne dele é um conversor *step-down* a operar como fonte de corrente controlável. A Figura 68 evidencia a sua arquitetura.

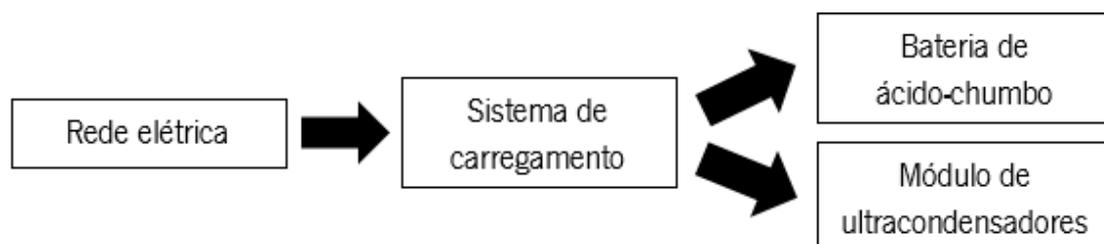


Figura 68 - Arquitetura do sistema de carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores.

Quanto às especificações, considerou-se que a rede elétrica é monofásica, que apresenta uma tensão alternada sinusoidal cujo valor eficaz é 230 V e que pode fornecer até 3,45 kVA. Seguiu-se estas especificações pois correspondem às características da rede elétrica disponível.

O sistema de carregamento tem como especificações a garantia de segurança para o utilizador (por exemplo, para evitar choques elétricos), uma corrente máxima de 14 A na saída e a compatibilidade com as dimensões e capacidade da plataforma móvel omnidirecional, cujos detalhes são apresentados no subcapítulo 5.1.

Quanto ao armazenamento de energia, a bateria de ácido-chumbo apresenta uma tensão nominal de 12 V e capacidade nominal de 12 Ah, o que corresponde a uma capacidade de armazenamento de 144 Wh. A tensão máxima suportada pelo módulo de ultracondensadores é de 16 V e a capacidade é de 116 F, o que corresponde a uma capacidade de armazenamento de 4,12 Wh [66]. Utilizou-se a bateria e o módulo de ultracondensadores referidos porque, em primeiro lugar, são adequados às características elétricas e mecânicas da plataforma móvel e, seguidamente, já se encontravam disponíveis no laboratório onde o trabalho foi realizado. Na Figura 69 apresentam-se a bateria de ácido-chumbo e o módulo de ultracondensadores já instalados na plataforma móvel omnidirecional.

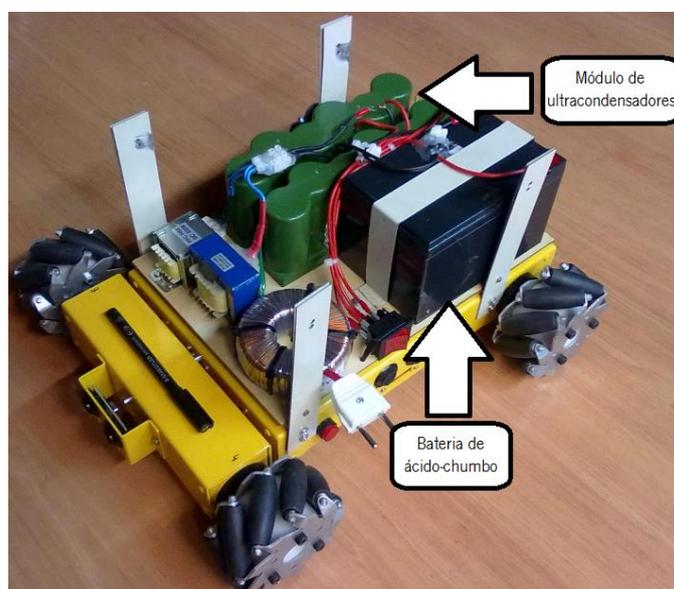


Figura 69 - Bateria de ácido-chumbo e módulo de ultracondensadores fixados à plataforma móvel omnidirecional.

A principal vantagem deste sistema consiste no facto de possibilitar curtos períodos de carregamento energético devido à utilização do um módulo de ultracondensadores. Este pode ser carregado muito mais rapidamente que a bateria sem se deteriorar significativamente.

#### 4.1.2. Gestão otimizada da energia armazenada

Este subsistema do sistema de alimentação tem como principal objetivo manipular a energia previamente armazenada com o propósito de manter o valor da tensão na sua saída regulado em 12,5 V, até uma corrente máxima de 6 A – no subcapítulo 4.2.2.3 apresenta-se o motivo pelo qual se optou por estes valores. O seu cerne consiste na utilização dos conversores *step-up* e *SEPIC* com as respetivas saídas em paralelo. O diagrama da Figura 70 evidencia a arquitetura.

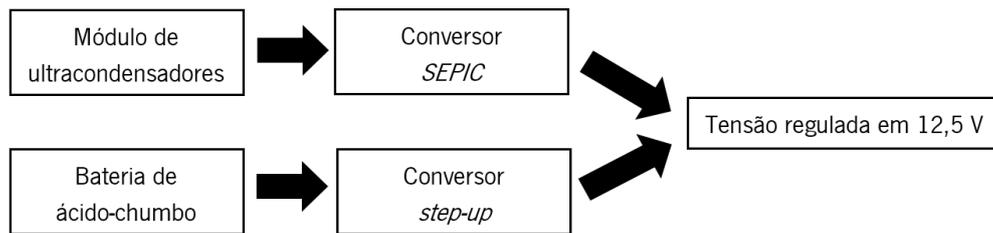


Figura 70 - Arquitetura do sistema responsável pela gestão otimizada da energia.

Considera-se que o sistema faz uma gestão otimizada da energia pois recorre-se, em primeiro lugar, à energia armazenada no módulo de ultracondensadores e só posteriormente à energia disponível na bateria. Esta gestão otimizada apresenta as seguintes vantagens:

- **Aumento do tempo útil de vida da bateria.** O facto de se recorrer primeiramente à energia armazenada no módulo de ultracondensadores leva a uma menor utilização da bateria, o que se traduz num aumento do tempo útil de vida da mesma;
- **Redução da frequência de substituição da bateria.** O aumento do tempo útil de vida da bateria leva a uma redução da frequência de substituição da mesma. A longo prazo, este facto pode reduzir os custos do sistema no qual a bateria está instalada;
- **Devido à utilização de duas fontes de energia, o módulo de ultracondensadores pode ser carregado e descarregado na totalidade.** Desta forma, faz-se um melhor aproveitamento da sua capacidade de armazenamento.

Para além da gestão otimizada de energia, a utilização combinada da bateria e do módulo de ultracondensadores leva a um aumento significativo da autonomia (devido à elevada densidade energética da bateria) e da densidade de potência (o módulo de ultracondensadores apresenta uma impedância interna muito inferior à da bateria, o que leva a um aumento significativo da potência disponível para o mesmo volume).

### 4.1.3. Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção

Este subsistema do sistema de alimentação tem como principal objetivo fornecer os valores adequados de tensão aos atuadores (motores), sensores e restantes circuitos da plataforma móvel omnidirecional, a partir de uma tensão regulada e estabilizada em 12,5 V. Cada motor da plataforma móvel é acionado com recurso a uma ponte H completa e um controlador PID digital. Na Figura 71 apresenta-se a arquitetura do sistema.



Figura 71 - Arquitetura do sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção.

Este sistema apresenta como principal vantagem a utilização de conversores comutados para fazer o acionamento dos motores. Desta forma, procurou-se maximizar a eficiência e consequentemente, a autonomia da plataforma móvel omnidirecional.

## 4.2. Projeto e simulação do sistema desenvolvido

### 4.2.1. Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores

Como já foi referido, o principal objetivo deste sistema é extrair energia da rede elétrica e carregar convenientemente uma bateria de ácido-chumbo e um módulo de ultracondensadores. Os principais blocos que o constituem são:

- Transformador abaixador;
- Ponte retificadora e filtro CC;
- Conversor *step-down* do tipo fonte de corrente;
- Controlador PI digital.

#### 4.2.1.1. Transformador abaixador

Este bloco é constituído essencialmente por um transformador abaixador e um fusível de proteção. O transformador, para além de ajustar os níveis de tensão entre a rede elétrica e o restante sistema de alimentação, garante um isolamento elétrico. Para se fazer uma modelização

próxima da realidade, começou-se por definir um modelo de simulação para a rede elétrica e para o transformador, no qual se considerou uma impedância de curto-circuito de 5%. A Figura 72 apresenta o modelo considerado.

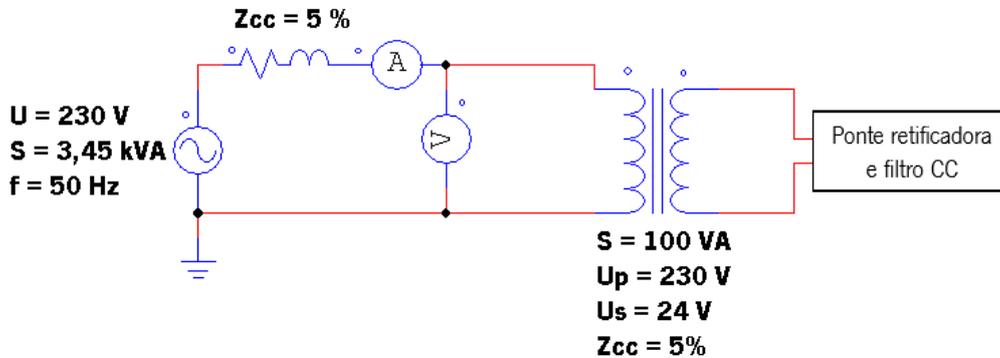


Figura 72 - Modelo e características elétricas da rede e do transformador abaixador no simulador *PSIM*.

Para a rede elétrica (cujas características foram apresentadas na figura anterior), os cálculos da impedância de curto-circuito ( $Z_{cc}$ ) foram realizados assumindo que a componente indutiva ( $L$ ) é duas vezes superior à componente resistiva ( $R$ ):

$$Z_{cc} = \frac{230^2}{3450} \cdot 0,05 = 766 \text{ m}\Omega \quad (39)$$

$$766 \text{ m}\Omega = \sqrt{R^2 + (2R)^2} \Leftrightarrow R = 343 \text{ m}\Omega \quad (40)$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot R \Leftrightarrow L = 2,18 \text{ mH} \quad (41)$$

Para o transformador abaixador (cujas características também foram apresentadas na figura anterior), os cálculos da impedância de curto-circuito foram realizados partindo dos mesmos pressupostos:

$$Z_{cc} = \frac{230^2}{100} \cdot 0,05 = 26,4 \Omega \quad (42)$$

$$26,4 \Omega = \sqrt{R^2 + (2R)^2} \Leftrightarrow R = 11,8 \Omega \quad (43)$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot R \Leftrightarrow L = 75,1 \text{ mH} \quad (44)$$

Por questões de segurança e integridade, quer do utilizador, quer do próprio sistema de alimentação, colocou-se um fusível de 5 A em série com o enrolamento secundário do transformador.

Na Figura 73 apresentam-se o transformador e a ligação para a rede elétrica, ambos já instalados na plataforma móvel omnidirecional.

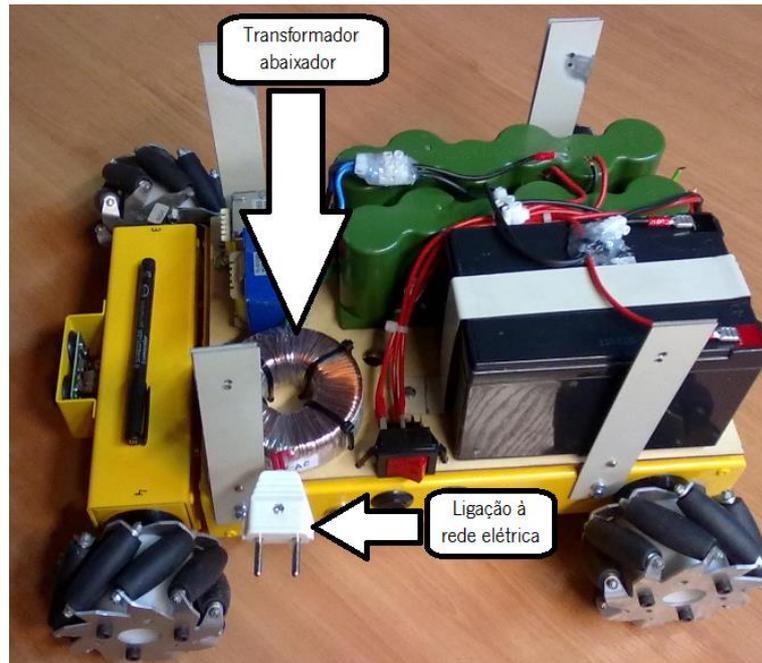


Figura 73 - Transformador abaixador e ligação para a rede elétrica já instalados na plataforma móvel omnidirecional.

#### 4.2.1.2. Ponte retificadora e filtro CC

Este bloco tem por objetivo converter a tensão alternada existente na saída do enrolamento do transformador numa tensão contínua, com um *ripple* máximo admissível. A Figura 74 apresenta o modelo de simulação do bloco.

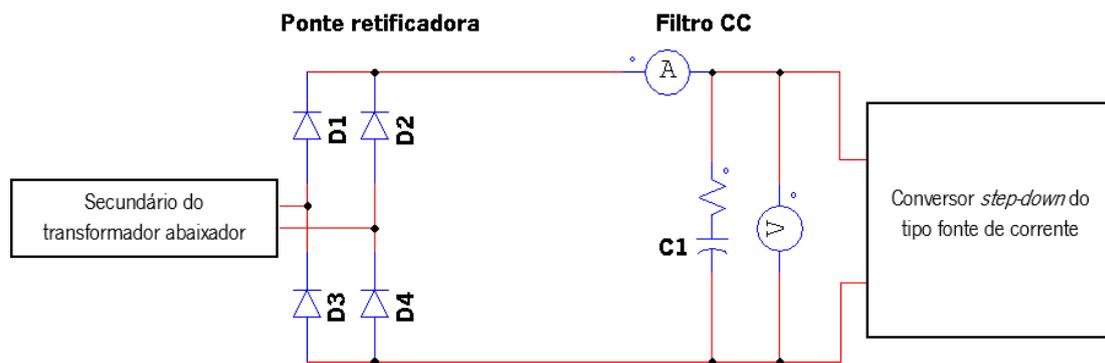


Figura 74 - Modelo da ponte retificadora e filtro CC no simulador PSIM.

Tendo em conta que o valor eficaz da tensão sinusoidal no secundário do transformador é de 24 V, os díodos da ponte retificadora foram dimensionados para suportarem mais do que 33,9 V. Adicionalmente, têm que suportar valores de corrente que não os danifiquem (esses valores foram obtidos através dos resultados da simulação). Assim, seleccionou-se 4 díodos *schottky* MBR1660 [67] (suportam até 16 A e 60 V) para a implementação da ponte retificadora.

No modelo de simulação considerou-se que os diodos entravam em condução com uma tensão de 0,33 V e apresentavam uma resistência em série equivalente de 26 mΩ.

A capacidade (C) do condensador do filtro CC foi determinada tendo sido estabelecido um *ripple* de tensão máximo de 15 V<sub>pp</sub> e uma corrente máxima na saída do bloco de 14 A:

$$i = C \cdot \frac{dv}{dt} \Leftrightarrow 14 = C \cdot \frac{15}{0,01} \Leftrightarrow C = 9,33 \text{ mF} \quad (45)$$

Tendo em conta que a tensão máxima previsível nesse condensador é de 33,9 V, seleccionou-se um condensador eletrolítico para 40 V e 10 mF. Para efeitos de simulação, considerou-se ainda uma resistência equivalente em série de 50 mΩ.

#### 4.2.1.3. Conversor *step-down* do tipo fonte de corrente

O objetivo deste bloco é fazer a injeção controlada de corrente na bateria ou no módulo de ultracondensadores com o intuito de os carregar. A Figura 75 apresenta o respetivo modelo.

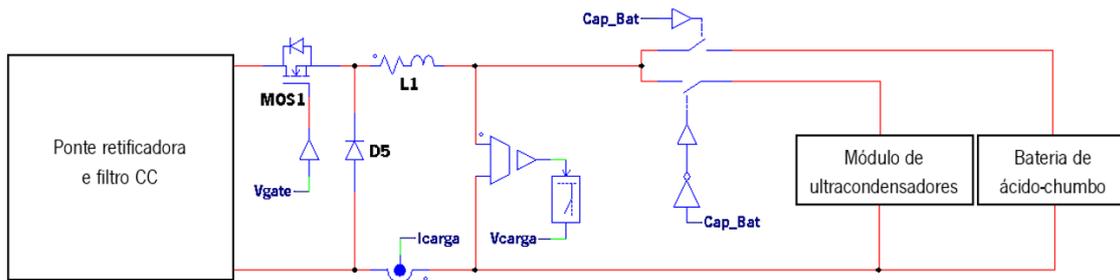


Figura 75 - Modelo do conversor *step-down* do tipo fonte de corrente no simulador PSIM.

Considera-se que o conversor *step-down* representado na figura acima é do tipo fonte de corrente porque a corrente na saída do mesmo é a variável controlada pelo controlador PI e porque a bobina L1 está em série com a carga (bateria ou módulo de ultracondensadores).

Como já foi referido no subcapítulo anterior, a corrente máxima especificada na saída do filtro CC foi de 14 A. Logo, todos os componentes do conversor *step-down* têm que suportar, pelo menos, esse valor de corrente. Desta forma, optou-se por uma bobina com 23,3 mH e 428 mΩ (valores medidos a 1 kHz), um *MOSFET* P80PF55 [68] (suporta até 80 A e 55 V) e um diodo *schottky* MBR1660 [67] (suporta até 16 A e 60 V). Para se fazer a seleção do elemento a carregar (bateria ou módulo de ultracondensadores) recorreu-se a um contactor cuja corrente admissível é de 16 A – o terminal normalmente aberto corresponde à bateria e o terminal normalmente fechado corresponde ao módulo de ultracondensadores. No subcapítulo 4.3.1 (resultados das simulações)

constata-se que os componentes selecionados para a implementação do conversor *step-down* são adequados e satisfazem as especificações.

Para se fazer um carregamento adequado, houve a necessidade de implementar um controlador PI em malha fechada. Isso implicou fazer a medição dos valores de corrente e tensão na saída do conversor *step-down*. A tensão foi medida com recurso a um divisor resistivo, constituído por uma resistência de 5,1 k $\Omega$  e outra de 39 k $\Omega$ . A corrente foi mensurada através do sensor *Pololu ACS711EX* [69] (sensor de efeito *Hall*), o qual é evidenciado na Figura 76.

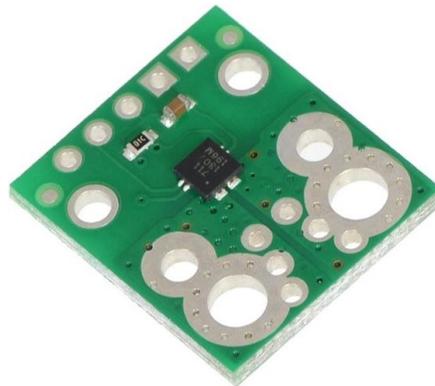


Figura 76 - Sensor de corrente *Pololu ACS711EX* [69]. Este sensor foi colocado na saída do conversor *step-down* por forma a fechar a malha do controlador PI.

Este sensor apresenta um valor de tensão na saída ( $v$ ), o qual se relaciona com a corrente medida ( $i_M$ ) através da seguinte expressão:

$$v = 2,5 + \frac{5}{36,7} \cdot i_M \quad (46)$$

Quanto ao sensor de tensão (divisor resistivo), a relação entre a tensão na saída ( $v$ ) e a tensão medida ( $v_M$ ) é dada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{5,1k}{5,1k + 39k} \cdot v_M \quad (47)$$

Estes 2 sensores, para além de terem possibilitado o controlo em malha fechada, viabilizaram o cálculo da potência instantânea na saída do conversor.

#### **4.2.1.4. Controlador PI digital**

O controlador PI digital consiste num algoritmo cujo objetivo é controlar o processo de carregamento da bateria de ácido-chumbo e do módulo de ultracondensadores. As entradas deste controlador são a corrente e tensão medidas na saída do conversor *step-down*. Quanto às saídas,

existem duas: uma onda *PWM* para acionar convenientemente o *MOSFET* (referido no subcapítulo anterior) e um sinal de comando para indicar o lado para o qual o contactor deve atracar (também foi referido no subcapítulo anterior). Na Figura 77 apresenta-se o modelo do controlador referido.

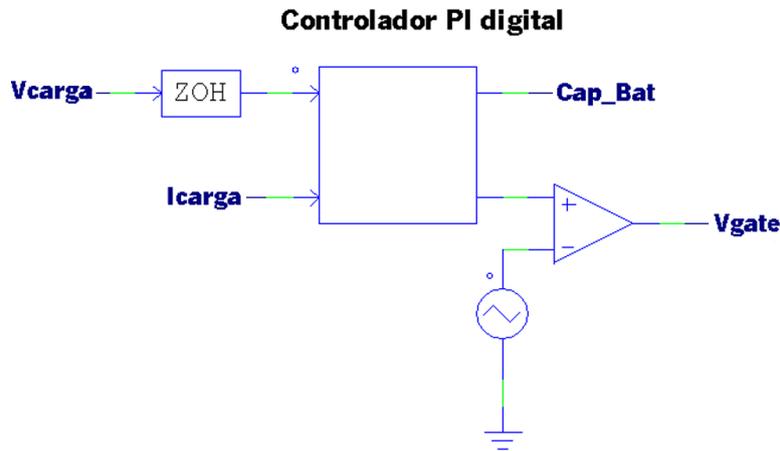


Figura 77 - Modelo do controlador PI implementado no simulador *PSIM*.

O algoritmo do controlador, o qual foi implementado no simulador *PSIM*, foi escrito em linguagem C. No apêndice A apresenta-se o código-fonte que o implementa.

No modelo de simulação selecionou-se uma frequência de comutação de 1 kHz, a qual foi aplicada ao *MOSFET* do conversor *step-down*. Quanto ao controlador PI, definiu-se uma frequência de amostragem de 4 kHz, um ganho proporcional de 40 e um ganho integral de 100. Considerou-se também a implementação do *anti-reset windup* por forma a evitar *overshoots* acentuados para o caso de ocorrer uma situação de saturação. Os valores destes parâmetros foram estabelecidos empiricamente até terem sido encontrados resultados considerados satisfatórios no simulador *PSIM*.

Quanto ao cerne do algoritmo, para o carregamento do módulo de ultracondensadores, primeiramente injeta-se uma corrente constante de 14 A até a tensão atingir aos 5,7 V, o que corresponde a uma potência máxima de 80 W. Seguidamente, desde os 5,7 V até aos 15,5 V, injeta-se uma corrente cujo valor é variável no tempo, de forma a manter o valor da potência de carregamento constante em 80 W. Finalmente, quando a tensão aos terminais do módulo de ultracondensadores atingir os 15,5 V considera-se o carregamento concluído. Consequentemente reduz-se a corrente de carregamento até 0 A e comuta-se o contactor de modo a proceder ao carregamento da bateria. Na Figura 78 apresenta-se o fluxograma correspondente ao algoritmo de carregamento do módulo de ultracondensadores.

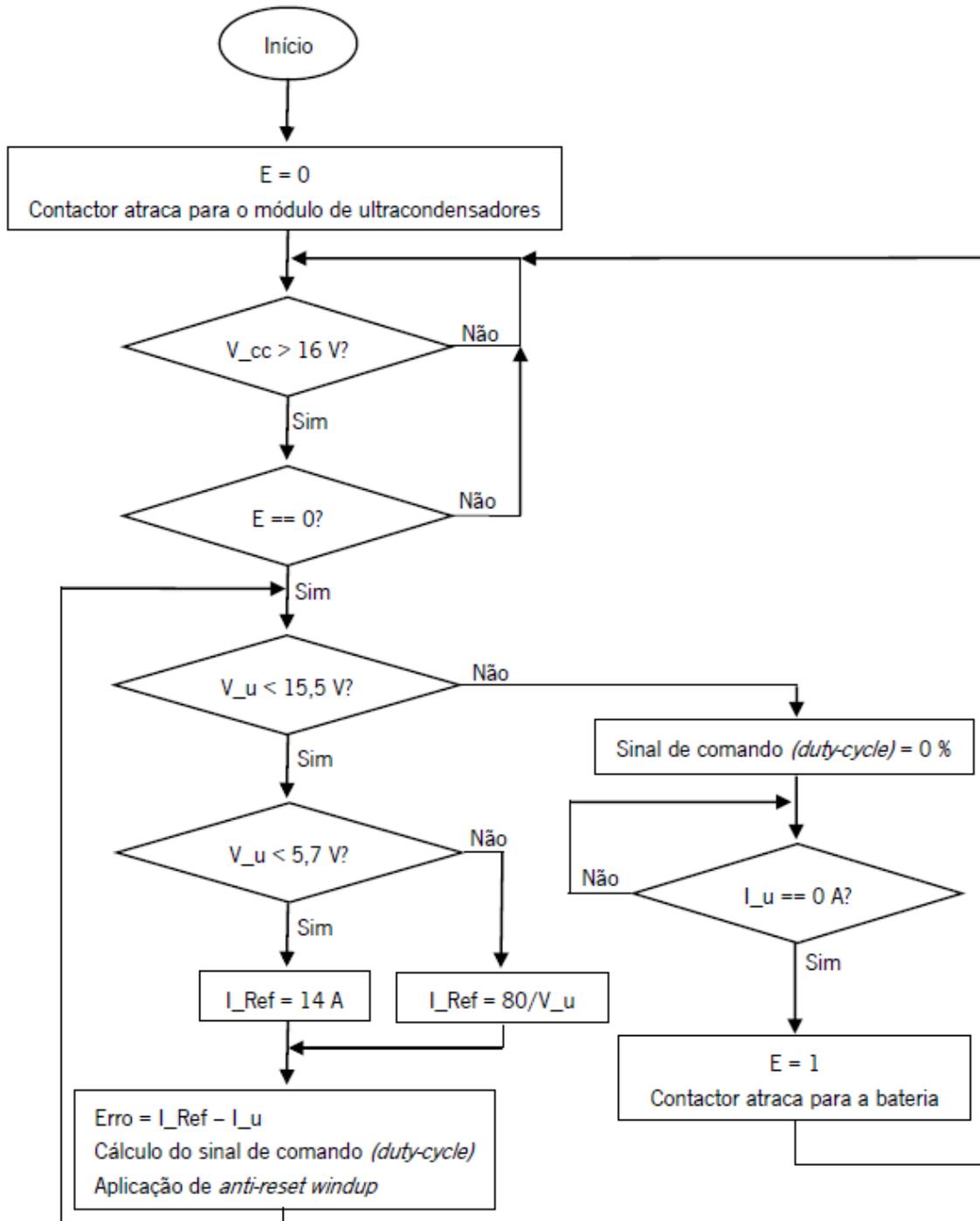


Figura 78 - Fluxograma correspondente ao algoritmo de carregamento do módulo de ultracondensadores. “E” é uma variável de controle, “V<sub>cc</sub>” é a tensão no filtro CC, “V<sub>u</sub>” é a tensão no módulo de ultracondensadores, “I<sub>Ref</sub>” é a corrente de referência do controlador PI e “I<sub>u</sub>” é a corrente que é efetivamente injetada no módulo de ultracondensadores.

Quanto ao carregamento da bateria de ácido-chumbo, em primeiro lugar injeta-se uma corrente constante de 1,2 A enquanto a tensão nela não atingir os 13,6 V. Seguidamente, mantém-se a tensão constante nesse valor e espera-se que a corrente diminua até aos 50 mA. Finalmente,

quando essa condição for alcançada (tensão de 13,6 V e corrente inferior a 50 mA) considera-se que o carregamento está concluído – logo, pode-se voltar a comutar o contactor para o módulo de ultracondensadores. Na Figura 79 apresenta-se o fluxograma correspondente ao algoritmo de carregamento da bateria.

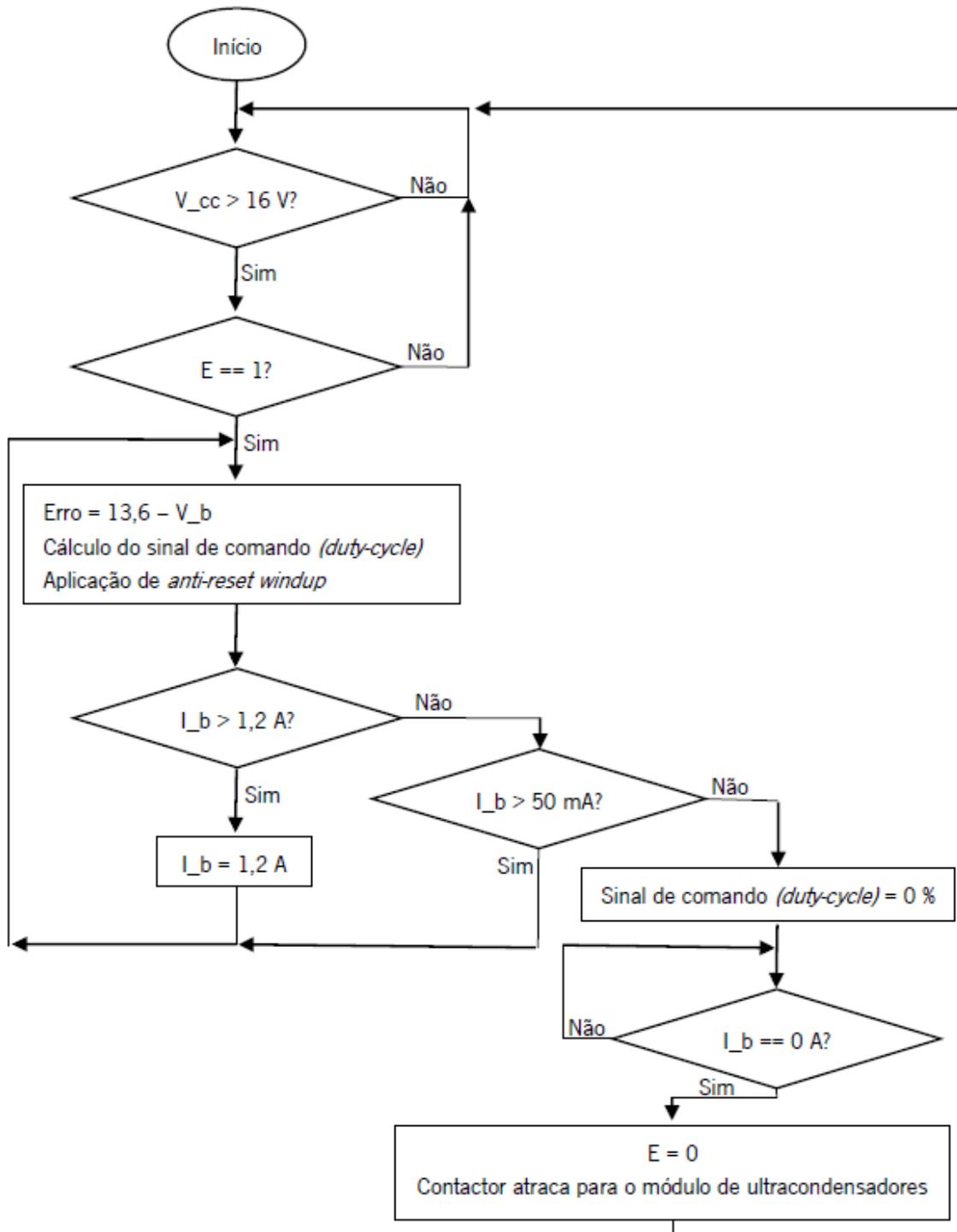


Figura 79 - Fluxograma correspondente ao algoritmo de carregamento da bateria de ácido-chumbo. “E” é uma variável de controlo, “V<sub>cc</sub>” é a tensão no filtro CC, “V<sub>b</sub>” é a tensão na bateria e “I<sub>b</sub>” é a corrente que é efetivamente injetada na bateria.

No simulador *PSIM*, os 2 algoritmos referidos foram sempre executados em paralelo. A variável de controlo “E” (referida nos fluxogramas) permite a execução atómica dos algoritmos, isto é, o controlador PI só começa a carregar a bateria quando o carregamento do módulo de ultracondensadores estiver concluído e vice-versa.

#### 4.2.2. Gestão otimizada da energia armazenada

Como já foi referido, o principal objetivo deste sistema é manipular convenientemente a energia previamente armazenada (na bateria e/ou no módulo de ultracondensadores) com o propósito de manter o valor da tensão na sua saída regulada em 12,5 V até uma corrente máxima de 6 A. Os principais blocos que o constituem são:

- Conversor *SEPIC*;
- Conversor *step-up*;
- Controlador PI digital.

##### 4.2.2.1. Conversor *SEPIC*

Este bloco, que é essencialmente constituído por um conversor *SEPIC*, tem como principal objetivo manter a tensão na sua saída regulada em 12,5 V a partir da tensão desregulada no módulo de ultracondensadores. Na Figura 80 apresenta-se o respetivo modelo de simulação.

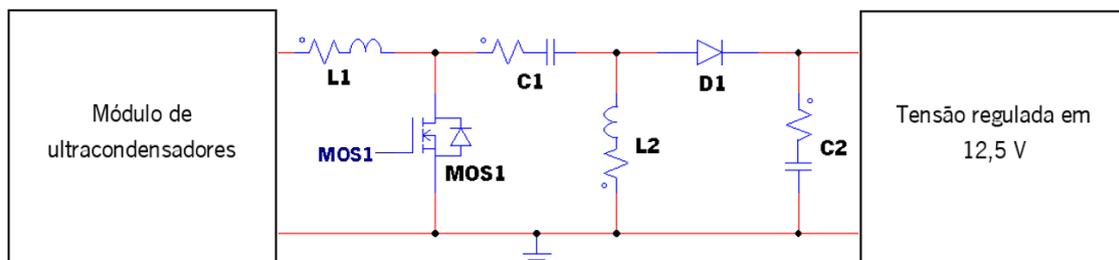


Figura 80 - Modelo do conversor *SEPIC* no simulador *PSIM*.

Aplicando uma onda modulada por *PWM* no *MOSFET* MOS1 é possível manter a tensão regulada na saída do conversor, mesmo que a entrada dele seja variável no tempo.

Tendo em conta que o conversor *SEPIC* deverá ser capaz de fornecer até 6 A na saída, todos os componentes do mesmo foram seleccionados de acordo com esse valor. Assim, optou-se por duas bobinas acopladas magneticamente (segundo a polaridade indicada na Figura 80) em que cada uma possui 42,7  $\mu\text{H}$  e 95  $\text{m}\Omega$  (valores medidos a 1 kHz), um *MOSFET* P60NF06 [70]

(suporta até 60 A e 60 V), um diodo *schottky* MBR1660 [67] (suporta até 16 A e 60 V), um condensador de polipropileno (C1) com 10  $\mu$ F e 10  $m\Omega$  e outro eletrolítico de 1 mF e 50  $m\Omega$  (C2). No subcapítulo 4.3.2 (resultados das simulações) constata-se que os componentes selecionados para a implementação do conversor *SEPIC* são adequados e satisfazem as especificações.

#### 4.2.2.2. Conversor *step-up*

Este bloco, que é essencialmente constituído por um conversor *step-up*, tem como principal objetivo manter a tensão na sua saída regulada em 12,5 V a partir da tensão desregulada na bateria de ácido-chumbo. Considerou-se que a bateria apresentava uma tensão desregulada pois constatou-se que a tensão aos seus terminais variava entre 11,5 V e 12,5 V para diferentes estados de carga e pontos de operação. Na Figura 81 apresenta-se o respetivo modelo de simulação.

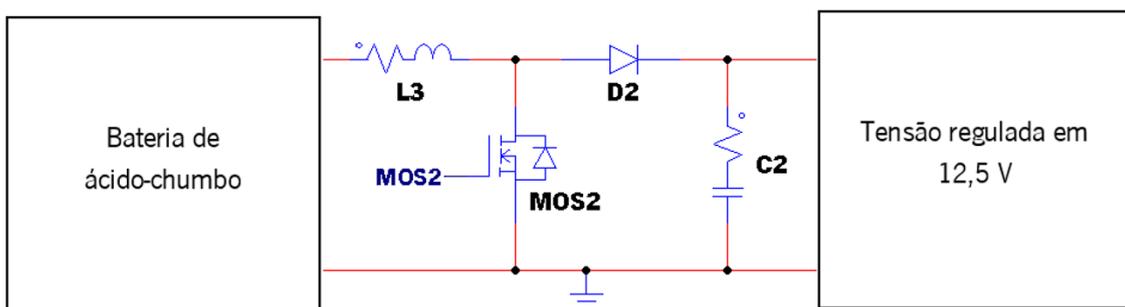


Figura 81 - Modelo do conversor *step-up* no simulador *PSIM*.

Tal como no conversor *SEPIC*, através da aplicação de uma onda modulada por *PWM* é possível manter a tensão regulada na saída do conversor *step-up*, mesmo que a entrada dele seja variável no tempo.

Tendo em conta que o conversor *step-up* deverá ser capaz de fornecer até 6 A na saída, todos os componentes do mesmo foram selecionados de acordo com esse valor. Desta forma, optou-se por uma bobina cujas características são 244  $\mu$ H e 102  $m\Omega$  (valores medidos a 1 kHz), um *MOSFET* P60NF06 [70] (suporta até 60 A e 60 V), um diodo *schottky* MBR1660 [67] (suporta até 16 A e 60 V) e um condensador eletrolítico de 1 mF e 50  $m\Omega$ . No subcapítulo 4.3.2 (resultados das simulações) constata-se que os componentes selecionados para a implementação do conversor *step-up* são adequados e satisfazem as especificações.

### 4.2.2.3. Controlador PI digital

O controlador PI digital consiste num algoritmo que, através de 2 sinais de comando (um para cada conversor), possibilita a regulação da tensão em 12,5 V. Na Figura 82 apresenta-se a arquitetura do sistema, a qual evidencia o papel desempenhado pelo controlador PI digital.

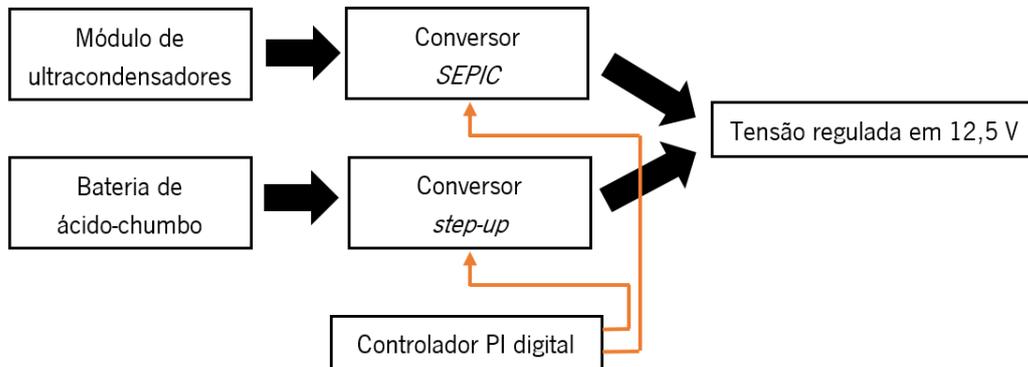


Figura 82 - Arquitetura do sistema energeticamente otimizado evidenciando os sinais de comando que controlam os 2 conversores.

Neste controlador em malha fechada, a variável a controlar é a tensão na saída dos 2 conversores (as saídas deles estão ligadas em paralelo) e a variável de referência é uma tensão desejada de 12,5 V. Para fechar a malha houve a necessidade de recorrer a um divisor resistivo, o qual é composto por uma resistência de 5,1 k $\Omega$  e outra de 39 k $\Omega$ . A relação entre a tensão na saída do divisor resistivo ( $v$ ) e a tensão medida ( $v_M$ ) é dada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{5,1k}{5,1k + 39k} \cdot v_M \quad (48)$$

O algoritmo do controlador, o qual foi implementado no simulador *PSIM*, foi escrito em linguagem C. No apêndice B apresenta-se o código-fonte que o implementa.

No modelo de simulação selecionou-se uma frequência de comutação de 9,76 kHz, a qual foi aplicada aos 2 *MOSFETs*. Quanto ao controlador PI, definiu-se uma frequência de amostragem de 4 kHz, um ganho proporcional de 15 e um ganho integral de 250. Considerou-se também a implementação do *anti-reset windup* por forma a evitar *overshoots* acentuados para o caso de ocorrer uma situação de saturação. Os valores destes parâmetros foram estabelecidos empiricamente até terem sido encontrados resultados considerados satisfatórios no *PSIM*.

Quanto ao cerne do algoritmo, em primeiro lugar, aguarda-se 10 ms e inicializam-se todas as variáveis. Seguidamente, calcula-se o *duty-cycle* (variável de comando) do controlador PI. Por fim, caso esse valor não seja superior a 85%, atua-se apenas sobre o conversor *SEPIC* deixando o outro desligado (assim a energia provém exclusivamente do módulo de ultracondensadores). Caso

contrário, aplica-se um *duty-cycle* constante de 85% ao conversor *SEPIC* e a restante percentagem ao conversor *step-up* (assim a energia provem de ambas as fontes – módulo de ultracondensadores e bateria). Optou-se por manter a tensão regulada em 12,5 V por forma a ser possível impedir que a energia flua da bateria para a carga quando é aplicado um *duty-cycle* de 0% ao conversor *step-up*. Na Figura 83 apresenta-se o fluxograma do algoritmo descrito.

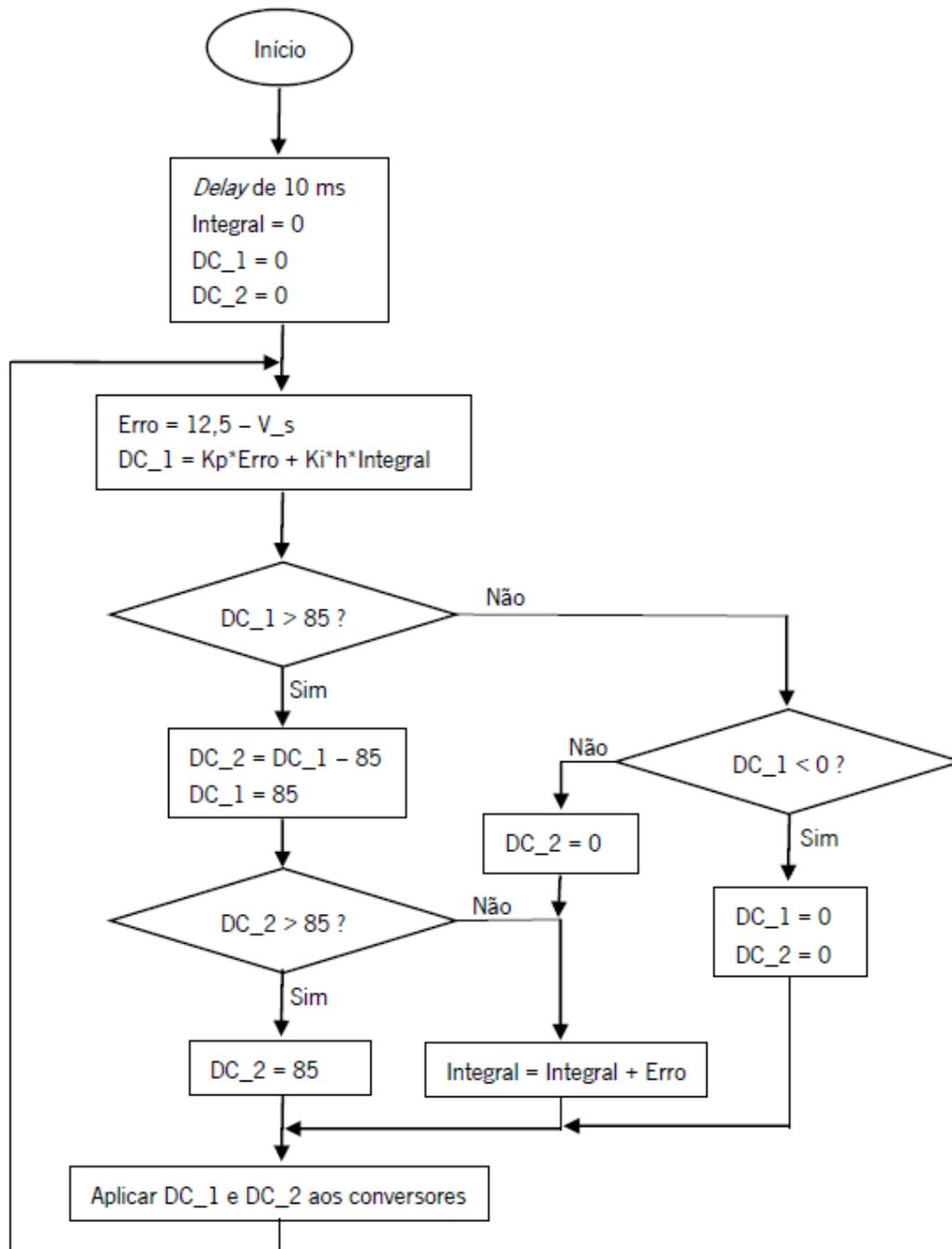


Figura 83 - Fluxograma correspondente ao algoritmo responsável pela gestão otimizada da energia. “V<sub>s</sub>” é a tensão medida na saída dos conversores, “DC<sub>1</sub>” é o valor do *duty-cycle* aplicado ao conversor *SEPIC*, “DC<sub>2</sub>” é o valor do *duty-cycle* aplicado ao conversor *step-up*, “h” é o período de amostragem, “Kp” e “Ki” são os ganhos proporcional e integral respetivamente.

### 4.2.3. Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção

Como já foi referido, a principal função deste sistema é fornecer os valores adequados de tensão aos atuadores (motores), sensores e restantes circuitos da plataforma móvel omnidirecional, a partir de uma tensão regulada em 12,5 V. É constituído essencialmente pelos seguintes blocos:

- Conversores ponte H completa;
- Reguladores de tensão;
- Controlador PID digital.

#### 4.2.3.1. Conversores ponte H completa

Este bloco é constituído por 4 conversores ponte H completa idênticos – um por cada motor (ou roda *Mecanum*) da plataforma móvel omnidirecional. A função de cada conversor é fornecer os valores adequados de tensão a cada motor. Esses valores são especificados dinamicamente pelo controlador PID digital em função da velocidade angular desejada para cada roda. A Figura 84 apresenta o modelo de simulação de um dos conversores referidos.

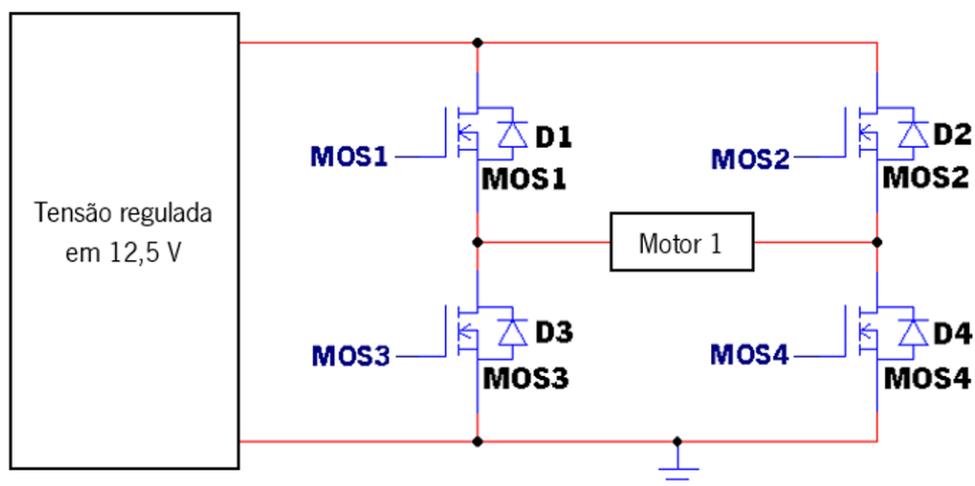


Figura 84 - Modelo de um dos conversores ponte H completa no simulador *PSIM*. Para os restantes motores, o modelo é exatamente igual a este.

Através da análise do *datasheet* dos motores, constatou-se que a corrente máxima que cada um pode absorver, em regime permanente, é de 1,4 A. Por isso, para a implementação dos conversores ponte H completa, recorreu-se a 16 díodos *schottky* 1N5819 [71] e a 2 circuitos integrados L298N [72]. Estes circuitos integrados, para além da parte de potência, possuem uma parte de comando que é responsável por gerar os períodos de *dead-time* e por aplicar os níveis

adequados de tensão a cada interruptor totalmente controlável (só assim é possível ligá-los e/ou desligá-los convenientemente). Recorreu-se à modulação bipolar com uma frequência de comutação de 80 kHz por forma a ter a garantia que o utilizador do sistema nunca será perturbado pelo som da comutação dos semicondutores.

Em série com os 4 conversores ponte H completa (um conversor por cada motor), colocou-se um sensor de corrente *Pololu ACS714* [73] cujo objetivo é possibilitar a deteção de sobreintensidades. Sempre que a corrente medida exceder os 6 A, desligam-se todos os semicondutores das pontes H completas por forma a salvaguardar a integridade do sistema. Na Figura 85 apresenta-se o sensor referido.

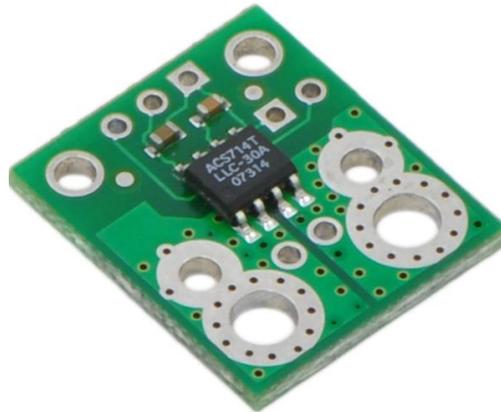


Figura 85 - Sensor de corrente *Pololu ACS714* [73] utilizado para detetar sobreintensidades nos conversores ponte H completa.

Este sensor apresenta um valor de tensão na saída ( $v$ ), o qual se relaciona com a corrente medida ( $i_M$ ) através da seguinte expressão:

$$v = 2,5 + 0,066 \cdot i_M \quad (49)$$

#### **4.2.3.2. Reguladores de tensão**

Este bloco é constituído por 2 reguladores de tensão, um para 5 V e outro para 3,3 V. O objetivo deles consiste em fornecer os níveis adequados de tensão aos sensores e circuitos de processamento, controlo e comunicação.

O regulador de tensão selecionado para estabilizar a tensão em 5 V foi o *Tracopower TSR 1-2450* [74]. Trata-se de um conversor *step-down* que é capaz de disponibilizar até 5 W na saída, que apresenta um rendimento próximo dos 90% e que é extremamente compacto (as suas dimensões são comparáveis às do encapsulamento TO-220). O segundo regulador, responsável

por estabilizar a tensão em 3,3 V, é o *STLD1117* [75]. Trata-se de um conversor linear que é capaz de disponibilizar até 2,6 W na saída e que é fabricado no encapsulamento TO-220. Apesar de se tratar de um conversor linear, através da arquitetura evidenciada na Figura 86, foi possível obter um rendimento nele próximo de 66%.

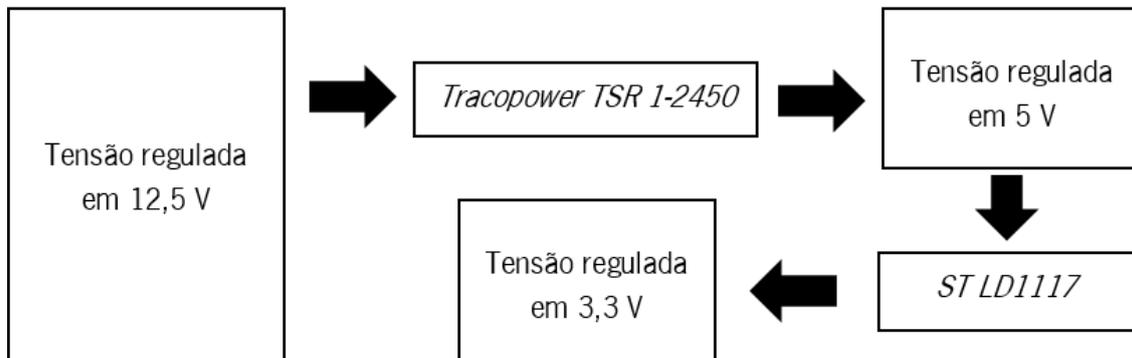


Figura 86 - Arquitetura do bloco responsável pela regulação da tensão. O regulador linear foi colocado em série com o regulador comutado por forma a maximizar o seu rendimento.

#### 4.2.3.3. Controlador PID digital

O controlador PID digital é o bloco responsável por garantir que cada roda da plataforma móvel omnidirecional procura seguir sempre uma velocidade de referência (que pode ser constante ou variável no tempo). O controlador PID digital foi apresentado detalhadamente no capítulo 5.1.2 pois considera-se que ele está mais relacionado com o sistema de controlo da locomoção do que com o sistema de alimentação energeticamente otimizado.

### 4.3. Resultados computacionais e resultados experimentais do sistema desenvolvido

#### 4.3.1. Carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores

Antes de o sistema de carregamento ter sido implementado, fizeram-se várias simulações em *PSIM* com o intuito de garantir a viabilidade e a seleção adequada dos componentes eletrónicos do mesmo. No apêndice A apresenta-se o código-fonte que implementou o controlador responsável pelo carregamento no simulador *PSIM*. No apêndice C apresenta-se todo o modelo de simulação considerado.

Em primeiro lugar, na Figura 87 apresentam-se as formas de onda (obtidas através do simulador *PSIM*) da tensão, da corrente e da potência no módulo de ultracondensadores e na bateria durante o processo de carregamento dos mesmos.

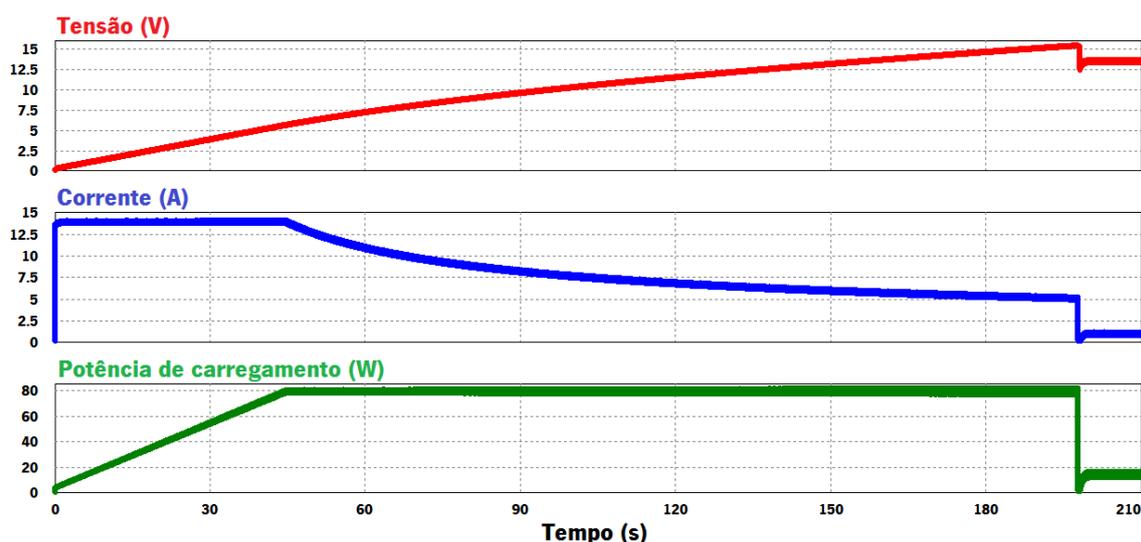


Figura 87 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão, da corrente e da potência no módulo de ultracondensadores (até aos 200 segundos) e na bateria (a partir dos 200 segundos) durante o processo de carregamento dos mesmos.

Através da análise da Figura 87 é perceptível que o tempo de carregamento esperado para o módulo de ultracondensadores é de aproximadamente 3 minutos e 20 segundos. Não se simulou a totalidade do tempo de carregamento para a bateria de ácido-cumbo devido à dificuldade em obter um modelo equivalente em *PSIM* que representasse uma bateria real com a exatidão necessária. No entanto, o modelo considerado permitiu validar o algoritmo desenvolvido e apresentado no subcapítulo 4.2.1.4. Devido ao facto de a corrente de carregamento estar limitada a um máximo de 14 A, a potência máxima de carregamento (80 W) só foi atingida quando a tensão no módulo de ultracondensadores alcançou os 5,7 V. Considera-se o carregamento do módulo de ultracondensadores concluído quando a tensão nele atingir os 15,5 V. Após isso procede-se ao carregamento da bateria de ácido-chumbo.

Em segundo lugar, na Figura 88 apresenta-se a forma de onda da corrente no módulo de ultracondensadores quando o seu valor médio é de aproximadamente 14 A. Devido à comutação do *MOSFET* no conversor *step-down* do tipo fonte de corrente, a forma de onda é triangular e tem uma frequência que coincide com a frequência de comutação do semiconductor de potência. Pela análise da figura é perceptível que o *ripple* de corrente é de aproximadamente 250 mA<sub>pp</sub>, ou seja, percentualmente trata-se de apenas 1,78%.

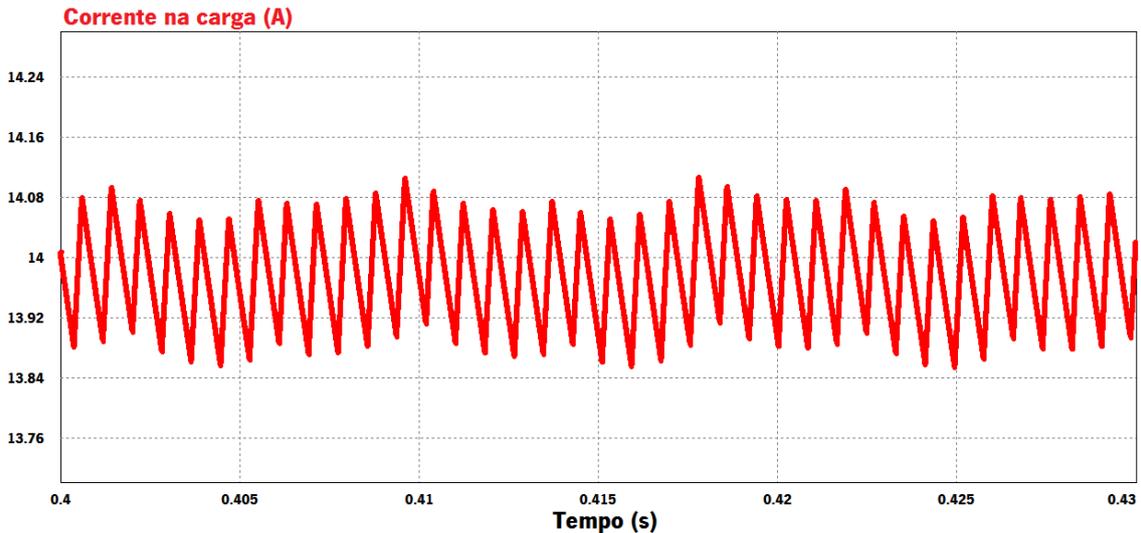


Figura 88 - Forma de onda (obtida no simulador *PSIM*) da corrente no módulo de ultracondensadores quando o seu valor médio é de aproximadamente 14 A. Como seria espectável, a forma de onda é triangular devido à comutação do *MOSFET* no conversor *step-down* do tipo fonte de corrente.

Em terceiro lugar, na Figura 89 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente na rede elétrica, quando o sistema está a efetuar um carregamento à potência máxima. Devido à natureza da rede elétrica, a tensão é praticamente sinusoidal. Quanto à corrente, esta não é sinusoidal devido à utilização de uma ponte retificadora com um filtro CC capacitivo. No entanto, como a potência de carregamento nunca excede os 80 W e a rede elétrica disponibiliza até 3,45 kVA, o impacto negativo dos harmónicos de corrente na rede não é muito significativo.

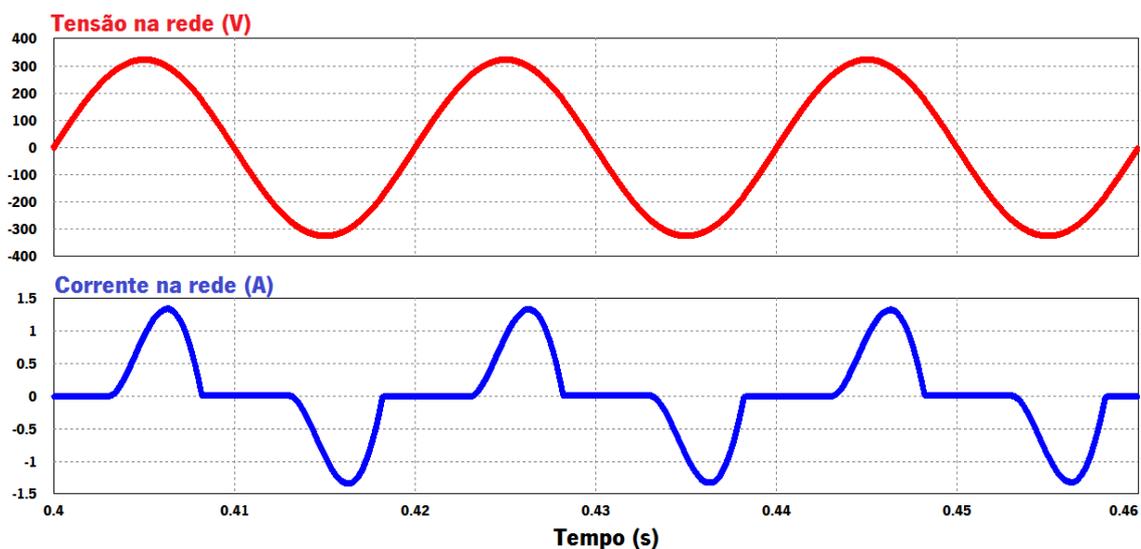


Figura 89 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão e da corrente na rede elétrica quando o sistema está a efetuar um carregamento à potência máxima (80 W).

Finalmente, na Figura 90 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente no filtro CC, quando o sistema está a efetuar um carregamento à potência máxima. É visível que o *ripple* de tensão está abaixo do máximo anteriormente especificado ( $15 V_{PP}$ ), o que comprova que o dimensionamento foi feito adequadamente.

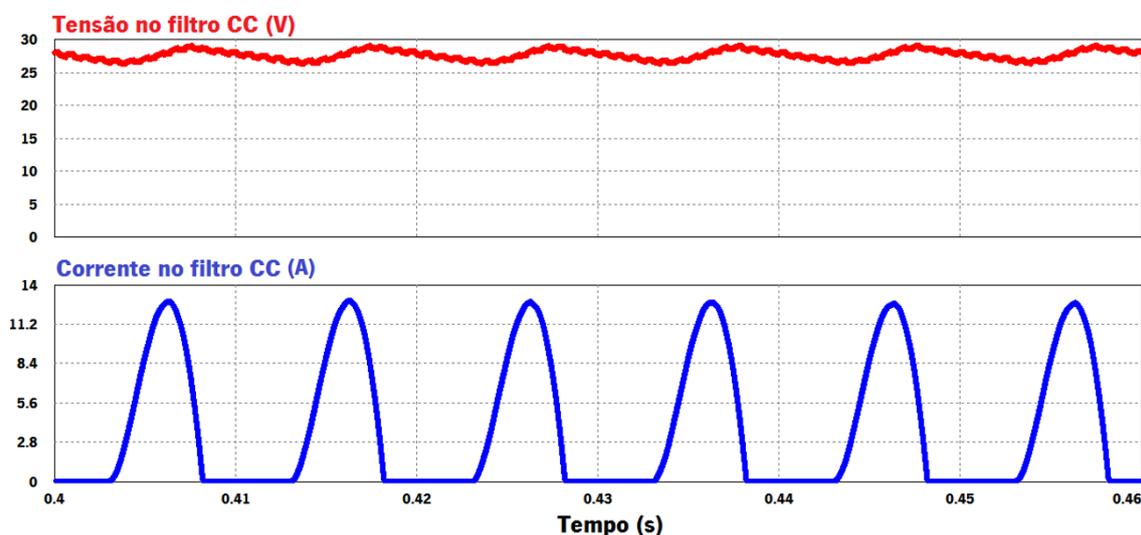


Figura 90 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão e da corrente no filtro CC quando o sistema está a efetuar um carregamento à potência máxima.

Quanto à implementação prática, para além do que já foi apresentado nos subcapítulos anteriores, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso – *PCB (Printed Circuit Board)* – através do *software* Cadsoft Eagle 6.4 [76] e implementou-se o controlador PI digital com recurso ao *software* Atmel Studio 6.1 [77] e ao microcontrolador Atmel ATmega 328P [78]. Selecionou-se este microcontrolador pois apresenta especificações técnicas adequadas ao sistema de controlo, nomeadamente:

- Capacidade de executar até 20 *MIPS*;
- 32 kBytes de memória *ROM*;
- 2 kBytes de memória *RAM*;
- 1 *timer* de 16 bits;
- 2 *timers* de 8 bits;
- *ADC* com 6 canais, cuja resolução pode ir até 10 bits;
- *SPI*;
- *I<sup>2</sup>C*;
- *UART*;

- *Brown-out Detection*;
- 6 canais para *PWM*.

Para transferir o programa desenvolvido no Atmel Studio 6.1 para o microcontrolador recorreu-se ao programador *Pololu USB AVR Programmer* [79], o qual é evidenciado na Figura 91.

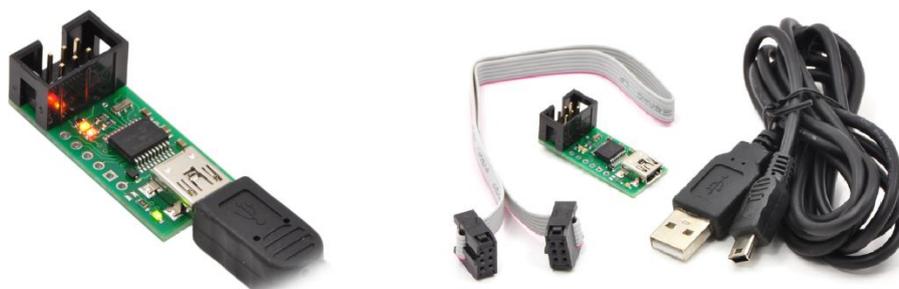


Figura 91 - O *Pololu USB AVR Programmer* [79] foi usado para transferir o programa desenvolvido para o microcontrolador.

No apêndice D apresenta-se o código-fonte (escrito em linguagem C) que foi desenvolvido para o microcontrolador. No apêndice E apresentam-se o esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso que foram desenvolvidos no âmbito do sistema de carregamento.

Quanto aos tempos de carregamento efetivamente medidos na prática, o sistema foi capaz de carregar o módulo de ultracondensadores desde os 0 V até aos 15,5 V em 3 minutos e 42 segundos. Em relação à bateria de ácido-chumbo, foi possível carregá-la em aproximadamente 8 horas e 30 minutos.

Na Figura 92 apresentam-se 4 fotografias que evidenciam diferentes valores de corrente de carregamento do módulo de ultracondensadores. Na Figura 92, em (a) o valor médio da tensão no módulo de ultracondensadores foi de aproximadamente 6 V, em (b) foi de aproximadamente 7,3 V, em (c) foi de aproximadamente 8,1 V e em (d) foi de 15,5 V.



Figura 92 - Diferentes valores de corrente de carregamento (em amperes) do módulo de ultracondensadores.

Na Figura 93 apresentam-se 3 fotografias da versão final da placa de circuito impresso que implementa o sistema de carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores.

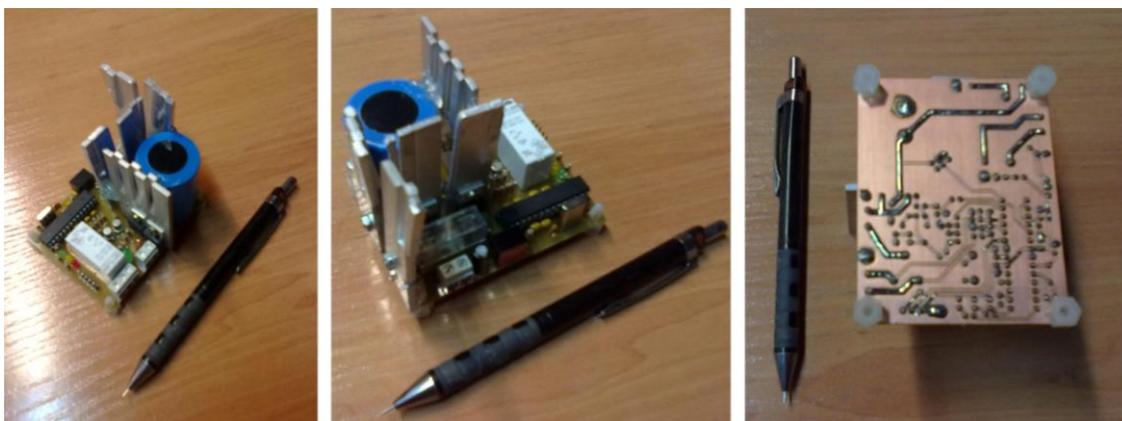


Figura 93 - Placa de circuito impresso que implementa o sistema de carregamento da bateria e do módulo de ultracondensadores.

Na Figura 94 apresentam-se duas formas de onda, obtidas através de um osciloscópio, que visam comprovar o bom funcionamento do sistema de carregamento quando este está a efetuar um carregamento à potência máxima (80 W).

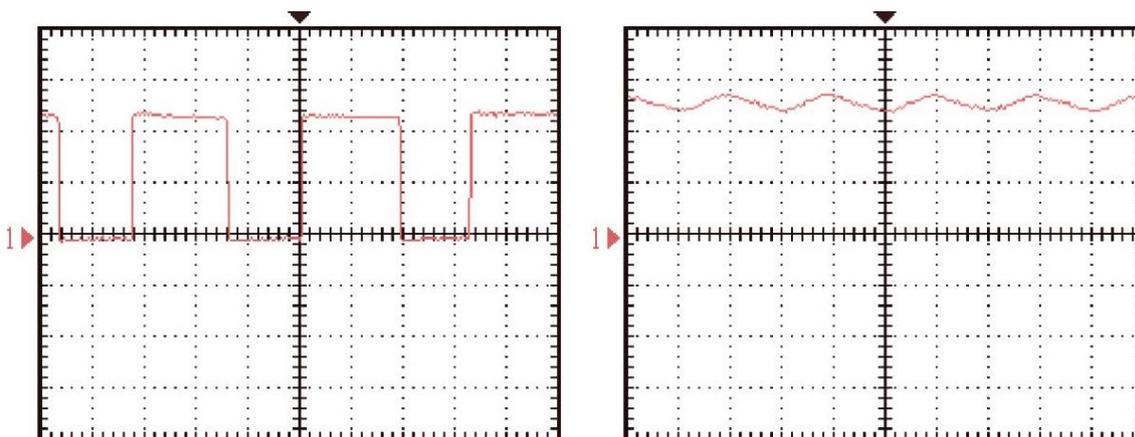


Figura 94 - À esquerda apresenta-se a forma de onda da tensão na *drain* ( $V_{ds}$ ) do *MOSFET* do conversor *step-down* (250  $\mu$ s/div e 10 V/div). À direita apresenta-se a forma de onda da tensão no filtro CC (5 ms/div e 10 V/div).

### 4.3.2. Gestão otimizada da energia armazenada

Antes de o sistema responsável pela gestão otimizada da energia ter sido implementado, fizeram-se várias simulações em *PSIM* com o intuito de garantir a viabilidade e a seleção adequada dos componentes eletrónicos do mesmo. No apêndice B apresenta-se o código-fonte que o implementou no simulador *PSIM*. No apêndice F apresenta-se todo o modelo de simulação considerado. Nos resultados a seguir apresentados considerou-se sempre que os elementos armazenadores de energia se encontravam inicialmente totalmente carregados.

Em primeiro lugar, na Figura 95 apresentam-se as formas de onda (obtidas através do simulador *PSIM*) da tensão e da corrente na saída do sistema considerando uma potência de 12,5 W. Aos 870 segundos, é visível uma pequena perturbação nas formas de onda, cuja origem se deve à entrada em funcionamento do conversor *step-up* (que está associado à bateria). Até esse instante de tempo apenas o módulo de ultracondensadores esteve a fornecer energia à carga.

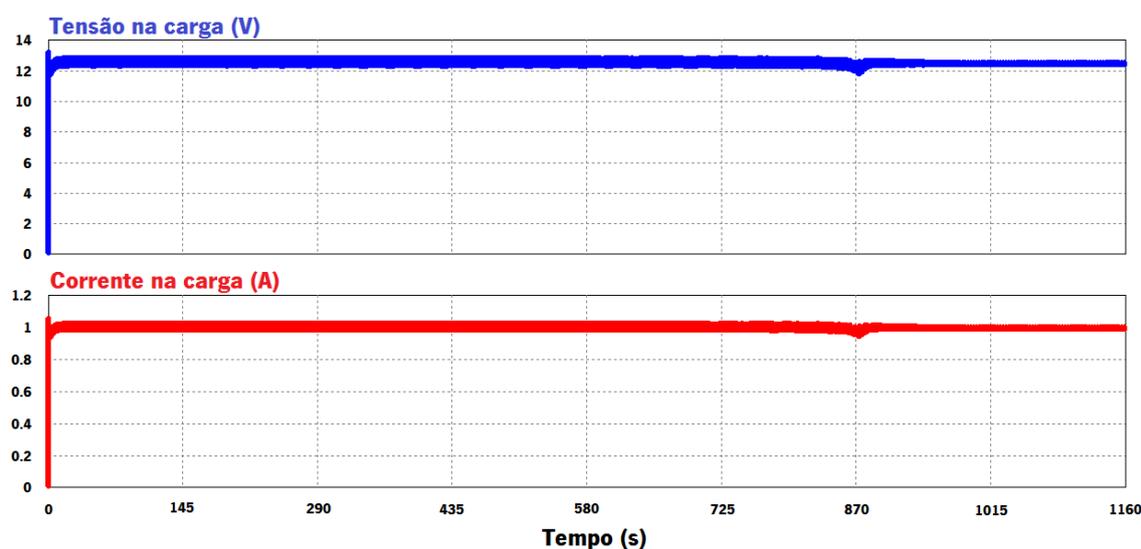


Figura 95 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão e da corrente na saída do sistema considerando uma potência de 12,5 W – corresponde a 12,5 V e 1 A.

Em segundo lugar, na Figura 96 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente no módulo de ultracondensadores para uma potência na saída do sistema de 12,5 W. Como seria de esperar, o valor médio da corrente tende a aumentar devido à diminuição do valor médio da tensão – só assim é possível manter a potência na saída constante. A figura também evidencia uma das principais vantagens do sistema desenvolvido: é possível extrair a totalidade da energia armazenada no módulo de ultracondensadores, transferindo-a para a carga (a tensão no módulo de ultracondensadores chega efetivamente aos 0 V).

## Sistema de alimentação energeticamente otimizado

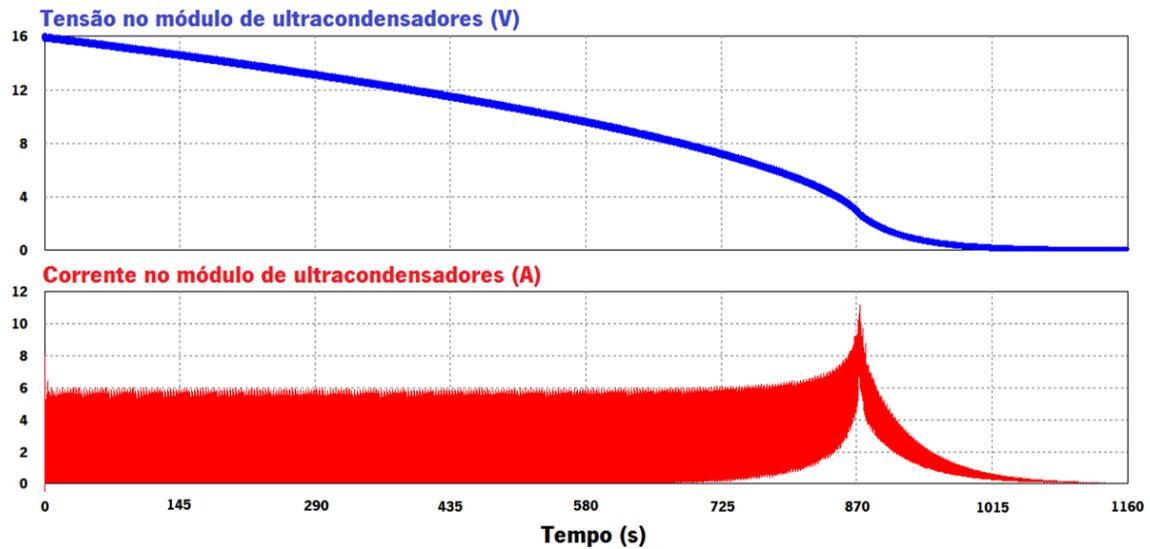


Figura 96 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão e da corrente no módulo de ultracondensadores considerando uma potência na saída de 12,5 W – corresponde a 12,5 V e 1 A.

Finalmente, na Figura 97 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente na bateria para uma potência na saída do sistema de 12,5 W. A figura evidencia que a extração de energia na bateria só se inicia quando a energia no módulo de ultracondensadores começa a escassear. Para além disto, inicialmente essa extração é feita de forma suave, o que é benéfico para o tempo útil de vida da bateria.

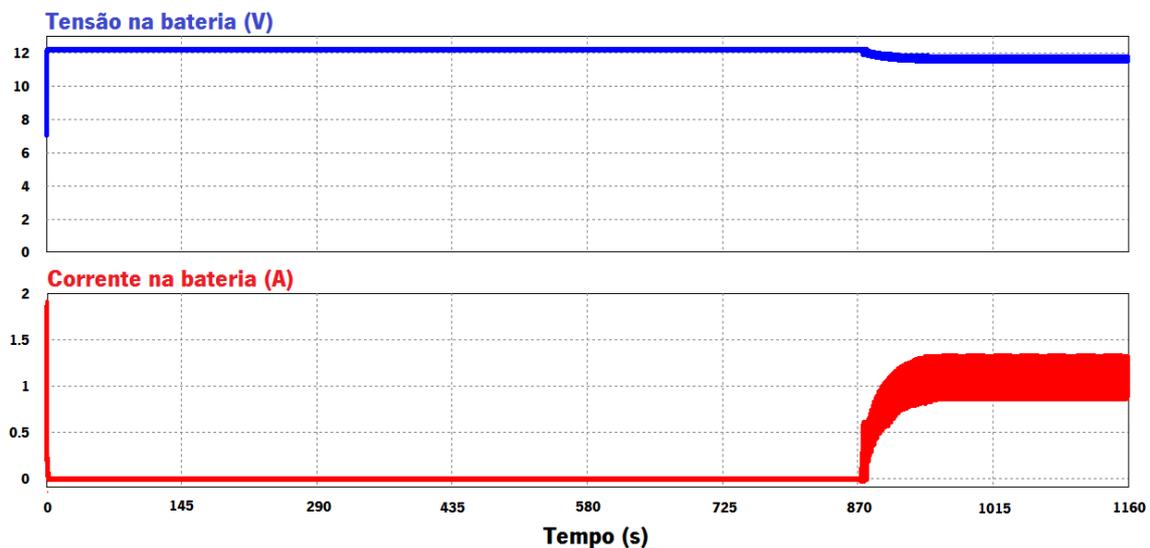


Figura 97 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão e da corrente na bateria de ácido-chumbo considerando uma potência na saída de 12,5 W – corresponde a 12,5 V e 1 A.

Quanto à implementação prática, à semelhança do que se fez para o sistema de carregamento, desenvolveu-se uma placa de circuito impresso através do *software* Cadsoft Eagle 6.4 e implementou-se o controlador PI digital com recurso ao *software* Atmel Studio 6.1 e ao

microcontrolador Atmel ATmega 328P. No apêndice G apresenta-se o código-fonte (escrito em linguagem C) que foi desenvolvido para o microcontrolador. No apêndice H apresentam-se o esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso que foram desenvolvidos no âmbito do sistema responsável pela gestão otimizada da energia.

De seguida apresentam-se alguns resultados práticos que visam comprovar o bom funcionamento do sistema desenvolvido. Os resultados foram obtidos nas seguintes condições:

- Tensão no módulo de ultracondensadores: 9,3 V;
- Estado da bateria de ácido-chumbo: Totalmente carregada;
- Consumo elétrico da plataforma móvel: 3,4 W.

Na Figura 98 apresenta-se uma fotografia que evidencia o valor médio da tensão, em regime permanente, na saída do sistema. Nessa situação, o erro foi de apenas 17 mV, ou seja, percentualmente foi de apenas 0,14%. Ainda nessa situação, mediu-se a corrente no módulo de ultracondensadores e constatou-se que o seu valor era de 464 mA, o que permitiu concluir que o rendimento do sistema era de aproximadamente 79%.

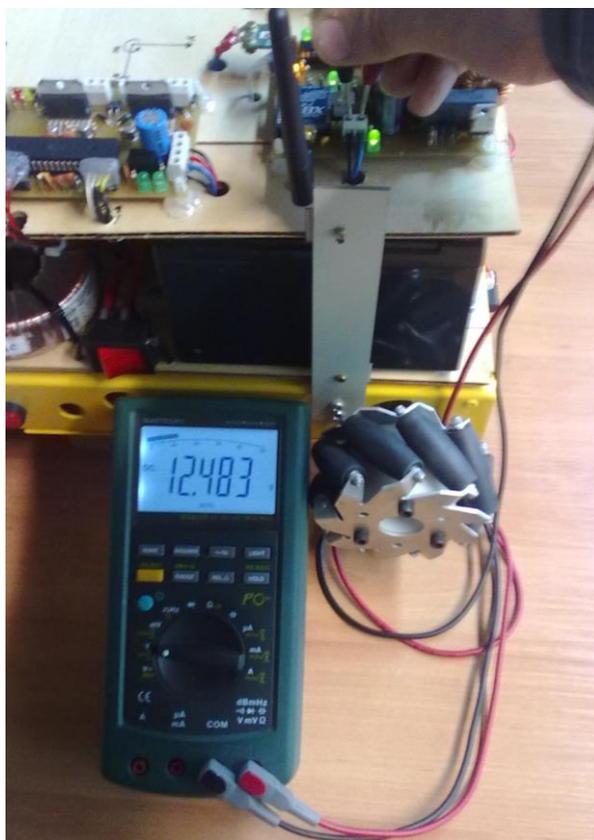


Figura 98 - Valor de tensão (em volts) medido na saída do sistema responsável pela gestão otimizada da energia.

Na Figura 99 apresentam-se 3 fotografias da versão final da placa de circuito impresso que implementa todo o sistema responsável pela gestão otimizada da energia. Nessa figura é visível um módulo *XBee Pro Series 2*. Trata-se de um dos 2 módulos *wireless* que foram utilizados para estabelecer a ligação sem fios entre a plataforma móvel e o computador ou o telecomando.



Figura 99 - Placa de circuito impresso que implementa todo o sistema responsável pela gestão otimizada da energia.

Na Figura 100 apresentam-se algumas formas de onda, obtidas através de um osciloscópio, que visam comprovar o bom funcionamento do sistema.

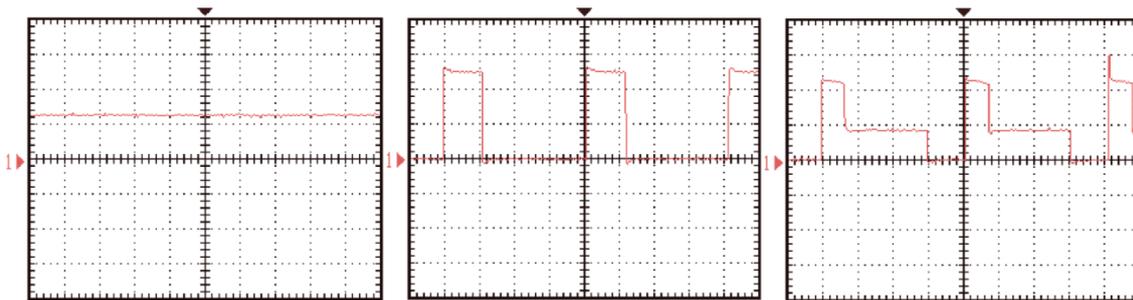


Figura 100 - À esquerda apresenta-se a forma de onda da tensão na saída do sistema (25 us/div e 10 V/div). Ao centro apresenta-se a forma de onda do sinal de comando aplicado à *gate* do *MOSFET* do conversor *SEPIC* (25 us/div e 2 V/div). À direita apresenta-se a forma de onda da tensão na *drain* desse semiconductor (25 us/div e 10 V/div).

### 4.3.3. Fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados computacionais e experimentais que advieram do *hardware* correspondente ao sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia. Quanto ao *software*, nomeadamente ao controlador PID digital, os resultados foram apresentados no subcapítulo 5.2.3. Isto deve-se ao facto de o controlador ser a parte deste sistema que está mais intimamente ligada ao sistema de controlo da locomoção.

Antes de a implementação prática ter sido realizada, fizeram-se algumas simulações em *PSIM* com o intuito de avaliar o comportamento teórico do sistema. Os resultados a seguir apresentados referem-se sempre a um dos motores e a uma das pontes H completas. Para os

restantes motores e restantes pontes H completas, os resultados são absolutamente idênticos. No apêndice I apresenta-se todo o modelo de simulação considerado (foi a partir dele que se obtiveram os resultados a seguir apresentados).

Em primeiro lugar, na Figura 101 apresentam-se as formas de onda (obtidas através do simulador *PSIM*) da tensão e da corrente num dos motores da plataforma móvel omnidirecional, quando o *duty-cycle* aplicado a ele é de 75%. Tendo em conta que a modulação *PWM* é bipolar, este valor de *duty-cycle* corresponde a um valor médio de tensão de 6,25 V (se fosse 100% corresponderia a 12,5 V). Quanto à corrente que atravessa o motor, como seria de esperar, a sua forma de onda é praticamente triangular devido à componente indutiva do mesmo. O valor dessa corrente está intimamente ligado ao binário que o motor exerce em cada instante de tempo.

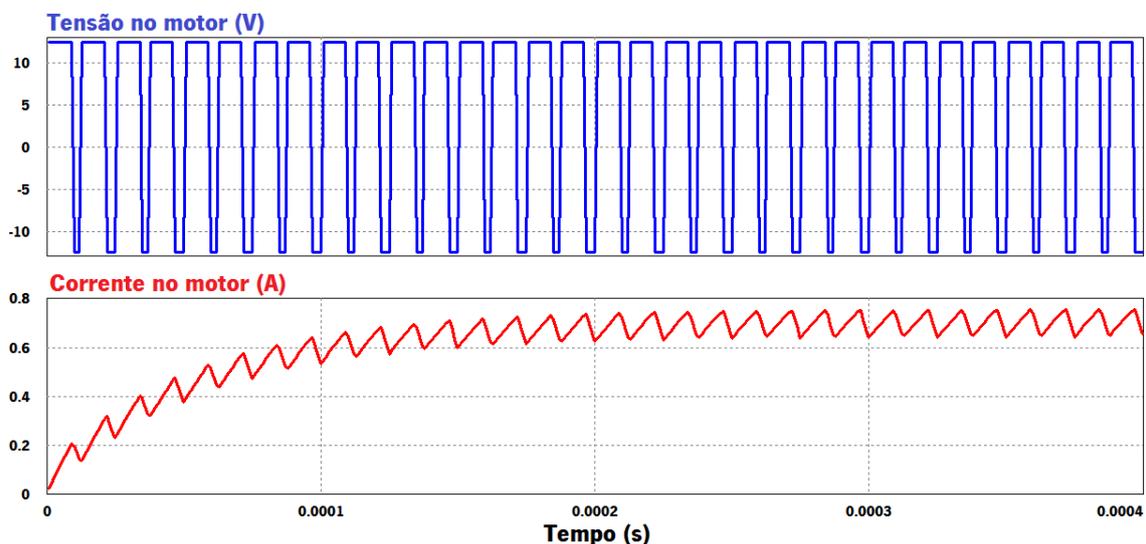


Figura 101 - Formas de onda (obtidas no simulador *PSIM*) da tensão e da corrente num dos motores da plataforma móvel quando o *duty-cycle* aplicado a ele é de 75%.

Em segundo lugar, na Figura 102 apresenta-se a forma de onda da corrente na fonte de tensão regulada nos 12,5 V (trata-se da saída do sistema responsável pela gestão otimizada da energia), quando um dos motores está a ser comandado com um *duty-cycle* de 75%. A corrente assume valores positivos e negativos devido à bidirecionalidade da ponte H completa que estava a comutar e à componente indutiva do respetivo motor.

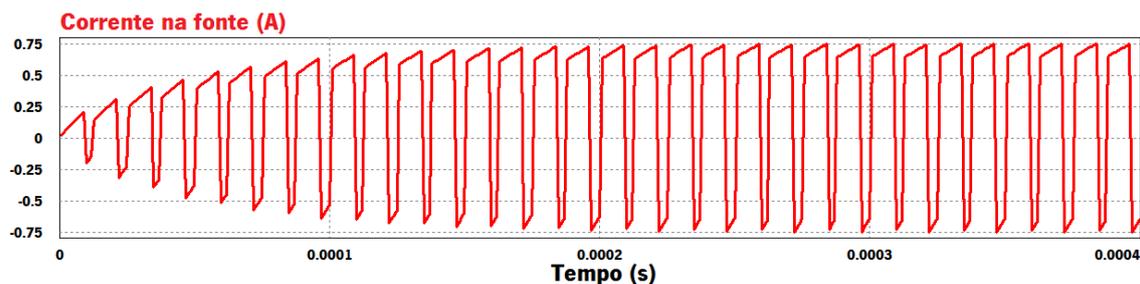


Figura 102 - Forma de onda (obtida no simulador *PSIM*) da corrente na fonte de tensão regulada nos 12,5 V quando esta alimenta um dos motores da plataforma móvel omnidirecional com um *duty-cycle* de 75%.

Em terceiro lugar, quanto à implementação prática, à semelhança dos sistemas apresentados nos 2 subcapítulos anteriores, para este sistema também se desenvolveu uma placa de circuito impresso através do *software* Cadsoft Eagle 6.4. O controlador PID digital foi implementado com recurso ao *software* Atmel Studio 6.1 e ao microcontrolador Atmel ATmega 1284P [80]. Selecionou-se este microcontrolador porque, comparativamente ao outro referido (Atmel Atmega 328P), possui mais memória RAM (16 kBytes), mais memória ROM (128 kBytes), mais pinos (40) e mais um *timer* de 16 bits. No apêndice J apresentam-se o esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso que foram desenvolvidos no âmbito deste sistema.

Na Figura 103 apresentam-se 3 fotografias da versão final da placa de circuito impresso que implementa todo o sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção. Nesta placa de circuito impresso existem alguns componentes (por exemplo, as entradas para os *encoders* ou até o próprio programa que corre no microcontrolador) que se referem ao sistema de controlo da locomoção e, por isso, foram apresentados no capítulo seguinte.

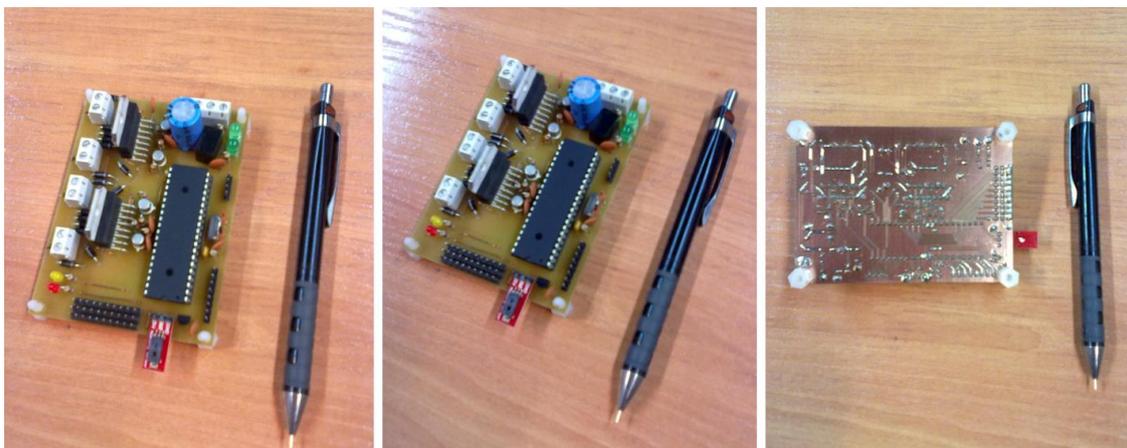


Figura 103 - Placa de circuito impresso que implementa todo o sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia ao sistema de controlo da locomoção.

Em quarto lugar, o rendimento do sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia depende diretamente dos conversores de potência e restantes circuitos utilizados. Assim, através da análise dos *datasheets* dos diversos circuitos integrados, é possível concluir que cada ponte H apresenta um rendimento típico de 75%, o *Tracopower TSR 1-2450* apresenta um rendimento próximo dos 90% e o *ST LD1117* apresenta um rendimento de cerca de 66%.

Finalmente, tendo em conta que o sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia é o último estágio do sistema de alimentação, fez-se um teste à autonomia da plataforma móvel com todo o sistema de alimentação integrado. Verificou-se que, se a plataforma móvel for colocada num plano liso e horizontal à velocidade máxima (cerca de 60 cm/s), a sua autonomia é de 23 minutos e 13 segundos recorrendo exclusivamente à energia disponível no módulo de ultracondensadores. A partir desse instante de tempo, o qual correspondeu a uma tensão de 2,48 V no módulo de ultracondensadores, o sistema recorreu à energia disponível em ambas as fontes (bateria e módulo de ultracondensadores) tendo sido atingida uma autonomia de aproximadamente 9 horas e 40 minutos. Verificou-se que o sistema foi capaz de extrair a totalidade da energia armazenada no módulo de ultracondensadores, levando a sua tensão praticamente até aos 0 V.

A Figura 104 tem por objetivo evidenciar o bom funcionamento do sistema. À esquerda apresenta-se a forma de onda da tensão aplicada a um dos motores num dado intervalo de tempo. À direita apresenta-se uma medição do valor da tensão na saída do regulador de tensão *Tracopower TSR 1-2450*.

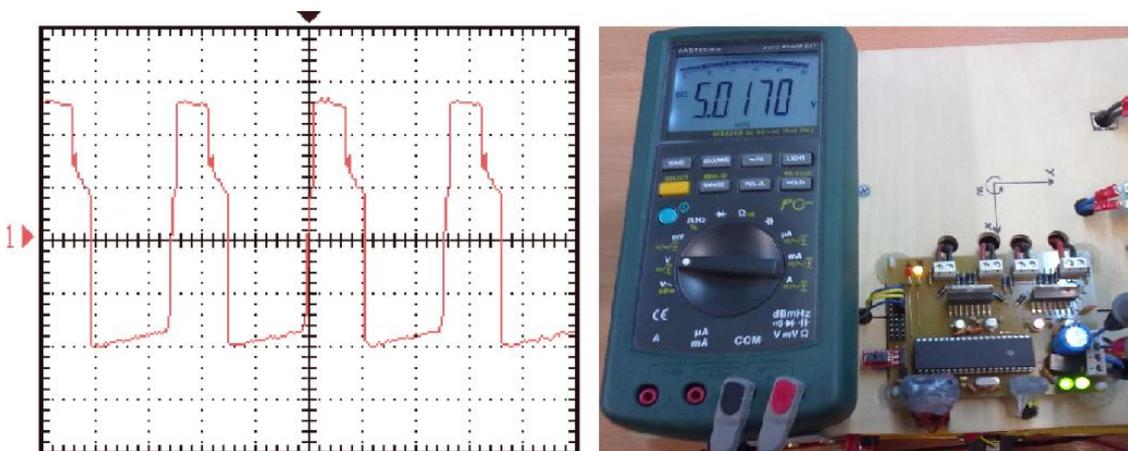


Figura 104 - À esquerda apresenta-se a forma de onda, obtida através de um osciloscópio, da tensão num dos motores, num dado intervalo de tempo (5  $\mu$ s/div e 5 V/div). À direita apresenta-se uma medição da tensão (em volts) na saída do regulador para 5 V.

O sistema de controlo da locomoção, que é apresentado no capítulo seguinte, é o responsável por gerar os sinais de comando adequados por forma a acionar cada uma das rodas da plataforma móvel omnidirecional. Por exemplo, o valor do *duty-cycle* da onda *PWM* apresentada na Figura 104 foi calculado pelo sistema de controlo da locomoção e “executado” pelo sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia.



# 5. Sistema de controlo da locomoção

Neste capítulo apresenta-se o trabalho realizado no âmbito do sistema de controlo da locomoção. Este sistema tem como principal objetivo movimentar a plataforma móvel de acordo com comandos externos à mesma, os quais são provenientes de uma aplicação gráfica em computador ou de um sistema de telecomando inercial.

O sistema de controlo da locomoção pode ser dividido nos seguintes subsistemas, em que o segundo e o terceiro constituem as duas possibilidades que o utilizador tem disponíveis para comandar a plataforma móvel:

- A plataforma móvel omnidirecional;
- A aplicação gráfica em computador;
- O sistema de telecomando.

Seguidamente, faz-se a apresentação de cada um destes subsistemas, colocando-se em evidência as suas principais características, vantagens, implementação prática e resultados obtidos.

## 5.1. A plataforma móvel omnidirecional

A plataforma móvel omnidirecional utilizada é aquela que se apresenta na Figura 105. É composta por um chassi paralelepípedo amarelo e por 4 rodas *Mecanum*. O seu sistema de direção foi apresentado no subcapítulo 2.2.4. Para além disto, a plataforma possui 4 motores de corrente contínua com as respetivas caixa reductoras, 4 *encoders* óticos (um por cada roda), 4 sensores de distância baseados em ultrassons e uma placa de circuito impresso com circuitos de controlo e *interface*.



Figura 105 - Aspeto inicial da plataforma móvel omnidirecional que foi utilizada. Esta pode ser adquirida, por exemplo, no *website* indicado pela seguinte referência: [81].

O chassi da plataforma móvel omnidirecional (parte amarela apresentada na figura anterior) apresenta as especificações descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais características do chassi da plataforma móvel omnidirecional (adaptado de [82]).

Caraterísticas do chassi da plataforma móvel	Comprimento	40 cm
	Largura	36 cm
	Altura	2,2 cm
	Velocidade máxima	60 cm/s
	Peso máximo suportável	20 kg
	Material	Liga de alumínio

As 4 rodas *Mecanum* da plataforma móvel omnidirecional possuem as características evidenciadas pela Tabela 3.

Tabela 3 - Principais características de cada uma das 4 rodas da plataforma móvel omnidirecional (adaptado de [82]).

Caraterísticas de cada roda da plataforma móvel	Tipo	<i>Mecanum</i> ou <i>Swedish 45°</i>
	Diâmetro	10 cm
	Largura	5 cm
	Material	Liga de alumínio e borracha
	Peso máximo suportável	15 kg
	Material do rolete	Borracha
	Diâmetro do rolete	2,9 cm
	Comprimento do rolete	4,7 cm
	Rolamentos	2 x 684ZZ

Na Tabela 4 apresentam-se as características de cada motor de corrente contínua da plataforma móvel omnidirecional. De salientar que, quando se faz referência ao motor, inclui-se também a caixa redutora que já vem acoplada ao mesmo de fábrica.

Tabela 4 - Principais características de cada motor da plataforma móvel omnidirecional (adaptado de [82]).

Caraterísticas de cada motor da plataforma móvel	Tipo	Corrente contínua de imanes permanentes
	Tensão	12 V
	Potência	17 W
	Rotação	120 RPM
	Corrente em vazio	75 mA
	Corrente em carga	1,4 A
	Rácio da caixa redutora	64:1

Na Tabela 5 apresentam-se as características de cada *encoder* da plataforma móvel omnidirecional.

Tabela 5 - Principais características dos *encoders* presentes na plataforma móvel omnidirecional [82].

Caraterísticas de cada <i>encoder</i> da plataforma móvel	Tipo	Ótico incremental
	Fase do <i>encoder</i>	AB
	Resolução	12 CPR ( <i>Counts Per Revolution</i> )
	Acoplamento	Acoplado diretamente ao motor

Além do que já foi referido nas tabelas anteriores, a plataforma móvel inclui 4 sensores de distância baseados em ultrassons e uma placa de circuito impresso com circuitos de controlo e *interface* cujo microcontrolador é o Atmel ATmega 328P (ambos são apresentados na Figura 106). Não se utilizou essa placa de circuito impresso pois constatou-se que esse microcontrolador não dispunha de um número suficiente de pinos para se fazer a implementação de tudo o que estava previsto. Em alternativa, recorreu-se ao microcontrolador Atmel ATmega 1284P. Também não se utilizaram os sensores de distância referidos pois possuem uma saída baseada no protocolo RS-485, o que obrigava a utilizar um *transceiver* que convertesse esse protocolo para UART-TTL. Em alternativa, recorreu-se aos sensores analógicos Sharp GP2Y0A21YK0F [83], os quais se encontravam já disponíveis no laboratório onde o trabalho foi realizado.



Figura 106 - Placa de circuito impresso com circuitos de controlo e *interface* cujo microcontrolador é o Atmel ATmega 328P e sensor de distância baseado em ultrassons. Ambos vinham incluídos com a plataforma móvel omnidirecional [82].

Uma das primeiras tarefas que foi realizada após o sistema de alimentação ter sido implementado consistiu no desenvolvimento de estruturas de suporte para a plataforma móvel. Essas estruturas têm como objetivo fixar convenientemente o sistema de alimentação. Essa tarefa implicou a realização de trabalhos mecânicos de furação, corte e fixação de metal e madeira. O resultado dessa tarefa está evidenciado nas Figura 107 a 109. Na Figura 107 apresentam-se os principais componentes do sistema de alimentação, já fixados à plataforma móvel.

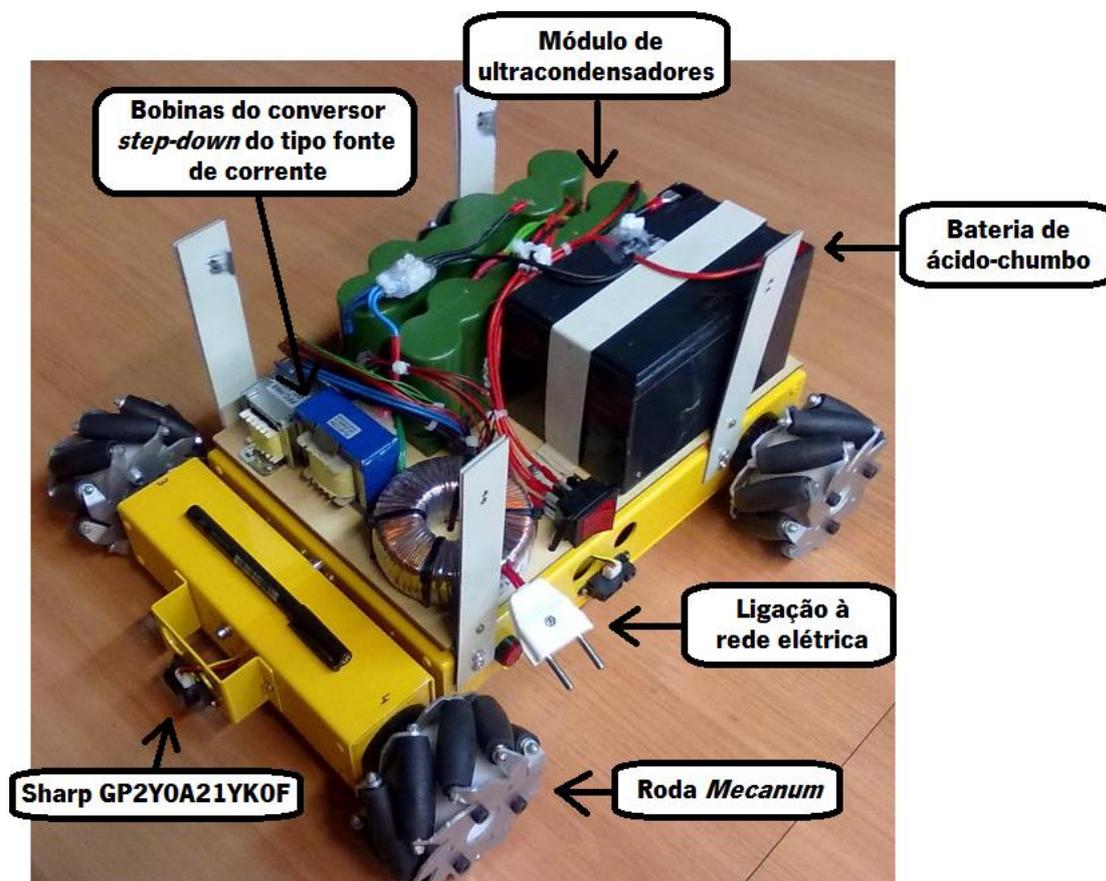


Figura 107 - Principais componentes do sistema de alimentação já fixados à plataforma móvel. Os restantes componentes foram colocados num andar superior, suportado pelas 4 barras cinzentas verticais.

Na Figura 108 evidencia-se a disposição dos componentes no fundo da plataforma móvel, nomeadamente dos interruptores dos sistemas, da cablagem, dos sensores de distância utilizados e dos conjuntos formados pelos motores, caixas redutoras e *encoders*.

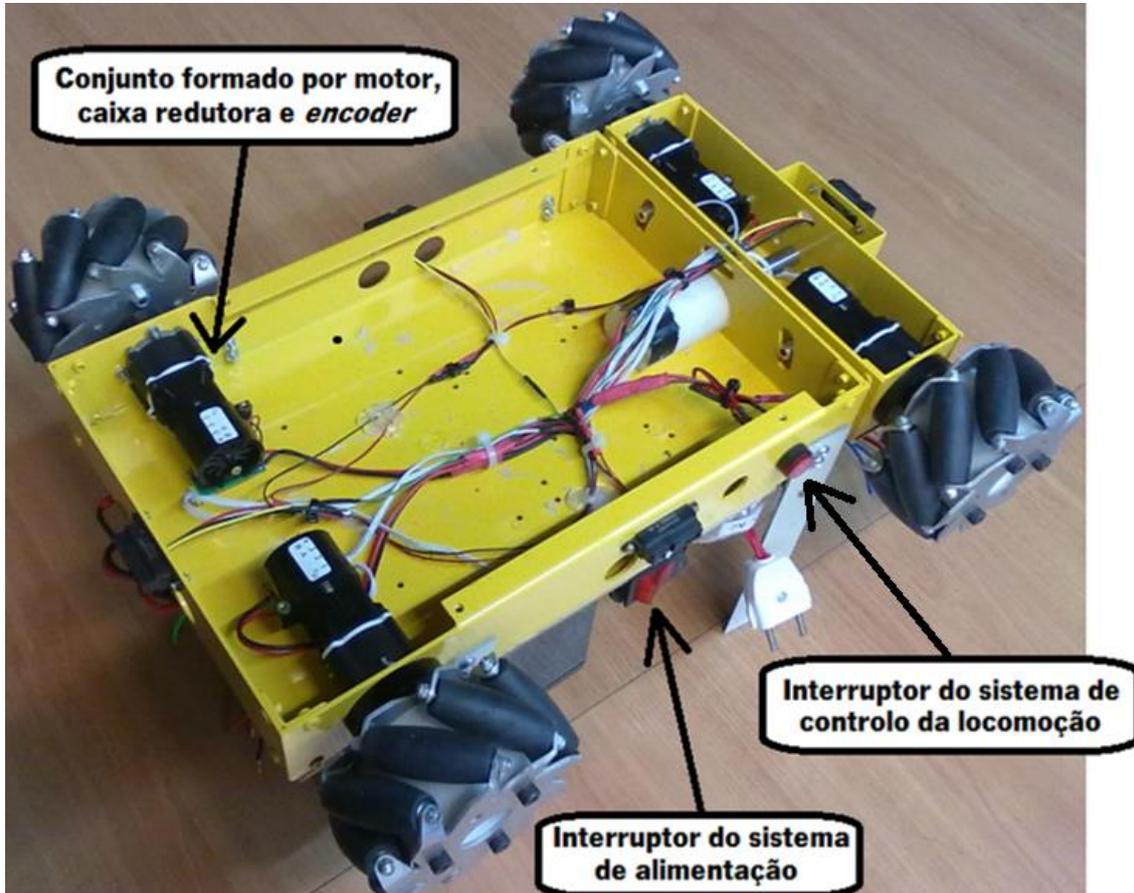


Figura 108 - Componentes instalados no fundo da plataforma móvel omnidirecional.

Na Figura 109 evidencia-se a versão final da plataforma móvel omnidirecional, com todo o *hardware* devidamente instalado e fixado. Nessa figura estão indicados todos os blocos do sistema de alimentação e parte do sistema de controlo da locomoção. A restante parte desse sistema não aparece na figura pois trata-se da aplicação gráfica em computador e do sistema de telecomando, os quais serão apresentados posteriormente.

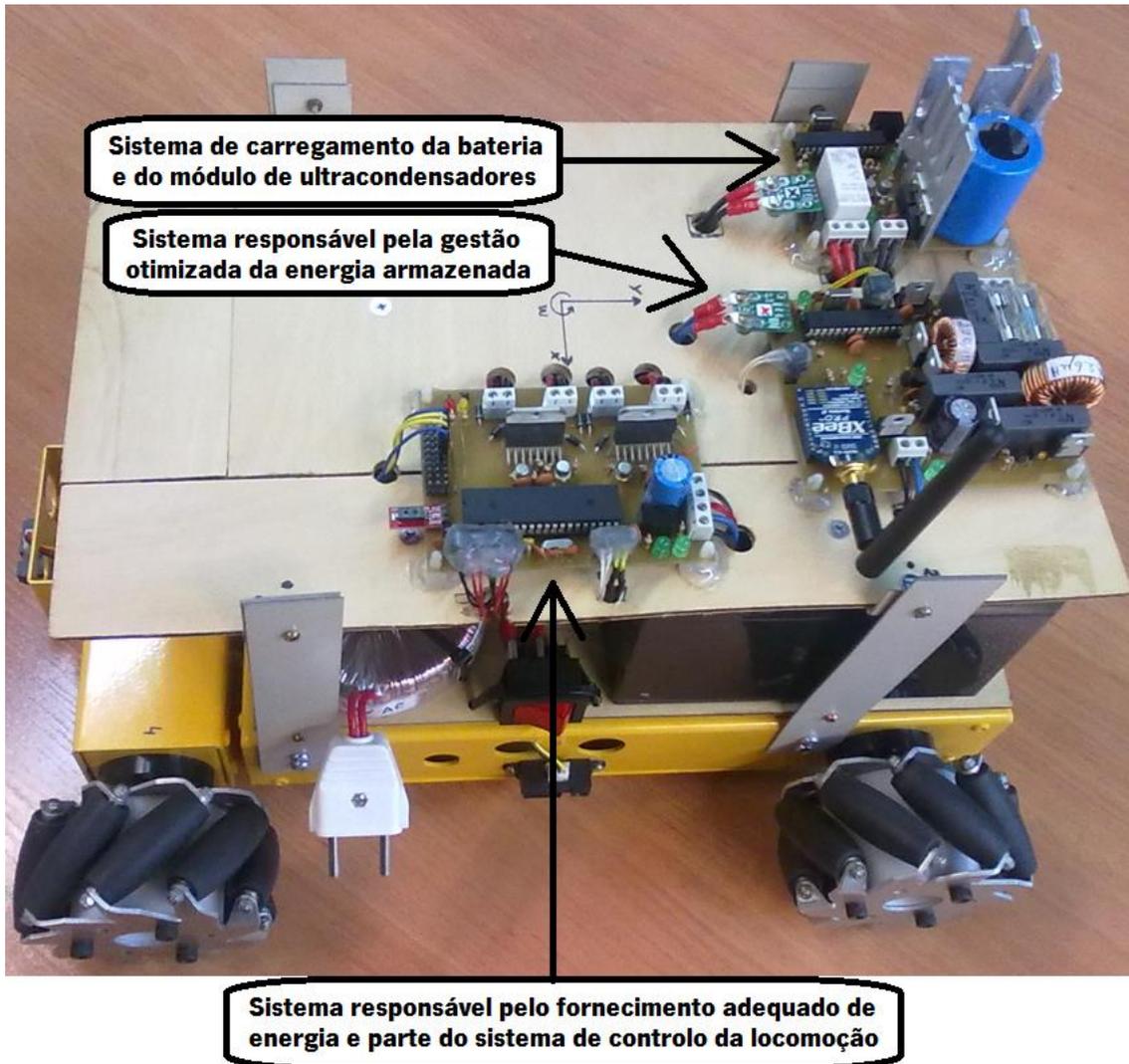


Figura 109 - Versão final da plataforma móvel omnidirecional, com todo o *hardware* devidamente fixado. A parte do sistema de controlo da locomoção não incorporada na plataforma móvel é constituída pela aplicação gráfica em computador e pelo sistema de telecomando inercial.

### 5.1.1. Sensores

A plataforma móvel omnidirecional incorpora um conjunto de sensores cujo objetivo é medir a velocidade de cada roda, a distância a obstáculos, a temperatura ambiente e a humidade relativa do ambiente.

#### 5.1.1.1. Encoders

A velocidade de cada roda foi medida recorrendo a *encoders* óticos incrementais, cujas características foram apresentadas no subcapítulo 5.1. Os *encoders* utilizados apresentam duas saídas (denominadas canais A e B) cujos sinais elétricos se encontram desfasados  $90^\circ$  – são

saídas em quadratura. Nas Figura 110 e 111 apresentam-se as formas de onda da tensão nos canais do *encoder* quando o seu eixo roda no sentido dos ponteiros do relógio e no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, respetivamente.

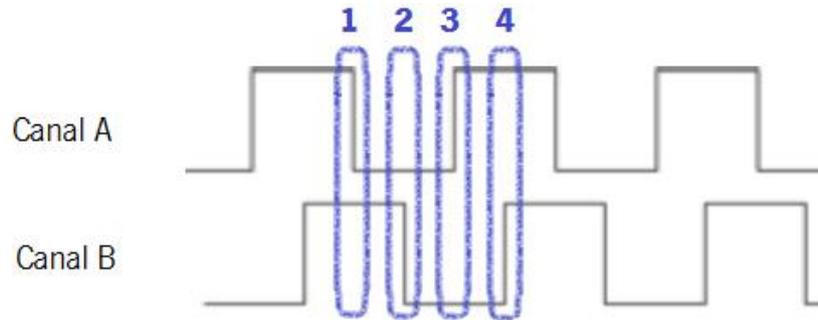


Figura 110 - Formas de onda da tensão nos canais do *encoder* quando o seu eixo roda no sentido dos ponteiros do relógio.

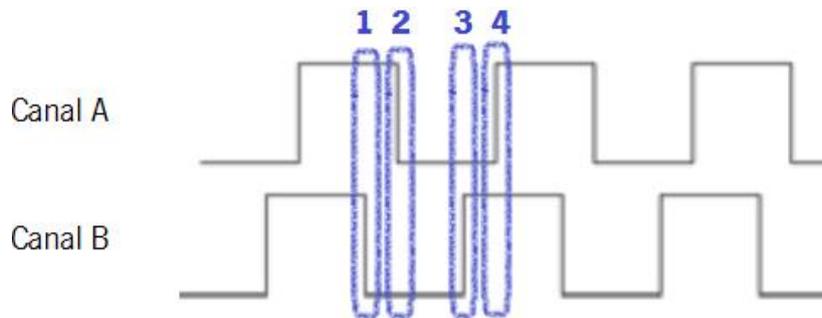


Figura 111 - Formas de onda da tensão nos canais do *encoder* quando o seu eixo roda no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.

As Figura 110 e 111 evidenciam que, por cada ciclo completo de uma forma de onda (isto é, por cada 360°), é possível detetar 4 condições distintas. Este facto, juntamente com os factos de cada caixa redutora apresentar um rácio de 64:1, cada *encoder* estar acoplado diretamente ao motor (em vez de estar acoplado à saída da caixa redutora) e apresentar uma resolução de 12 CPR, permite concluir que a resolução total (RT) de cada *encoder* é dada pela expressão (50). A resolução total consiste no número de impulsos que são detetados pelo microcontrolador quando uma roda *Mecanum* da plataforma móvel dá uma volta completa.

$$RT = 12 \cdot 64 \cdot 4 = 3072 \text{ impulsos/volta} \quad (50)$$

Tendo em conta que o raio de cada roda *Mecanum* é de 50 mm, é possível concluir que a resolução do deslocamento (RD) é dada pela expressão (51). A resolução do deslocamento consiste na menor distância que o microcontrolador é capaz de medir na plataforma móvel.

$$RD = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{3072} = 0,1023 \text{ mm/impulso} \quad (51)$$

### 5.1.1.2. Sensores de infravermelhos

Por forma a evitar que a plataforma móvel colidisse com obstáculos, foram utilizados 4 sensores de distância baseados em infravermelhos – um em cada lado da plataforma. Os sensores instalados de origem implicavam a utilização do protocolo RS-485 e de um *transceiver* que convertesse esse protocolo para UART-TTL. No entanto, no laboratório onde o trabalho foi realizado havia sensores Sharp GP2Y0A21YK0F. Por terem uma *interface* muito mais simples (a saída é analógica), por satisfazerem os requisitos e por já se encontrarem disponíveis, optou-se por estes em detrimento dos instalados de origem. Na Figura 112 apresenta-se o gráfico que relaciona a tensão de saída do sensor Sharp GP2Y0A21YK0F com a distância efetivamente medida a um objeto.

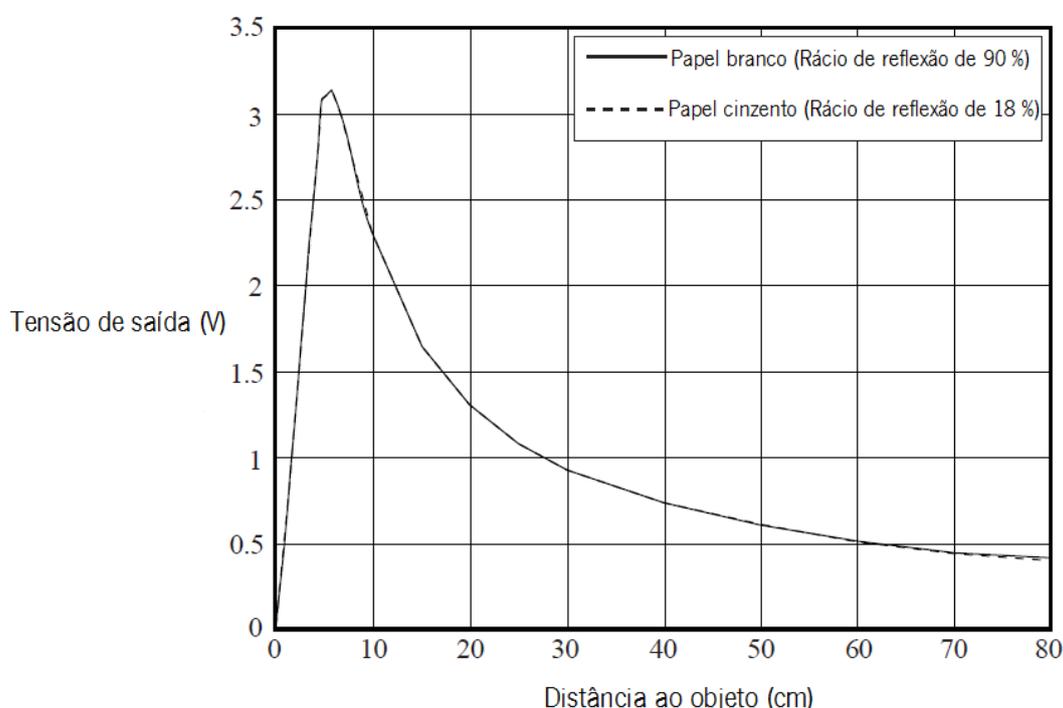


Figura 112 - Gráfico que relaciona a tensão na saída do sensor Sharp GP2Y0A21YK0F com a distância efetivamente medida por ele a um objeto (adaptado de [83]).

### 5.1.1.3. Sensor de temperatura

Para além dos *encoders* e dos sensores de distância, também se incluiu na plataforma móvel um sensor capaz de medir a temperatura ambiente. O sensor utilizado foi o TMP36 [84] pois estava disponível no laboratório onde o trabalho foi realizado, o seu encapsulamento é o TO-92 e possui uma *interface* analógica e simples. Os sensores TMP36 apresentam a seguinte relação entre tensão ( $V$  – em volts) e temperatura ( $T$  – em graus celsius):

$$V = 0,75 + 0,01 \cdot (T - 25) \quad (52)$$

#### 5.1.1.4. Sensor de humidade

O sensor de humidade utilizado foi o HIH-4030 [85]. Trata-se de um sensor de montagem superficial com saída analógica que apresenta a relação entre tensão e humidade relativa evidenciada pelo gráfico da Figura 113.

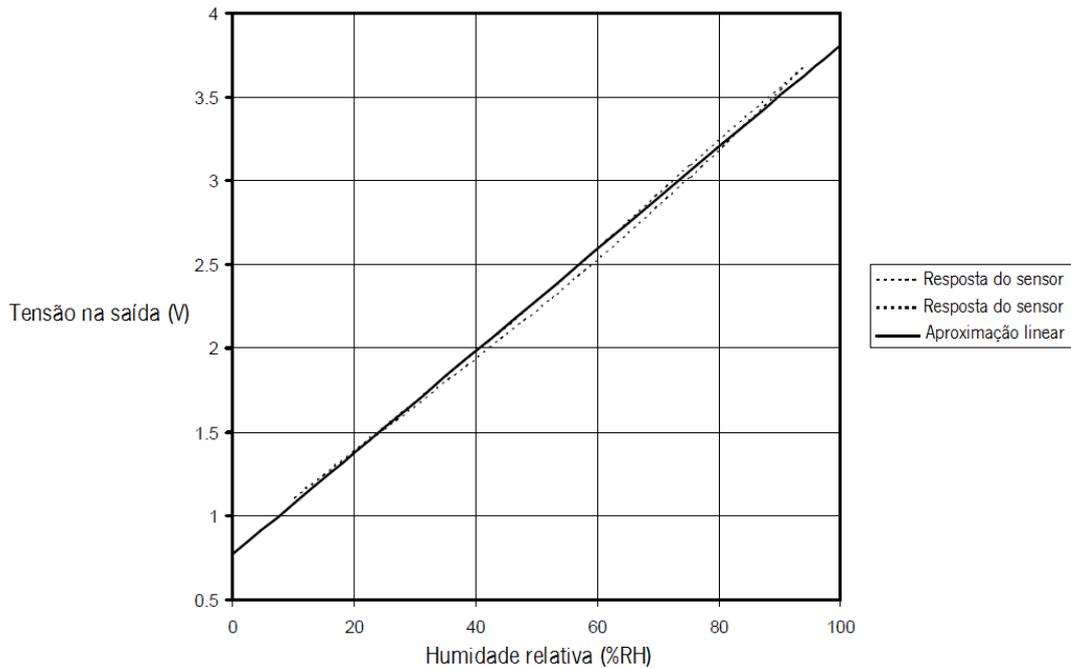


Figura 113 - Relação entre a humidade relativa e a tensão na saída do sensor HIH-4030 (adaptado de [85]).

Na Figura 114 apresenta-se a ligação dos diversos sensores à placa de circuito impresso que implementa o sistema responsável pelo fornecimento adequado de energia e parte do sistema de controlo da locomoção.

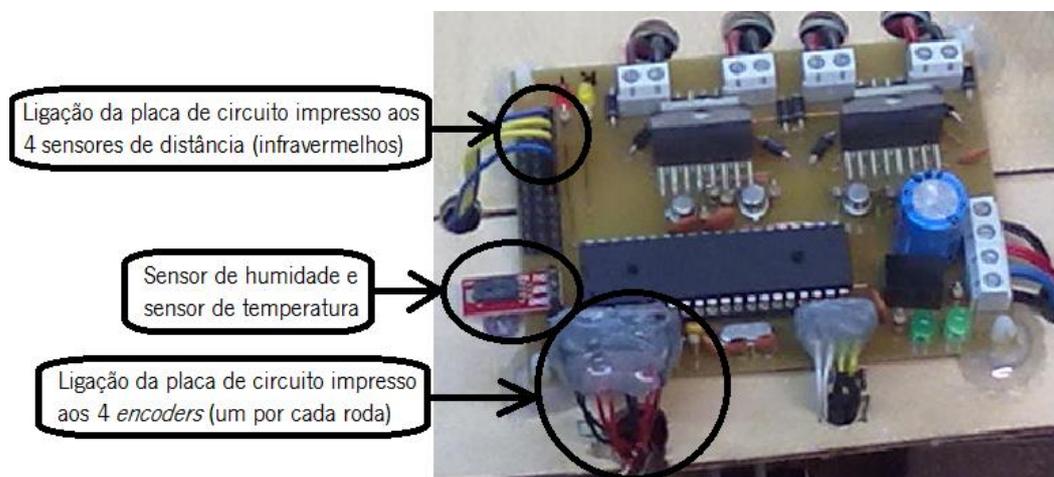


Figura 114 - Ligação dos diversos sensores à placa de circuito impresso.

### 5.1.2. Controlador PID digital

O controlador PID digital é o bloco responsável por garantir que cada roda *Mecanum* da plataforma móvel omnidirecional procura seguir sempre uma velocidade de referência, que pode ser constante ou variável no tempo. Na Figura 115 apresenta-se o fluxograma correspondente ao controlador PID digital aplicado ao motor 1 da plataforma móvel. Na prática foram implementados 4 algoritmos exatamente iguais, isto é, um por cada motor – apenas existe uma distinção no que diz respeito ao nome atribuído às variáveis. Cada um dos algoritmos tem um conjunto de variáveis atómicas intrínsecas ao próprio algoritmo (tais como o “erro” e o “comando”). No apêndice K apresenta-se todo o código-fonte correspondente aos algoritmos que foram desenvolvidos em linguagem C e implementados no microcontrolador Atmel Atmega 1284P.

Para cada um dos 4 algoritmos definiu-se um período de amostragem de 10 ms (corresponde a uma frequência de amostragem de 100 Hz), um ganho proporcional de 0,95, um ganho integral de 19 e um ganho derivativo de 0,0113. Os valores destes parâmetros foram determinados empiricamente até se obter uma estabilidade satisfatória dos algoritmos.

Cada um dos 4 algoritmos arranca com uma inicialização das variáveis. Seguidamente, calcula-se a velocidade de cada roda dividindo o deslocamento (medido pelo respetivo *encoder*) pelo intervalo de tempo correspondente. Depois, faz-se o cálculo das variáveis de erro e de comando. Finalmente, conclui-se o algoritmo implementando o *anti-reset windup* e convertendo a variável de comando num valor efetivo de *duty-cycle*, o qual é aplicado ao respetivo motor através da respetiva ponte H completa.

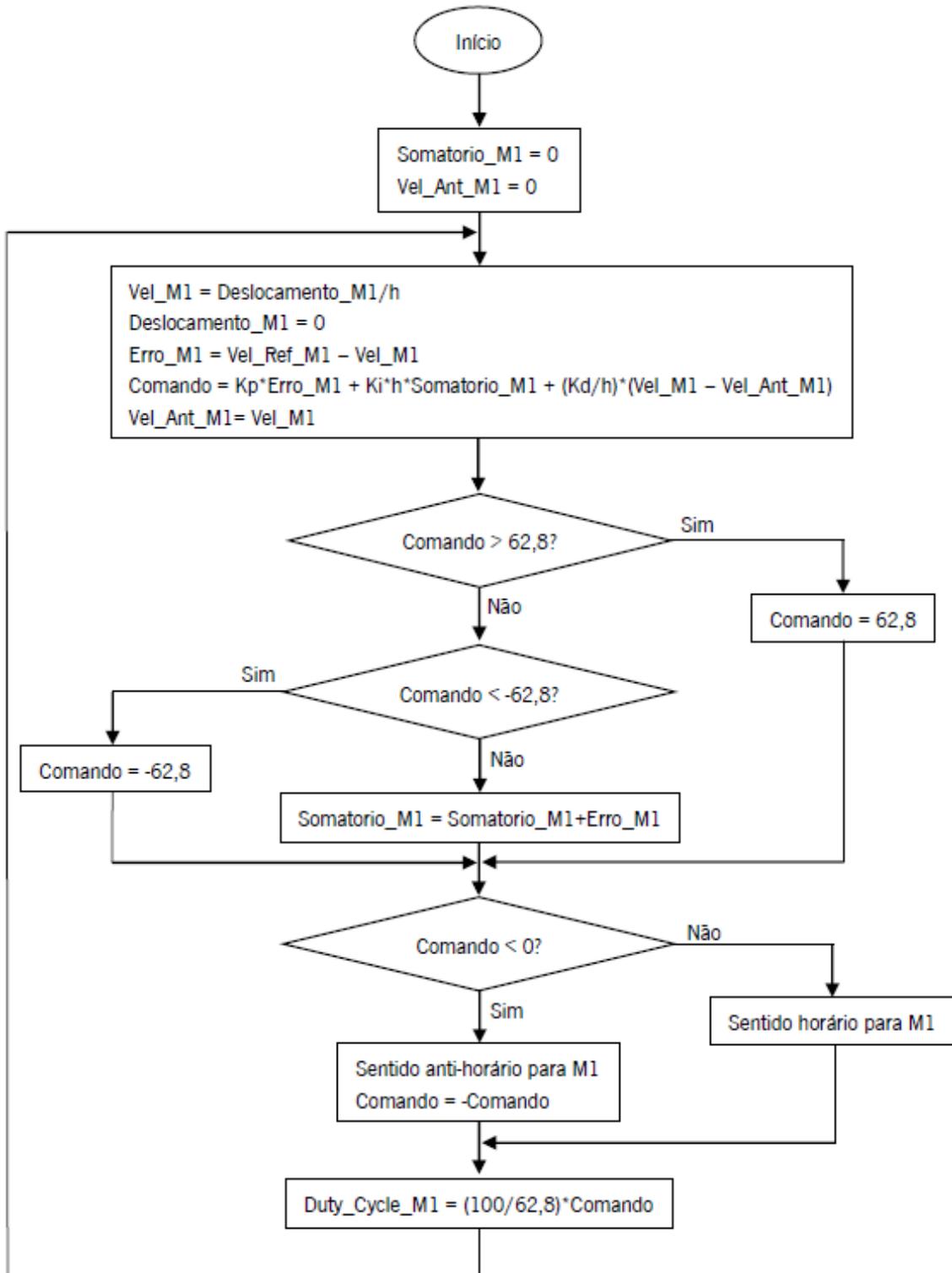


Figura 115 - Fluxograma correspondente ao algoritmo do controlador PID digital aplicado ao motor 1 da plataforma móvel omnidirecional. “Deslocamento\_M1” é o deslocamento medido pelo *encoder* correspondente ao motor 1, “Vel\_Ref\_M1” é a velocidade desejada para o motor 1, “Kp” é o ganho proporcional, “Ki” é o ganho integral, “Kd” é o ganho derivativo e h é o período de amostragem do controlador.

### 5.1.3. As equações da Cinemática

No subcapítulo anterior fez-se a apresentação do controlador PID digital, cujo objetivo é fazer com que a velocidade de cada roda esteja o mais próxima possível da respetiva velocidade desejada (referência), ao longo do tempo. O esquema apresentado na Figura 116 evidencia isso.

A velocidade de referência para cada roda *Mecanum* é a entrada do controlador PID digital. Um aspeto extremamente importante no sistema de controlo da locomoção consiste na conversão da velocidade desejada, por parte do utilizador, para a velocidade de referência de cada uma das 4 rodas *Mecanum*. As equações da Cinemática consistem num conjunto de operações matemáticas que são indispensáveis para se fazer essa conversão (Figura 117).

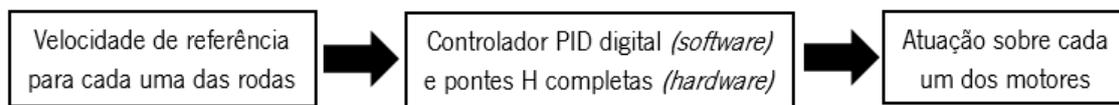


Figura 116 - Esquema que relaciona a velocidade de referência com o controlador PID digital e com a atuação.

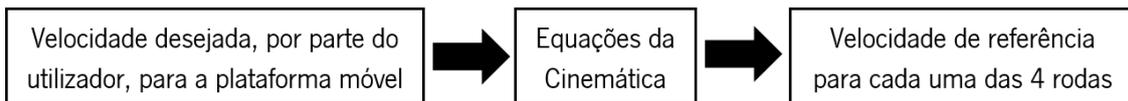


Figura 117 - Esquema que evidencia o papel das equações da Cinemática no sistema de controlo da locomoção.

No subcapítulo 2.2.4 fez-se a apresentação detalhada do sistema de direção implementado na plataforma móvel omnidirecional. Na Figura 118 faz-se-lhe novamente referência. Nesse subcapítulo também se fez a apresentação do modelo (6), o qual apresenta (de forma condensada) as 4 equações da Cinemática responsáveis pela conversão referida.

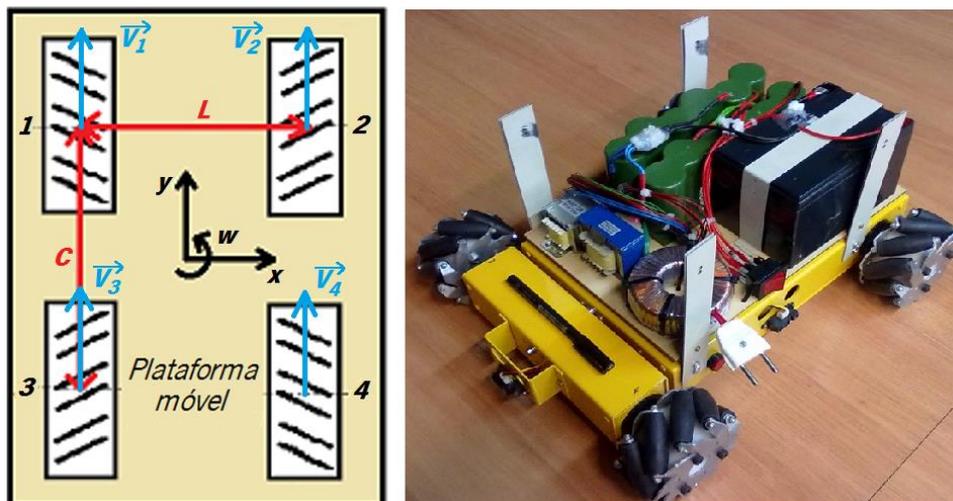


Figura 118 - Sistema de direção implementado na plataforma móvel omnidirecional.

Para comandar convenientemente a plataforma móvel, um utilizador tem de especificar (direta ou indiretamente) uma velocidade linear segundo o eixo das abcissas, uma velocidade

linear segundo o eixo das ordenadas e uma velocidade angular em torno do eixo das cotas. Devido a este facto, fez-se a marcação de um referencial na plataforma móvel omnidirecional que indica o sentido positivo e a direção de cada eixo (Figura 119).

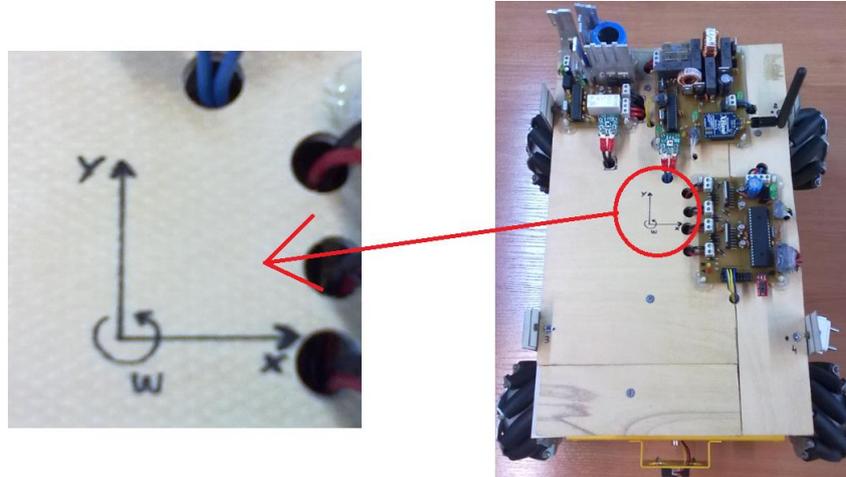


Figura 119 - Referencial marcado na plataforma móvel omnidirecional com os 3 eixos devidamente representados.

Através da implementação do modelo (6), apresentado no subcapítulo 2.2.4, foi possível converter as 3 componentes da velocidade da plataforma móvel (uma por cada eixo marcado) nas 4 velocidades de referência do controlador PID digital (uma por cada roda *Mecanum*). Nesse modelo, os valores considerados para as constantes C e L foram 3,36 dm e 3,14 dm respetivamente (são as distâncias medidas que estão assinaladas a vermelho na Figura 118). No apêndice K está o código-fonte responsável pela implementação das equações da Cinemática.

### 5.1.4. Comunicação *Wireless*

Como já foi referido no subcapítulo 1.6, há duas possibilidades para se comandar a plataforma móvel omnidirecional. Uma delas é a partir de uma aplicação gráfica em computador, enquanto a outra se faz recorrendo a um sistema de telecomando inercial. Ambas as possibilidades requerem uma comunicação *wireless* por forma a poder haver troca de informação entre a plataforma móvel omnidirecional e cada uma delas. É através da comunicação *wireless* que um utilizador pode especificar (direta ou indiretamente) as 3 componentes da velocidade.

A comunicação *wireless* é estabelecida com recurso a 2 módulos *XBee Pro Series 2*. Um deles está instalado na plataforma móvel enquanto o outro pode ser ligado ao computador (devido à aplicação gráfica) ou ao sistema de telecomando. Optou-se por estes módulos pois possuem diversas características vantajosas, tais como o uso de um protocolo de comunicação robusto e

passível de ser encriptado (*IEEE 802.15.4*), um alcance máximo de 1500 m (*outdoor, line-of-sight*), um baixo consumo energético e o facto de oferecerem a possibilidade de formar desde redes ponto-a-ponto (mais simples) até redes em malha (mais complexas) [16] [86].

As redes *wireless* baseadas em módulos *XBee Pro Series 2* podem apresentar um das topologias evidenciadas na Figura 120. Essa figura também evidencia que cada módulo pode ser operar como coordenador, *router* ou *end-device*. Independentemente da topologia, numa rede tem que existir sempre um e só um coordenador. As suas principais funções são a criação e a gestão da rede. O *router*, como o próprio nome sugere, tem como principal função reencaminhar dados entre módulos quando a rede é extensa. O *end-device* tem como principal função estar junto a um sensor ou atuador por forma a entregar ou enviar dados para outros módulos da rede.

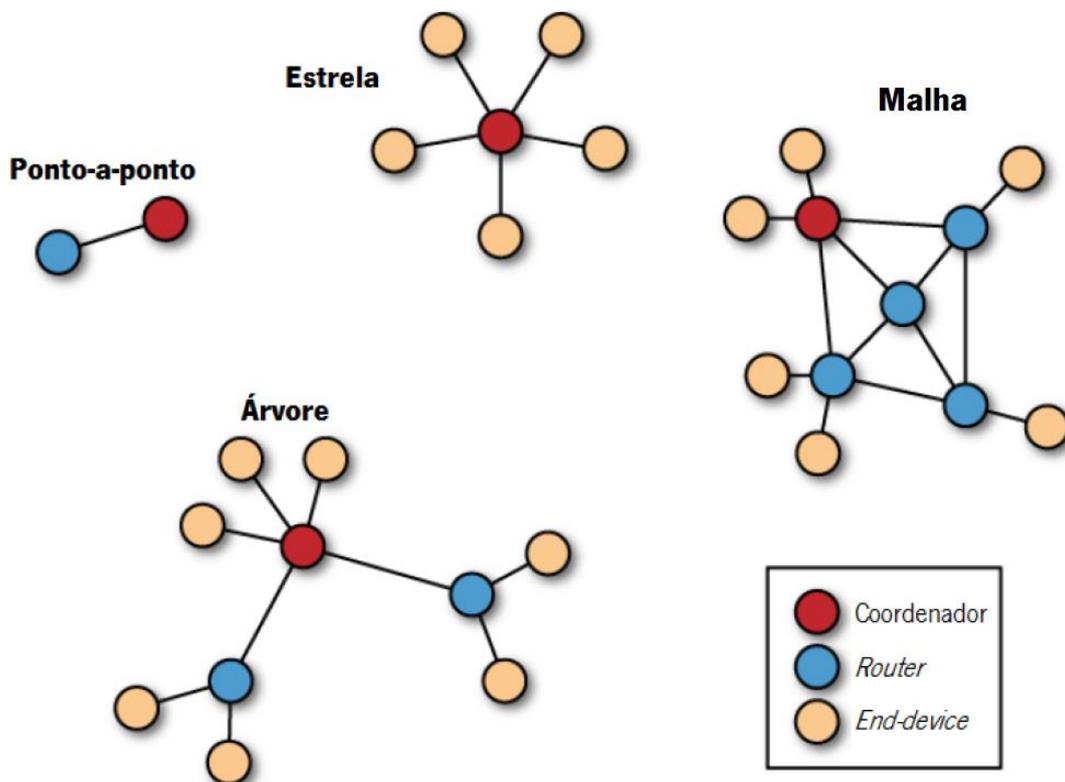


Figura 120 - Topologias de rede que é possível formar com módulos *XBee Pro Series 2* (adaptado de [86]).

Os módulos *XBee Pro Series 2* implementam o protocolo UART-CMOS para que se possa fazer a *interface* com um microcontrolador ou para serem programados externamente. Como foram usados somente 2 módulos, decidiu-se criar a topologia de rede ponto-a-ponto. A programação dos módulos foi feita com recurso ao *software* X-CTU [87] e à placa de circuito impresso *Xbee Explorer USB* [88]. Na Figura 121 fazem-se as apresentações correspondentes à placa de circuito impresso e à configuração que foi definida para o coordenador e para o *router*.

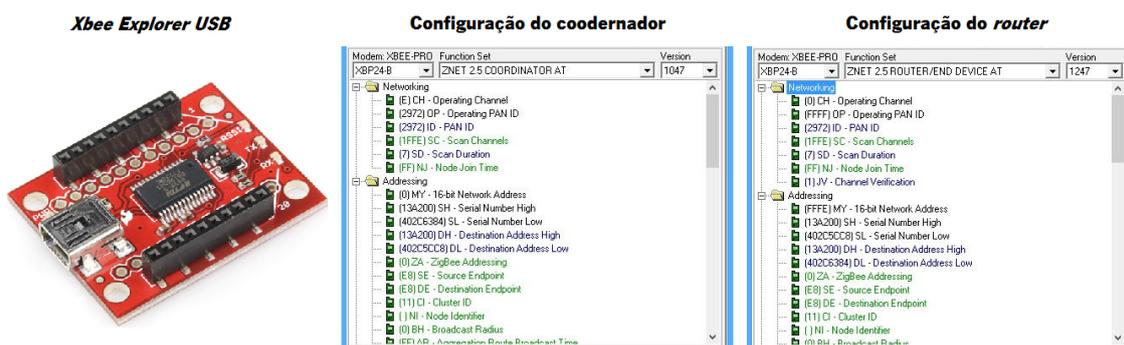


Figura 121 - À esquerda apresenta-se a placa de circuito impresso utilizada para programar os módulos [88]. Ao centro e à direita apresentam-se as configurações que foram definidas para o coordenador e para o *router* respetivamente.

O módulo coordenador foi instalado na plataforma móvel porque só faz sentido criar uma rede caso a plataforma móvel esteja ligada. Uma vez ligada, o módulo *router*, que pode alternar entre computador (aplicação gráfica) e sistema de telecomando, conecta-se à rede previamente estabelecida pelo módulo coordenador.

## 5.2. A aplicação gráfica em computador

A aplicação gráfica em computador trata-se de um programa informático que foi desenvolvido com o propósito de permitir a interação entre um utilizador e a plataforma móvel. A aplicação foi desenvolvida em linguagem C#, para a plataforma Windows, com recurso ao *software* Microsoft Visual Studio 2013 [89]. O código-fonte da aplicação encontra-se no apêndice L.

A comunicação entre a aplicação gráfica e a plataforma móvel é orientada à trama, ou seja, sempre que é necessário transmitir informação de um lado para o outro, criam-se e enviam-se tramas. As tramas foram definidas segundo a estrutura apresentada na Tabela 6. Houve a necessidade de estabelecer essa estrutura pois só dessa forma foi possível enviar diferentes tipos de dados através do mesmo canal de comunicação.

Tabela 6 - Estrutura das tramas usadas na comunicação *wireless*.

Número do byte	Valor do byte
1 (Byte iniciador)	'\$'
2 até n	Bytes com informação útil
n + 1 (Byte terminador)	'\r'

A aplicação gráfica desenvolvida é composta essencialmente por duas janelas (na linguagem C# são denominadas *Forms*). A primeira janela visa estabelecer a ligação entre a

aplicação e a plataforma móvel. A segunda janela tem como objetivo possibilitar o comando e a monitorização da plataforma móvel por parte do utilizador.

### 5.2.1. Primeira janela – Configuração da ligação *wireless*

A primeira janela da aplicação gráfica é aquela que se apresenta na Figura 122. O seu propósito é permitir o estabelecimento da comunicação *wireless* entre o computador e a plataforma móvel. Para que tal seja possível, é necessário que a plataforma móvel se encontre ligada e que o módulo *XBee Pro Series 2 router* esteja conectado ao computador através da placa de circuito impresso *Xbee Explorer USB*.



Figura 122 - Primeira janela da aplicação gráfica desenvolvida em linguagem C# para a plataforma Windows.

A janela foi idealizada para ser simples e intuitiva. Através do botão “Procurar” é possível listar todas as portas série que o computador possui. Uma vez listadas, basta o utilizador selecionar aquela que corresponde ao módulo *XBee Pro Series 2 router* e clicar no botão “Ok”. Se todas as condições anteriormente referidas se verificarem, a primeira janela fecha e dá lugar à segunda. Se algo de errado ocorrer, a aplicação reporta uma das notificações apresentadas na Figura 123, consoante o tipo de erro.

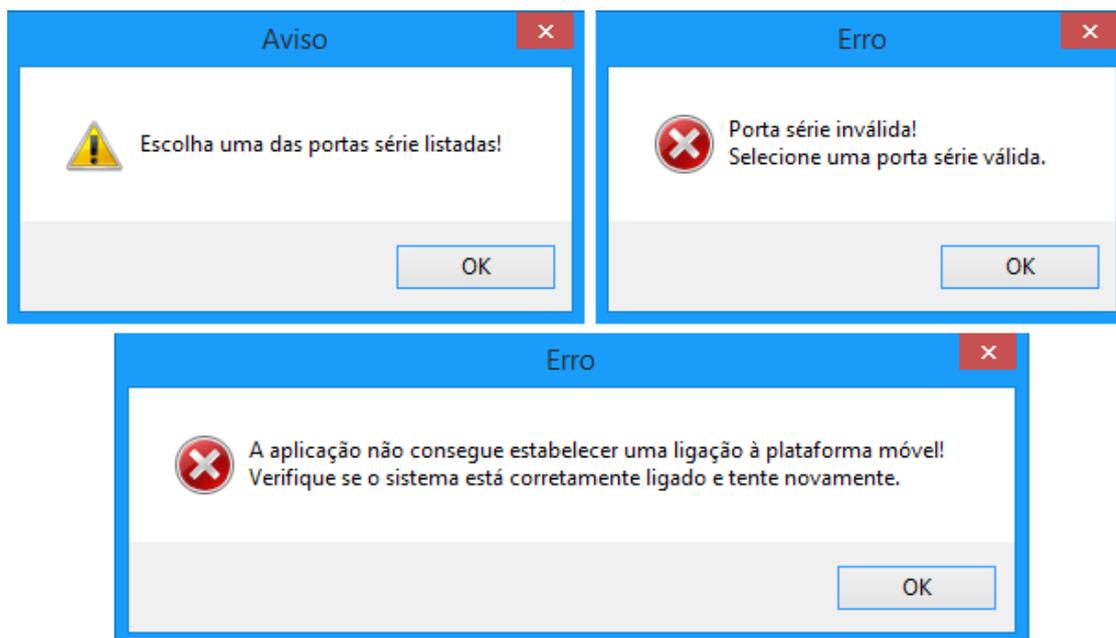


Figura 123 - Avisos e erros que a primeira janela da aplicação gráfica pode reportar.

### 5.2.2. Segunda janela – Controlo da plataforma móvel omnidirecional

A segunda janela da aplicação gráfica é aquela que se apresenta na Figura 124. Esta janela é composta por 4 separadores, os quais visam monitorizar e comandar a plataforma móvel, nomeadamente:

- “Estado do sistema”;
- “Monitorização das rodas”;
- “Seleção de movimentos”;
- “Modos automáticos”.

O primeiro separador, denominado “Estado do sistema”, tem carácter informativo e, por isso, visa informar o utilizador sobre o estado das principais variáveis da plataforma móvel. No separador é possível verificar o seguinte:

- Se a ligação *wireless* foi estabelecida com sucesso;
- O valor da temperatura ambiente do meio envolvente à plataforma móvel;
- O valor da humidade relativa do meio envolvente à plataforma móvel;
- O valor da potência elétrica consumida pelo sistema;
- O valor da tensão na saída do sistema responsável pela gestão otimizada da energia;

- O valor da tensão na bateria;
- O valor da tensão no módulo de ultracondensadores;
- O valor da distância da plataforma móvel a obstáculos para cada um dos seus 4 lados.

Na Figura 124 apresenta-se o primeiro separador da segunda janela da aplicação gráfica. De salientar que os diversos valores apresentados na figura foram obtidos numa situação real, com a plataforma móvel em funcionamento. No momento em que a Figura 124 foi obtida, a ligação *wireless* tinha sido estabelecida com sucesso, a temperatura ambiente era de 20 °C, a humidade relativa era de 57%, a potência eléctrica exigida pela plataforma móvel era de 1,7 W, a tensão na saída do sistema responsável pela gestão otimizada da energia era de 12,4 V, a tensão na bateria era de 12 V, a tensão no módulo de ultracondensadores era de 12,8 V (o sistema estava a recorrer exclusivamente à energia armazenada no módulo de ultracondensadores) e as distâncias a obstáculos para a frente, trás, esquerda e direita eram 24,1 cm, 54,4 cm, 80 cm e 26,6 cm respetivamente.

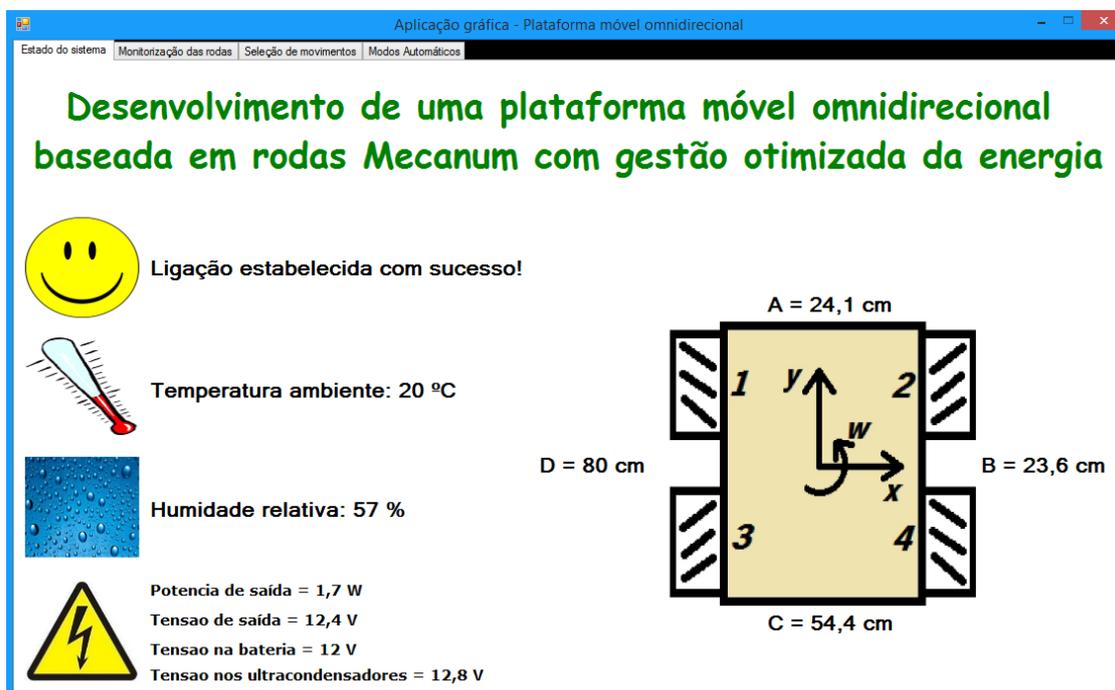


Figura 124 - Primeiro separador da segunda janela – Estado do sistema.

O segundo separador, denominado “Monitorização das rodas”, também tem carácter informativo. Este visa informar o utilizador sobre o valor da velocidade que cada roda possui em cada instante de tempo. O separador possui uma indicação para a velocidade instantânea e um

gráfico com 3 variáveis por cada roda – variável de erro, velocidade de referência, a velocidade medida. A velocidade de referência trata-se da velocidade que cada roda *Mecanum* deveria possuir por forma a executar um dado movimento desejado (trata-se da entrada do controlador PID digital já referido). A velocidade medida é a velocidade efetiva que cada roda possui. A variável de erro é a diferença entre a velocidade de referência e a velocidade medida. Idealmente, a variável de erro deveria possuir sempre um valor nulo (significaria que cada roda possuiria sempre uma velocidade idêntica à velocidade de referência). Para além disto, o separador foi dotado de 2 botões, denominados “Bloquear” e “Libertar”, cujo propósito é facilitar a recolha de dados a partir dos gráficos. Através dos botões é possível permitir ou impedir a atualização dos gráficos conforme a plataforma se vai movimentando. A Figura 125 apresenta o aspeto do segundo separador numa situação real em que a plataforma móvel estava em movimento.

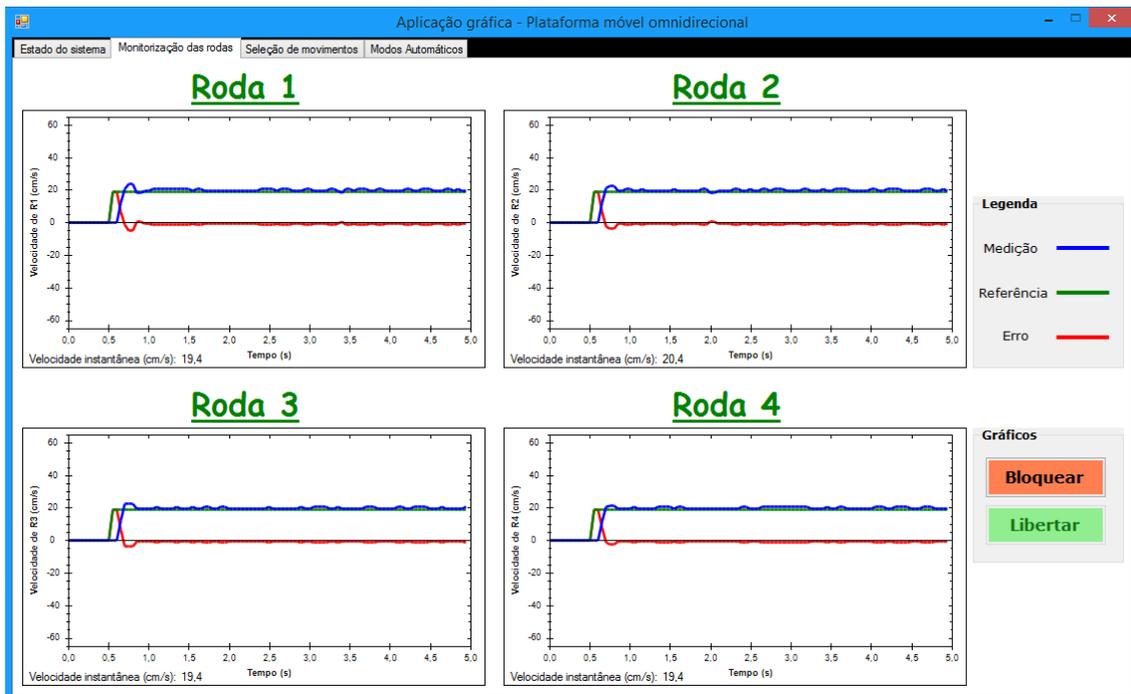


Figura 125 - Segundo separador da segunda janela – Monitorização das rodas.

O terceiro separador, denominado “Seleção de movimentos”, tem carácter de atuação. O seu objetivo é dar a possibilidade ao utilizador de introduzir as 3 componentes de velocidade características do modelo da Cinemática (velocidade de rotação em torno do eixo das cotas e velocidades lineares segundo os eixos das abcissas e ordenadas). Na Figura 126 apresenta-se o aspeto do separador, numa situação real em que foi atribuída uma velocidade de 15 cm/s no eixo das abcissas, uma velocidade de 12,3 cm/s no eixo das ordenadas e uma velocidade angular de

-0.24 rad/s no eixo das cotas. O referencial considerado é aquele que se apresenta no separador e que coincide com o que foi marcado na plataforma móvel.

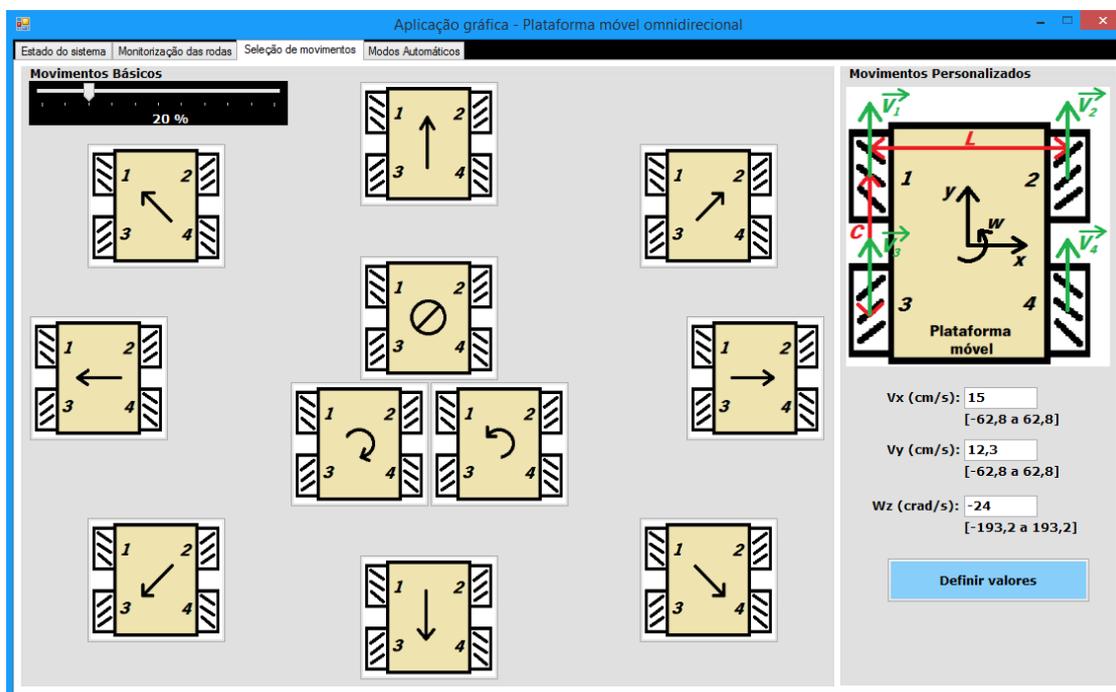


Figura 126 - Terceiro separador da segunda janela – Seleção de movimentos.

No terceiro separador, a inserção das 3 componentes de velocidade pode ser feita de forma manual ou semiautomática. Na inserção manual, o utilizador digita o valor desejado para cada uma individualmente (por isso consistem de movimentos personalizados). Após os digitar basta clicar no botão “Definir valores” para que estes sejam processados e executados. Na inserção semiautomática, o utilizador limita-se a escolher um dos 11 movimentos básicos possíveis e a percentagem de velocidade que deseja. Isto é, o utilizador pode especificar, por exemplo, que quer um movimento de translação para a direita cuja velocidade é 50% da velocidade máxima admissível.

Para além do microcontrolador Atmel ATmega 1284P, a aplicação gráfica também possui a implementação do modelo cinemático que rege o sistema de direção da plataforma móvel. Devido a este facto, se o utilizador inserir valores de velocidade que a plataforma móvel não pode executar (por limitações de natureza física) a aplicação reporta os respetivos erros, os quais são apresentados na Figura 127.

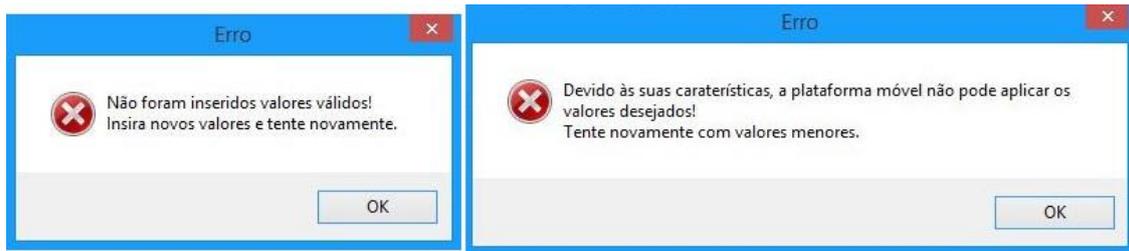


Figura 127 - Erros que a aplicação gráfica pode reportar se os valores de velocidade especificados não forem exequíveis.

O quarto separador, denominado “Modos automáticos”, também tem carácter de atuação. O seu objetivo é oferecer ao utilizador a possibilidade de definir ações que envolvam um grau de automação para a plataforma móvel. Nesse sentido, foram implementados 2 modos automáticos, nomeadamente o “Modo Seguidor” e o “Modo Movimento Lateral”. Por questões de segurança, nestes modos fez-se a implementação de uma restrição que impede que a velocidade de referência exceda os 30 cm/s. Na Figura 128 apresenta-se o aspeto do quarto separador numa situação real em que a plataforma móvel estava em movimento e o “Modo Seguidor” se encontrava ativado.

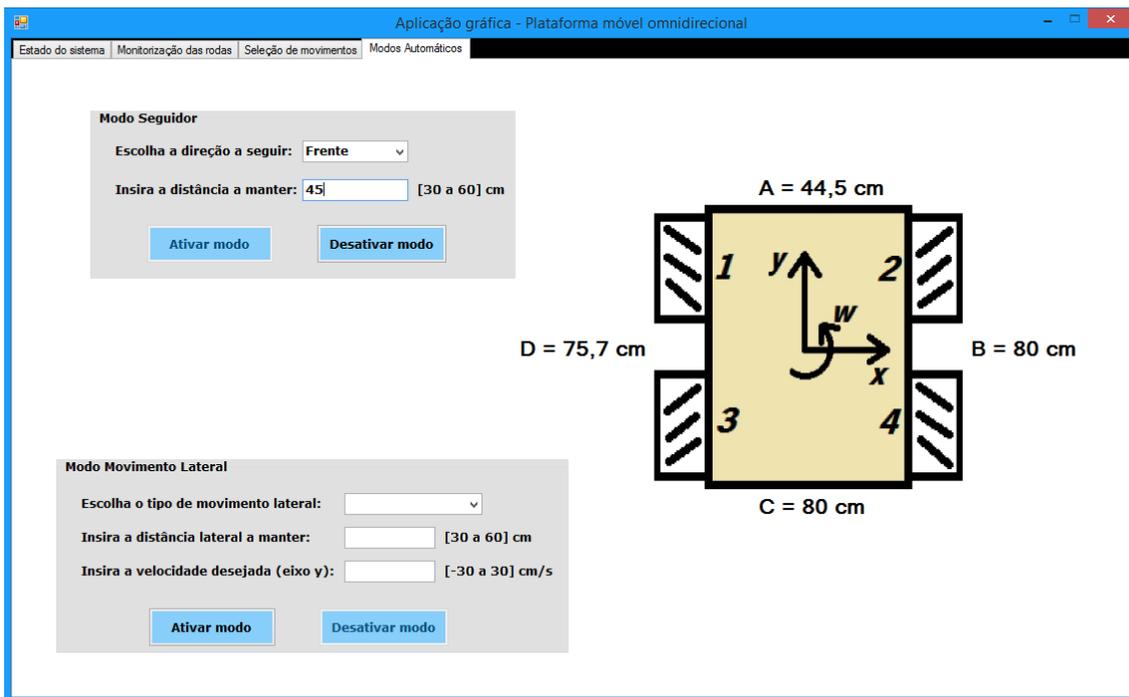


Figura 128 - Quarto separador da segunda janela – Modos Automáticos.

O “Modo Seguidor” trata-se de um modo de operação no qual a plataforma móvel procura manter sempre uma distância constante a um objeto numa determinada direção. Como a plataforma móvel possui apenas 4 sensores de distância, apenas se considerou 4 direções: frente (parte positiva do eixo das ordenadas), trás (parte negativa do eixo das ordenadas), esquerda (parte negativa do eixo das abcissas) e direita (parte positiva do eixo das abcissas). Para cada uma dessas

4 direções, o utilizador pode especificar a distância desejada, que é definível numa gama compreendida entre os 30 e os 60 cm. Uma vez definida a direção e a distância desejadas, a plataforma móvel movimenta-se autonomamente por forma a tentar manter a distância especificada na direção especificada. Trata-se de um modo de operação útil para, por exemplo, um *AGV* omnidirecional seguir um determinado objeto numa linha de montagem numa indústria.

O “Modo Movimento Lateral” trata-se de um modo de operação no qual a plataforma móvel procura, de forma autónoma, manter uma distância lateral aproximadamente constante e, simultaneamente, deslocar-se com uma determinada velocidade para a frente ou para trás. Para ativar este modo é necessário especificar o tipo de movimento lateral (pode ser lateral esquerda ou lateral direita), a distância lateral a manter a um determinado objeto (definível numa gama compreendida entre os 30 e os 60 cm) e a velocidade desejada (definível numa gama compreendida entre os -30 e os 30 cm/s). Este modo de operação pode, por exemplo, ser aplicado a uma cadeira de rodas elétrica omnidirecional – através deste modo a cadeira pode deslocar-se autonomamente de forma paralela a uma montra, o que possibilita a observação da mesma, de forma despreocupada, por parte de um utilizador.

Se o utilizador não especificar corretamente os parâmetros de qualquer um dos 2 modos disponíveis, estes nunca serão ativados e será sempre reportado um dos erros apresentados na Figura 129.

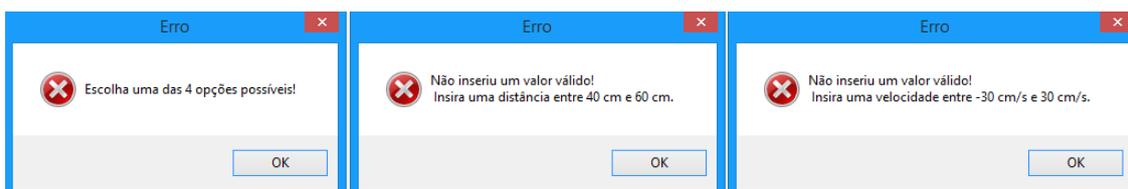


Figura 129 - Erros que a aplicação gráfica pode reportar se os parâmetros dos 2 modos automáticos não forem corretamente definidos.

Para se fazer a implementação dos 2 modos de operação referidos, recorreu-se a um controlador proporcional digital típico, o qual foi implementado no *software* da aplicação gráfica (em vez de ter sido implementado no microcontrolador Atmel ATmega 1284P). O controlador proporcional digital implementado apresenta um ganho 0,6 e um período de amostragem de 200 ms (são valores determinados empiricamente que garantem a estabilidade do mesmo). No caso do “Modo Seguidor”, as entradas do controlador proporcional digital são a distância de referência e a distância medida. A saída dele corresponde à componente de velocidade que estiver na mesma

direção que o utilizador especificou para fazer o seguimento (Figura 130). Neste modo as restantes componentes são sempre nulas. As 3 componentes são então convertidas para as 4 velocidades (uma por cada roda) – através do modelo da Cinemática – que, por si só, já são as referências do controlador PID digital (apresentado no subcapítulo 5.1.2).

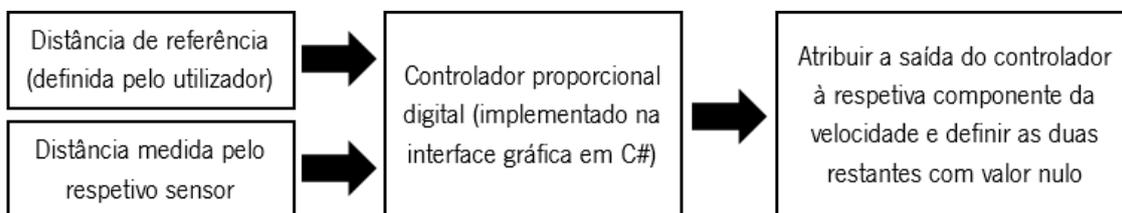


Figura 130 - Diagrama que evidencia as entradas e a saída do controlador proporcional digital no qual o "Modo Seguidor" se baseia.

No "Modo Movimentos Laterais" o controlador proporcional digital opera exatamente da mesma forma que no "Modo Seguidor". A diferença entre os modos consiste no facto de no "Modo Movimentos Laterais" existir uma segunda componente de velocidade que pode conter um valor não nulo. Isto é, a componente de rotação é mantida sempre com valor nulo enquanto as duas restantes podem conter valores não nulos – a componente correspondente ao eixo das abcissas contém o valor da saída do controlador proporcional digital enquanto a componente correspondente ao eixo das ordenadas contém o valor da velocidade especificada pelo utilizador.

Quando um dos modos automáticos é ativado, de imediato passam a estar disponíveis duas formas para o desativar. A primeira é manual e consiste num comando por parte do utilizador através de um clique num botão da aplicação gráfica. A segunda é automática e é despoletada sempre que a distância numa das 4 direções da plataforma móvel for inferior a 15 cm e, simultaneamente o movimento da mesma tiver uma componente vetorial que cause uma diminuição da distância nessa direção. Sempre que um dos modos automáticos é desativado, a plataforma imobiliza-se e fica a aguardar por novos comandos.

### 5.2.3. Resultados experimentais da interação entre a aplicação e a plataforma

Os resultados experimentais resultantes da interação entre a aplicação gráfica e a plataforma móvel omnidirecional são apresentados no presente subcapítulo.

Em primeiro lugar, apresentam-se os resultados correspondentes à precisão com que a aplicação gráfica reporta as grandezas elétricas mensuradas. Verificou-se que os valores da tensão na bateria, no módulo de ultracondensadores e na saída do sistema responsável pela gestão

otimizada da energia apresentam um erro máximo de 0,2 V. Significa isto que, por exemplo, se a tensão no módulo de ultracondensadores for de 15 V, o erro máximo é de 1,33%. Isto deve-se ao facto de ter sido imposta uma limitação no número de algarismos significativos na comunicação *wireless*. Quanto ao valor da potência elétrica reportada, verificou-se um erro máximo de 23,7%, o qual se deve essencialmente à resolução do *ADC* do Atmel ATmega 1284P e à limitação imposta no número de algarismos significativos.

Em segundo lugar, quanto aos resultados correspondentes à medição da distância a objetos, verificou-se que o erro na medição varia consoante a geometria, a cor, a constituição e o material do respetivo objeto. Considerando como objeto um papel branco orientado diretamente para o sensor, verificou-se que o erro máximo é 3,2 cm (segundo o *datasheet* [83], os sensores estão preparados para medir na gama compreendida entre os 7 e os 80 cm).

Em terceiro lugar, quanto aos resultados correspondentes aos *encoders*, estes são apenas teóricos devido à falta de equipamento capaz de medir a velocidade das rodas com a exatidão necessária. Sabendo que a resolução dos *encoders* é de 0,1023 mm/impulso (os cálculos foram apresentados no subcapítulo 5.1.1.1) então é possível concluir que o erro máximo possível numa medição do deslocamento é de 0,05115 mm. Numa volta completa de uma roda, o erro percentual é praticamente nulo.

Em quarto lugar, em relação aos sensores de temperatura e humidade relativa, devido à falta de equipamento capaz de medir a temperatura e a humidade relativa com a exatidão necessária, consideraram-se as precisões especificadas nos *datasheets* [84] [85] dos mesmos.

Finalmente, nos parágrafos seguintes apresentam-se os resultados relativos ao desempenho do controlador PID digital implementado no microcontrolador Atmel ATmega 1284P. Estes resultados foram obtidos com a plataforma móvel colocada num plano horizontal, liso e com boa aderência. Recorde-se que, nos gráficos traçados pela aplicação gráfica para cada roda, a linha verde representa a velocidade de referência, a linha azul representa a velocidade medida e a linha vermelha representa o erro.

Na Figura 131 apresentam-se os resultados do controlador PID digital, em regime permanente, numa situação em que as 3 componentes da velocidade de referência são 10 cm/s, 10 cm/s e 0,1 rad/s (eixos das abcissas, das ordenadas e das cotas respetivamente). Estes

resultados permitem constatar que, para a situação experimentada, o erro em regime permanente é praticamente nulo, apresentando apenas um pequeno ruído pouco significativo.

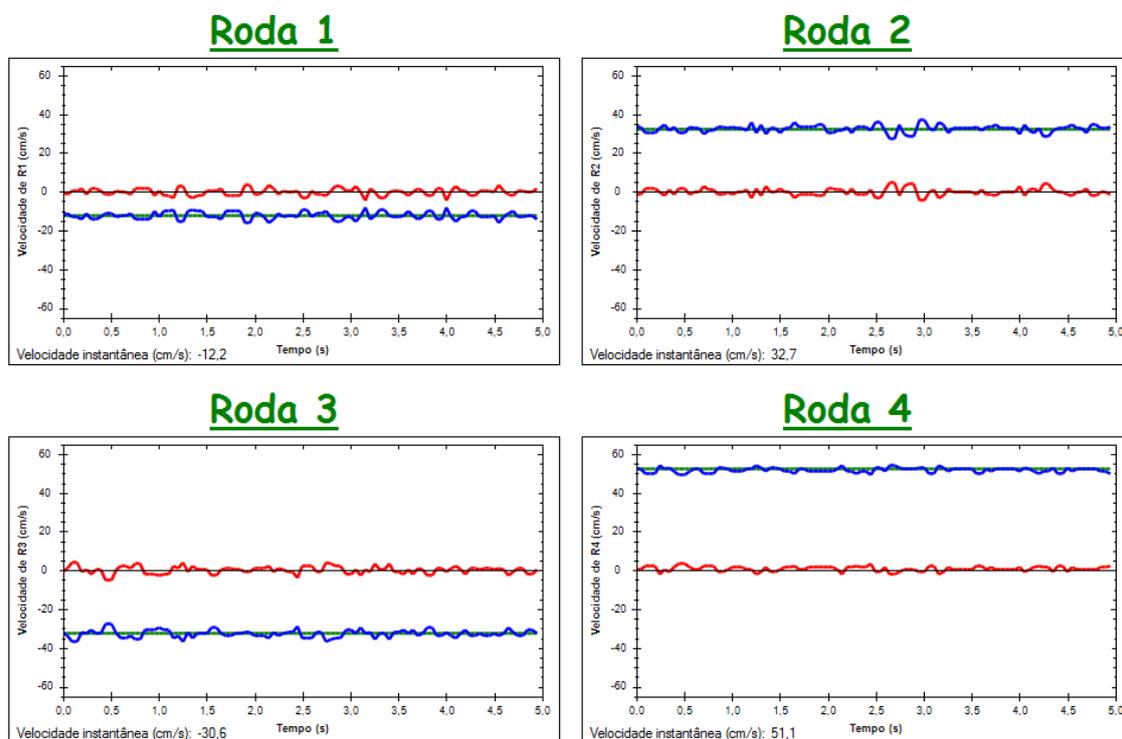


Figura 131 - Desempenho do controlador PID digital, em regime permanente, quando as 3 componentes da velocidade de referência são 10 cm/s, 10 cm/s e 0,1 rad/s nos eixos das abcissas, das ordenadas e das cotas respetivamente.

Na situação apresentada pela Figura 132 pretende-se evidenciar o desempenho do controlador PID digital aplicado à locomoção da plataforma móvel, em regime permanente, quando é dada ordem para esta se deslocar à velocidade máxima no eixo das ordenadas (referência com o valor de 62,5 cm/s). É possível constatar que, para a situação experimentada, existe um erro em regime permanente praticamente constante, o qual se deve às limitações físicas da plataforma móvel. A velocidade máxima alcançada foi de aproximadamente 54 cm/s.

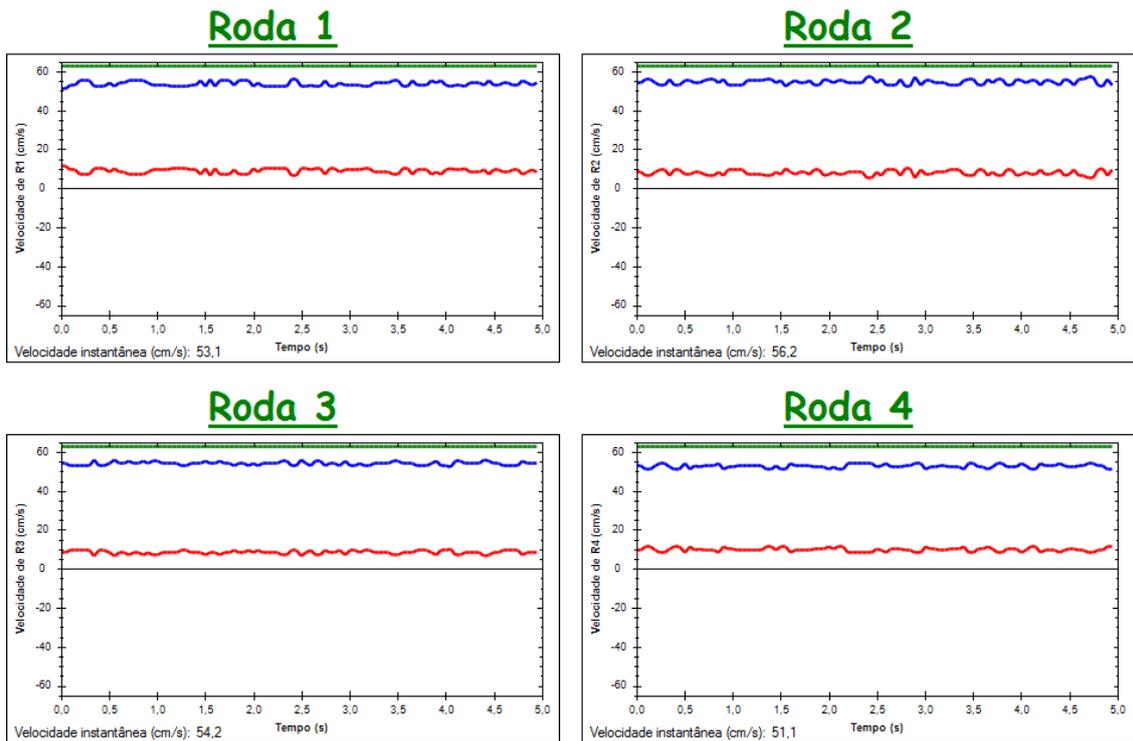


Figura 132 - Desempenho do controlador PID digital, em regime permanente, quando é ordenada a velocidade máxima no eixo das ordenadas (referência de 62,5 cm/s).

Na situação evidenciada pela Figura 133 pretende-se mostrar o desempenho da plataforma móvel em regime transitório. Primeiramente ordenou-se que a plataforma se mantivesse parada. Seguidamente ordenou-se uma velocidade constante de 40 cm/s no eixo das ordenadas e, por fim, ordenou-se novamente uma imobilização. Isto é, aplicou-se um pulso na referência de 40 cm/s durante cerca de 2 segundos. Para a situação experimentada, é possível constatar que o controlador PID digital procurou manter sempre a velocidade medida próxima da velocidade de referência que e os tempos de subida e descida da velocidade medida situam-se entre os 200 e os 300 ms.

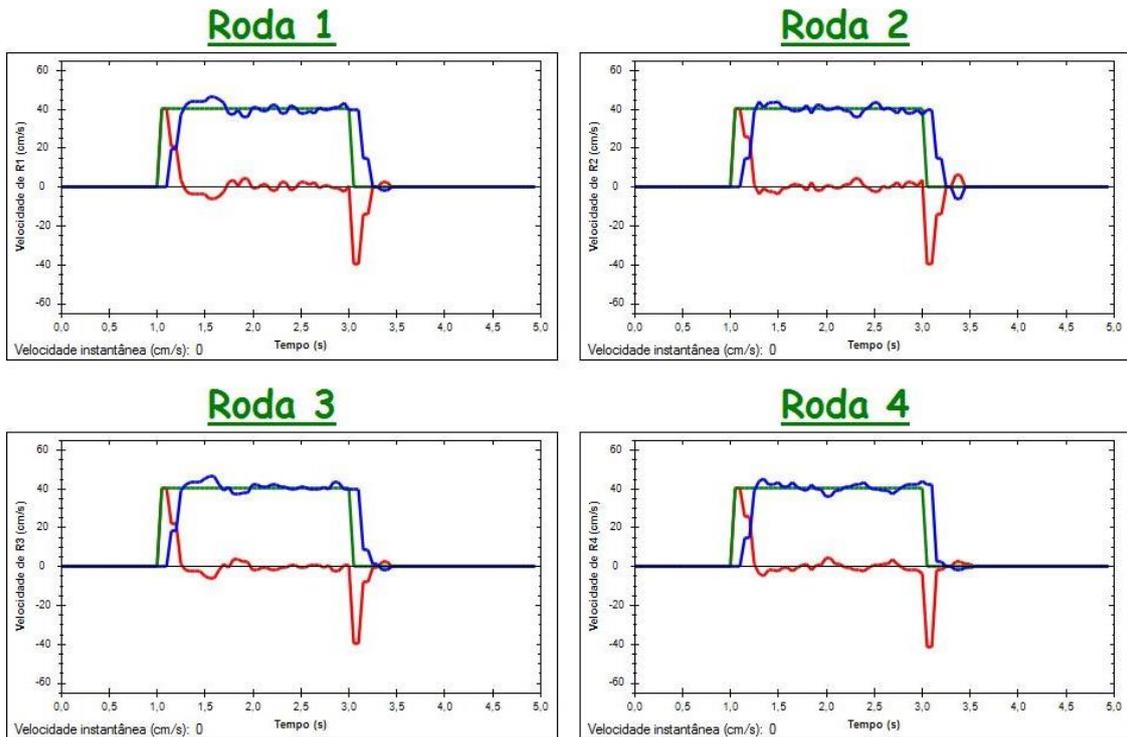


Figura 133 - Desempenho do controlador PID digital em regime transitório. Aplicou-se um pulso na referência correspondente a uma velocidade de 40 cm/s durante cerca de 2 segundos (eixo das ordenadas).

Na situação evidenciada pela Figura 134 também se pretende mostrar o desempenho do controlador PID digital em regime transitório. Primeiramente ordenou-se que a plataforma móvel se mantivesse parada. Seguidamente ordenou-se uma velocidade constante de 25 cm/s no eixo das ordenadas e, por fim, ordenou-se uma velocidade de 44 cm/s no mesmo eixo. Ou seja, foram aplicados 2 degraus na variável de referência. O primeiro caracteriza-se por uma alteração da velocidade de referência de 0 cm/s para 25 cm/s enquanto o segundo de 25 cm/s para 44 cm/s. Tal como na figura anterior, é possível constatar os mesmos valores para os tempos de subida e descida. Para além disto, é possível verificar que o controlador PID digital nunca entrou numa zona de instabilidade pois procurou sempre seguir a referência e minimizar o erro.

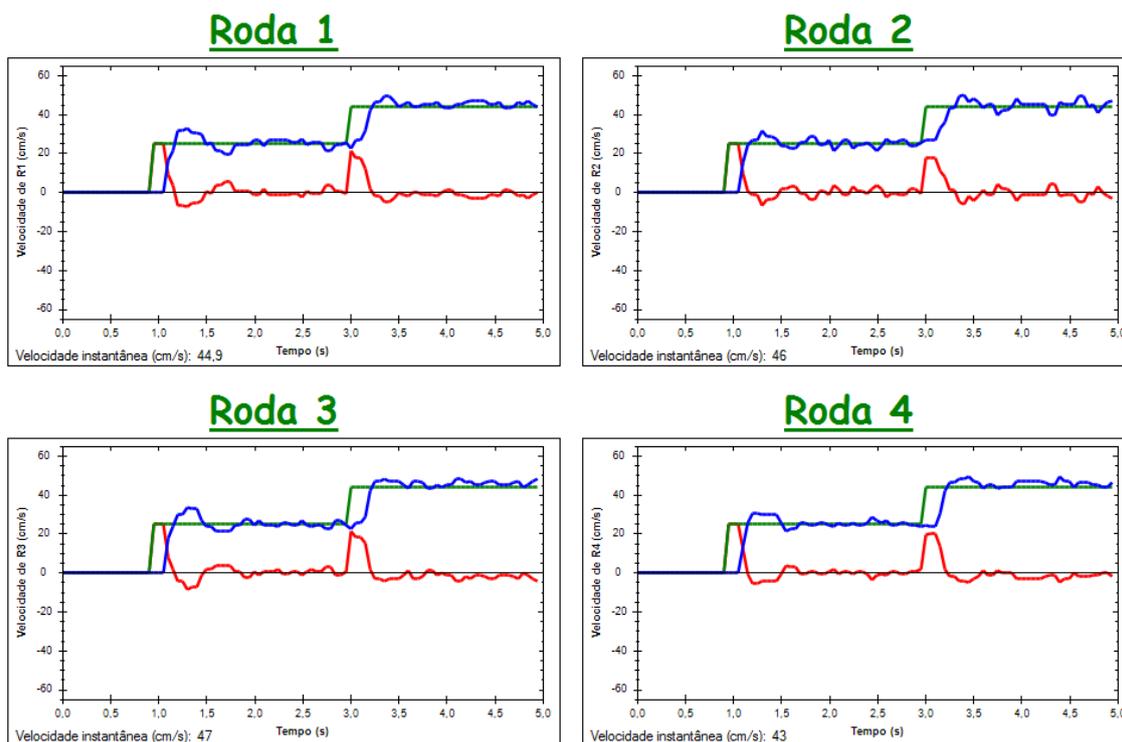


Figura 134 - Desempenho do controlador PID em regime transitório. Aplicou-se um degrau na referência de 0 cm/s para 25 cm/s seguido de outro de 25 cm/s para 44 cm/s, ambos no eixo das ordenadas.

Na Figura 135 apresentam-se os resultados correspondentes a um teste ao “Modo Seguidor”. A primeira etapa do teste consistiu na colocação um objeto a 40 cm da plataforma móvel na direção frontal. A segunda etapa consistiu na ativação do modo com os seguintes parâmetros: fazer seguimento na direção frontal e manter uma distância de 40 cm. Por fim, a terceira etapa consistiu em afastar o objeto 60 cm (para além dos 40 cm que já existiam), o mais rapidamente possível, por forma a analisar o desempenho combinado do controlador proporcional digital (implementado na aplicação gráfica) com o controlador PID digital (implementado no Atmel ATmega 1284P). Inicialmente a velocidade de referência foi nula devido ao facto de o objeto estar imóvel a 40 cm da plataforma móvel. Seguidamente ocorreu a saturação do controlador proporcional digital no valor de 30 cm/s devido ao rápido afastamento do objeto. Posteriormente ocorreu uma desaceleração devido ao facto de a plataforma móvel se estar a aproximar do obstáculo. Finalmente plataforma móvel imobilizou-se porque chegou novamente aos 40 cm em relação ao objeto. Estes resultados permitem verificar que o controlador proporcional digital é estável e funciona devidamente fornecendo os valores adequados à variável de referência do controlador PID digital.

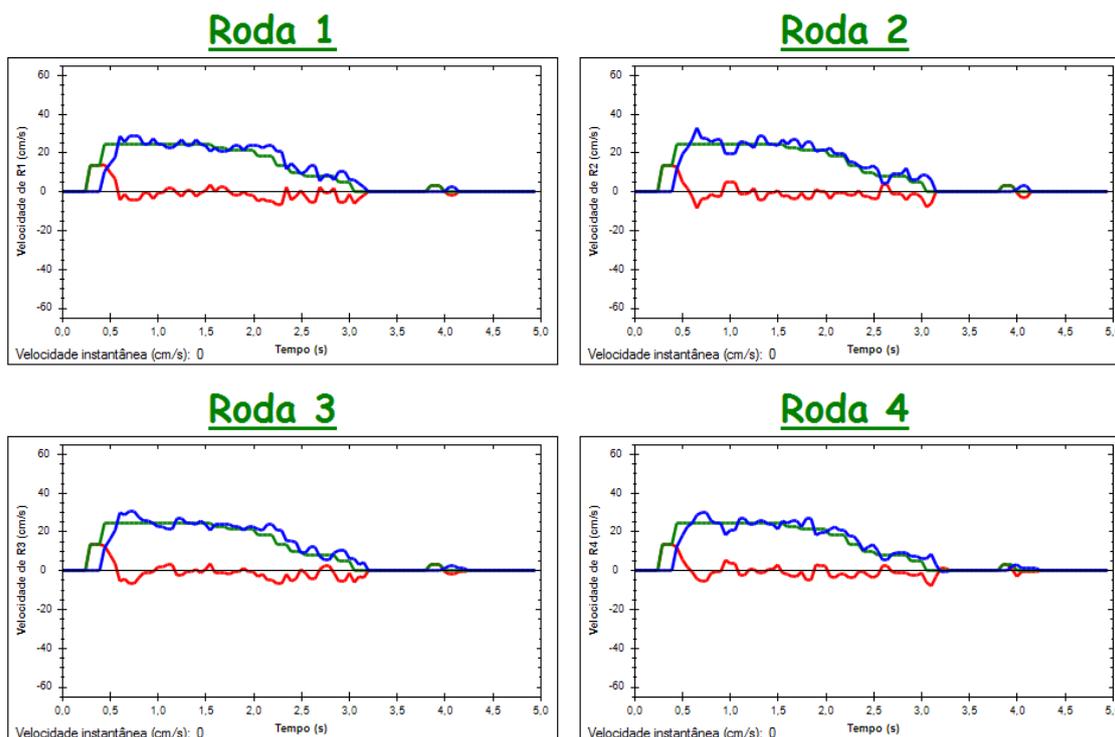


Figura 135 - Desempenho do controlador PID digital quando o “Modo Seguidor” se encontra ativo.

Quanto aos resultados do “Modo Movimento Lateral”, constatou-se que estes são praticamente idênticos aqueles que foram apresentados para o “Modo Seguidor”. Isto deve-se ao facto de ambos possuírem praticamente a mesma implementação, exceto a inclusão de duas componentes de velocidade (nos eixos das abcissas e das ordenadas) não nulas no “Modo Movimento Lateral”.

### 5.3. O sistema de telecomando

O sistema de telecomando consiste num dispositivo que foi desenvolvido com o intuito de possibilitar o comando remoto e intuitivo da plataforma móvel omnidirecional recorrendo a uma *IMU (Inertial Measurement Unit)*. Uma *IMU* é um dispositivo eletrónico capaz de medir as suas próprias velocidade angular, orientação espacial e aceleração a partir de, pelo menos, um acelerómetro e um giroscópio. As *IMUs* mais completas encontradas no mercado incluem um acelerómetro, um giroscópio, uma bússola e um barómetro, totalizando 10 graus de liberdade (3 para o acelerómetro, 3 para o giroscópio, 3 para a bússola e 1 para o barómetro). Um exemplo disto é a *Pololu AltIMU-10 v4* [90].

No âmbito do sistema de telecomando desenvolvido, utilizou-se a *Pololu MiniIMU-9 v2* [91], cujo aspeto é apresentado na Figura 136. Trata-se de uma *IMU* com 9 graus de liberdade pois é composta por um giroscópio L3GD20 [92] e por um circuito integrado LSM303DLHC [93], que contém um acelerómetro e uma bússola. As principais características que se destacam nos sensores referidos são o número de graus de liberdade, a resolução e a *interface* com o exterior:

- Giroscópio L3GD20: 3 graus de liberdade, *interface* I2C e resolução selecionável num dos seguintes valores:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$  ou  $\pm 2000$  °/s;
- Acelerómetro LSM303DLHC: 3 graus e liberdade, *interface* I2C e resolução selecionável num dos seguintes valores:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$  ou  $\pm 16$  g;
- Bússola LSM303DLHC: 3 graus de liberdade, *interface* I2C e resolução selecionável num dos seguintes valores:  $\pm 1,3$ ;  $\pm 1,9$ ;  $\pm 2,5$ ;  $\pm 4,0$ ;  $\pm 4,7$ ;  $\pm 5,6$  ou  $\pm 8,1$  gauss.

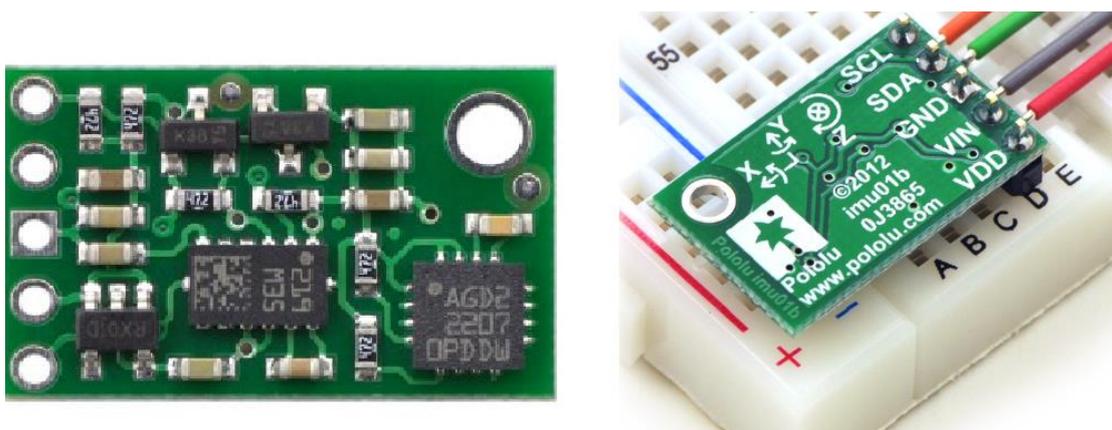


Figura 136 - Aspeto da *IMU Pololu MiniIMU-9 v2* [91].

No sistema de telecomando desenvolvido, houve a necessidade de se recorrer a um *AHRS* (*Attitude and Heading Reference System*). Um *AHRS* é um sistema que recolhe a informação proveniente de todos os sensores de uma *IMU* e a converte para um novo referencial que tem origem no centro de massa do dispositivo e possui 3 eixos de rotação denominados *roll*, *pitch* e *yaw* [94] [95]. Na Figura 137 representa-se o referencial de um *AHRS* aplicado a um objeto genérico com as suas 3 componentes (*roll*, *pitch* e *yaw*) devidamente assinaladas.

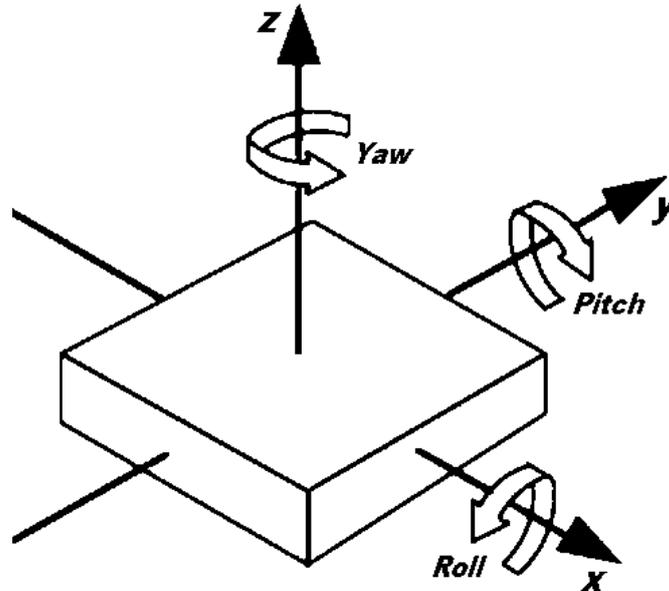


Figura 137 - Representação dos 3 eixos de rotação existentes num *AHRS*: *roll*, *pitch* e *yaw* (adaptado de [96]). Note-se que a origem do referencial coincide com o control de massa do objeto.

Os *AHRS* são amplamente utilizados em dispositivos que necessitam de obter informações relacionadas com a sua orientação. Os dispositivos *GPS* inerciais, os *quadcopters*, os telecomandos inerciais das consolas e os aviões (Figura 138) são alguns exemplos nos quais é possível encontrar um *AHRS*.

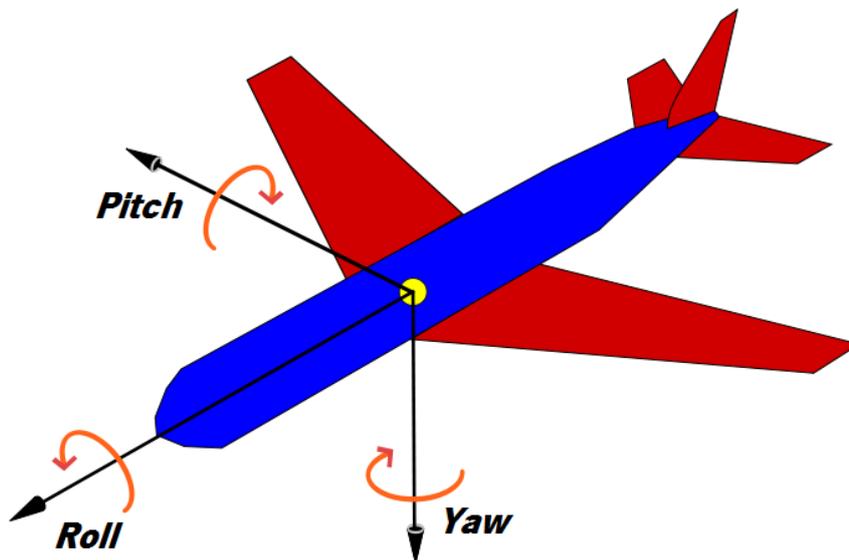


Figura 138 - Os aviões são um exemplo no qual um *AHRS* pode ser aplicado (adaptado de [96]).

O sistema de telecomando da plataforma móvel omnidirecional recorre a um *AHRS* para obter informações sobre a sua orientação espacial a partir dos valores medidos pelos 3 sensores da *IMU* utilizada (acelerómetro, giroscópio e bússola). A saída do *AHRS* do sistema de telecomando é um conjunto de 3 ângulos, correspondentes à rotação em torno de cada um dos 3 eixos

(abscissas, ordenadas e cotas) – *roll* em torno do eixo das abscissas, *pitch* em torno do eixo das ordenadas e *yaw* em torno do eixo das cotas. Tendo em conta que o modelo cinemático do sistema de direção da plataforma móvel possui 3 componentes de velocidade (velocidade linear segundo o eixo das abscissas, velocidade linear segundo o eixo das ordenadas e velocidade angular em torno do eixo das cotas), definiu-se que cada uma dessas componentes terá uma correspondência com cada um dos ângulos que constituem a saída do *AHRS*. No subcapítulo 5.3.2 apresenta-se a forma como essa correspondência foi idealizada e implementada. Seguidamente, faz-se a apresentação do *hardware* que implementa o sistema de telecomando.

### 5.3.1. Hardware desenvolvido

O *hardware* do sistema de telecomando é composto essencialmente por um pequeno suporte retangular de madeira prensada, uma pilha de 8,4 V recarregável (níquel-hidreto metálico) e uma placa de circuito impresso, a qual contém um circuito regulador de tensão, um microcontrolador Atmel ATmega 328P, um módulo *XBee Pro Series 2*, uma *IMU Pololu MinIMU-9 v2* e 2 botões. Na Figura 139 apresenta-se o aspeto do *hardware* do sistema de telecomando com os principais componentes devidamente assinalados.

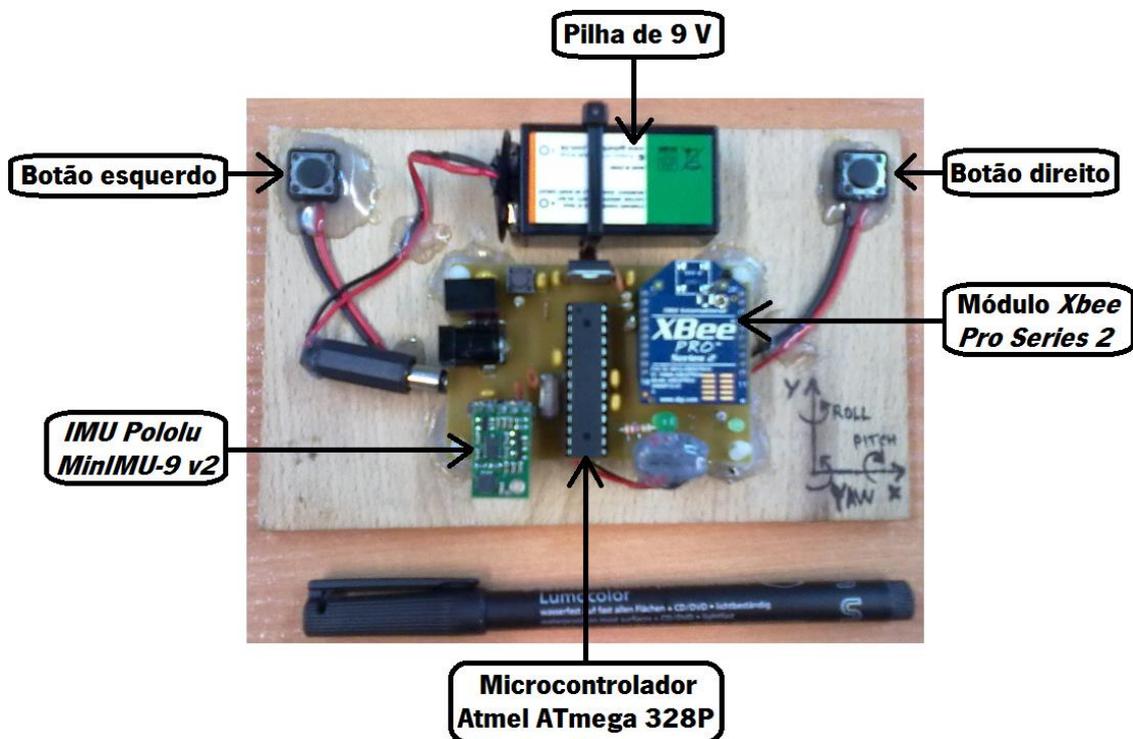


Figura 139 - *Hardware* do sistema de telecomando com os principais componentes devidamente assinalados.

O módulo *Xbee Pro Series 2* utilizado no sistema de telecomando é aquele que foi configurado como *router*. Devido a este facto, trata-se do módulo *wireless* que pode alternar entre a aplicação gráfica em computador e o sistema de telecomando. Se se pretender comandar a plataforma móvel através da aplicação gráfica basta ligá-lo ao computador através da *Xbee Explorer USB*. Se se pretender comandá-la através do sistema de telecomando basta ligá-lo à placa de circuito impresso conforme a Figura 139 evidencia.

O principal motivo pelo qual se optou pela *IMU Pololu MinIMU-9 v2* consiste no facto de esta já se encontrar disponível no laboratório onde o trabalho foi realizado. Quanto ao microcontrolador utilizado, optou-se pelo Atmel ATmega 328P devido à adequabilidade dele ao sistema e à experiência que o autor adquiriu com ele durante a implementação do sistema de alimentação energeticamente otimizado.

A placa de circuito impresso responsável pela implementação do *hardware* do sistema de telecomando foi desenvolvida com recurso ao *software* Cadsoft Eagle 6.4. O apêndice M contém o esquemático e o *layout* dela.

### 5.3.2. Software desenvolvido

A implementação do *software* do sistema de telecomando foi estruturada por camadas. As principais camadas dessa implementação são a obtenção dos valores mensurados pelos sensores, a conversão da informação contida nos 9 graus de liberdade nos valores de *roll*, *pitch* e *yaw* (*AHRS*), a correspondência dos valores de *roll*, *pitch* e *yaw* nas 3 componentes de velocidade do modelo cinemático da plataforma móvel e o protocolo de comunicação. Na Figura 140 evidencia-se a estrutura e a sequência de camadas nas quais o *software* se baseia.



Figura 140 - Estrutura e sequência das camadas nas quais o *software* do telecomando se baseia.

No apêndice N encontra-se o código-fonte (escrito em linguagem C++) desenvolvido no âmbito do *software* do sistema de telecomando.

A primeira camada do *software* caracteriza-se pela obtenção dos valores provenientes do acelerómetro, do giroscópio e da bússola. Por se tratar de uma *IMU* com 9 graus de liberdade, existem 3 valores a adquirir por cada sensor. A obtenção é feita com recurso a uma *interface* I2C que é comum a todos os sensores e ao microcontrolador Atmel ATmega 328P. Os fabricantes dos sensores da *IMU* disponibilizam bibliotecas (conjuntos de funções) que facilitam o acesso aos valores medidos. Essas bibliotecas foram desenvolvidas para a plataforma Arduino [97], com a qual o Atmel ATmega 328P é totalmente compatível. Devido a isto, o Atmel ATmega 328P foi programado com recurso ao ambiente de desenvolvimento Arduino 1.0.5-r2 [98] (de salientar que, para os restantes microcontroladores usados ao longo do trabalho, recorreu-se ao Atmel Studio 6.1). Os ficheiros “LSM303.h” e “L3G.h” são os que contêm a *interface* pública que permite a recolha dos valores mensurados.

A segunda camada do *software* é caracterizada pela conversão dos 9 valores adquiridos na primeira camada para os valores de *roll*, *pitch* e *yaw*. Significa isto que a segunda camada é a responsável pela implementação do *AHRS*. À semelhança dos sensores, também já existe uma biblioteca responsável pela implementação do *AHRS*. Essa biblioteca é da autoria da Pololu e foi desenvolvida especificamente para a *IMU MinIMU-9 v2*. O algoritmo que a Pololu implementou para o *AHRS* é o *DCM* (*Direction Cosine Matrix*) [94], o qual é executado com uma frequência de 50 Hz. Na Figura 141 apresenta-se o referencial utilizado pelo *AHRS* no sistema de telecomando.

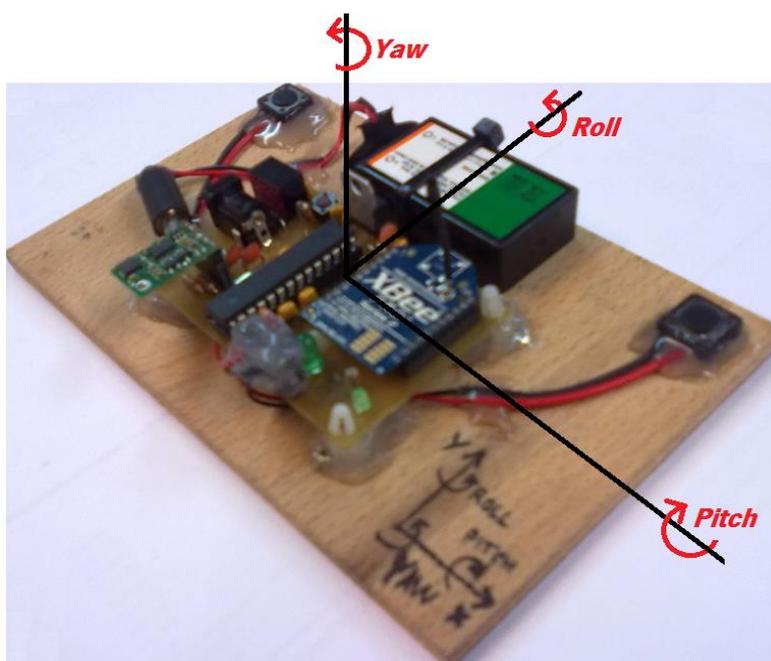


Figura 141 - Referencial usado pelo *AHRS* no sistema de telecomando (as setas indicam o sentido positivo de cada componente).

Tendo por base o referencial considerado na figura anterior e a implementação do algoritmo *DCM* pela Pololu, verifica-se que os valores de *roll* e de *pitch* estão compreendidos na gama  $[-90^\circ, 90^\circ[$  enquanto o valor de *yaw* está compreendido na gama  $[-180^\circ, 180^\circ[$ . *Roll* e *pitch* assumem um valor aproximadamente nulo quando o sistema de telecomando é colocado num plano perfeitamente horizontal. *Yaw* assume um valor aproximadamente nulo quando o sistema de telecomando tem uma orientação que corresponde ao sentido oposto ao Norte magnético.

A terceira camada do *software* consiste na conversão dos valores de *roll*, *pitch* e *yaw* nas 3 componentes de velocidade da plataforma móvel omnidirecional. O modelo matemático que foi desenvolvido por forma a fazer essa conversão é o seguinte:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,8 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ p \\ y - y_0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Em que:

- $v_x$  (cm/s) é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das abcissas;
- $v_y$  (cm/s) é a velocidade linear da plataforma móvel segundo o eixo das ordenadas;
- $w_z$  (crad/s) é a velocidade angular da plataforma móvel em torno do eixo das cotas;
- $r$  (graus) é o valor de *roll*;
- $p$  (graus) é o valor de *pitch*;
- $y$  (graus) é o valor de *yaw*;
- $y_0$  (graus) é o valor inicial de *yaw*, o qual é calculado sempre que o sistema é inicializado.

Tendo por base o referencial apresentado na Figura 141, se se fizer uma análise ao modelo (53) é possível concluir que, quando o utilizador agarra e inclina o sistema de telecomando, a plataforma móvel movimenta-se da seguinte forma:

- Inclinação para a frente: movimentação na direção positiva do eixo das ordenadas;
- Inclinação para trás: movimentação na direção negativa do eixo das ordenadas;
- Inclinação para a esquerda: movimentação na direção negativa do eixo das abcissas;
- Inclinação para a direita: movimentação na direção positiva do eixo das abcissas.

Para além disto, sempre que o sistema de telecomando é inicializado e o primeiro valor de *yaw* é calculado, esse valor é atribuído ao  $y_0$  do modelo (53). Se o botão direito (Figura 139)

estiver pressionado, aplica-se diretamente o modelo (53), o que significa que a plataforma móvel pode rodar sobre si própria. Ao largar esse botão, o último valor de  $yaw$  passa a ser o novo valor de  $y_0$ . Se o botão direito não estiver pressionado, atribui-se o valor de  $y_0$  a  $yaw$ , o que resulta sempre num valor nulo para a componente  $w_z$  da plataforma móvel (impedindo a rotação dela).

A quarta camada do *software* é a responsável pela comunicação entre o sistema de telecomando e a plataforma móvel. Do ponto de vista da plataforma móvel, comunicar com a aplicação gráfica em computador ou com o sistema de telecomando é exatamente o mesmo porque a estrutura das tramas é exatamente a mesma em ambos os lados. Esta camada, que é executada com uma frequência de 5 Hz, possui um conjunto de funções (em C++) similares às que foram implementadas na aplicação gráfica (em C#). Por exemplo, se a terceira camada do *software* atribuir 25 cm/s a  $v_x$ , -15 cm/s a  $v_y$  e 46 crad/s a  $\omega_z$ , então a trama que a quarta camada do *software* irá gerar é “\$DF+19.0-0F.0+2E.0/r”.

Para além da comunicação, a quarta camada é responsável por garantir que todas as tramas enviadas podem ser executadas pela plataforma móvel (se os valores das 3 componentes estiverem fora da gama admitida pela plataforma móvel a trama correspondente não é enviada). Por último, é também nesta camada que se encontra o código-fonte associado ao botão esquerdo do sistema de telecomando (Figura 139). Por questões de segurança, a plataforma móvel só se movimenta se esse botão estiver pressionado (caso contrário permanece sempre imobilizada).

### **5.3.3. Resultados experimentais**

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados correspondentes ao desempenho do *AHRS*, à interação entre o sistema de telecomando e a plataforma móvel, ao alcance e à autonomia do sistema de telecomando.

Em primeiro lugar, colocou-se o sistema de telecomando num plano perfeitamente horizontal e verificou-se os valores de *roll* e *pitch* calculados pelo *AHRS* (o qual é baseado no algoritmo *DCM* que é executado com uma frequência de 50 Hz). Devido à inexistência de uma referência que indicasse com precisão a orientação correspondente ao Norte magnético, rodou-se o sistema de telecomando até se obter um valor de *yaw* próximo de zero. Nestas condições, os resultados foram os que se apresentam na Figura 142.

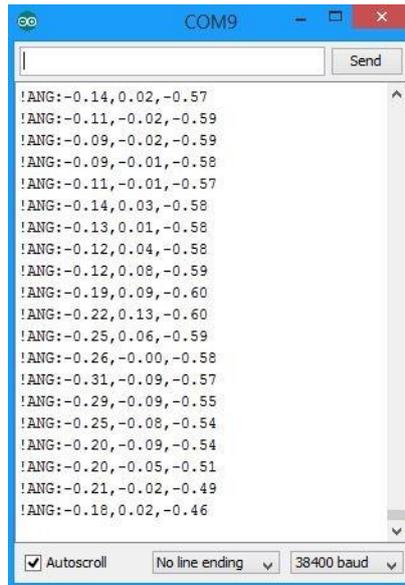


Figura 142 - Valores de *roll*, *pitch* e *yaw* numa situação em que o sistema de telecomando foi colocado num plano horizontal.

Nas condições referidas, verificou-se que os valores de *roll* e *pitch* estavam próximos do ideal (o ideal seria 0 graus por se tratar de um plano horizontal) apresentando sempre um erro inferior a 1 grau. Constatou-se também que os valores das 3 componentes do *AHRS* apresentavam sempre um pequeno ruído, mas eram estáveis.

Em segundo lugar, testaram-se duas inclinações no sistema de telecomando – uma para a direita e outra para a frente – por forma a avaliar o desempenho de *roll* e *pitch* respetivamente. Essas inclinações foram ambas de 15 graus e foram marcadas em relação a um plano horizontal através de um transferidor. Na Figura 143 apresentam-se os respetivos resultados.

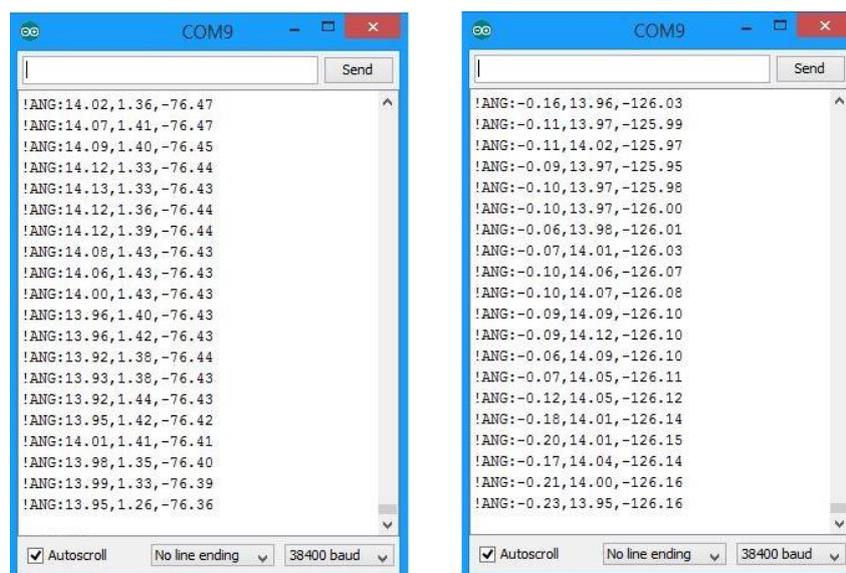


Figura 143 - Valores de *roll*, *pitch* e *yaw* para duas inclinações: uma para a direita (janela do lado esquerdo) e outra para a frente (janela do lado direito). Ambas foram de 15 graus e foram marcadas em relação a um plano horizontal.

Nas condições referidas, verificou-se que os valores de *roll* e *pitch* apresentavam sempre um pequeno ruído e um erro inferior a 2 graus. Na inclinação para a direita os valores ideais de *roll* e *pitch* eram 15 e 0 graus respetivamente enquanto na inclinação para a frente os valores ideais eram 0 e 15 graus respetivamente.

Os resultados apresentados até este ponto levaram à necessidade de se implementar uma zona morta de 2 graus nos valores de *roll* e *pitch*. Significa isto que, sempre que os valores de *roll* e *pitch* forem inferiores a 2 graus, consideram-se nulos. Desta forma garantiu-se que a plataforma móvel permanece imobilizada quando o sistema de telecomando se encontra num plano horizontal.

Em terceiro lugar, mediu-se o consumo de energia elétrica do sistema de telecomando quando este estava em funcionamento. Verificou-se que o valor médio da corrente absorvida situava-se em torno de 65 mA, o que corresponde a uma potência elétrica de aproximadamente 546 mW (a pilha é de 8,4 V). Na Figura 144 apresenta-se a respetiva medição.

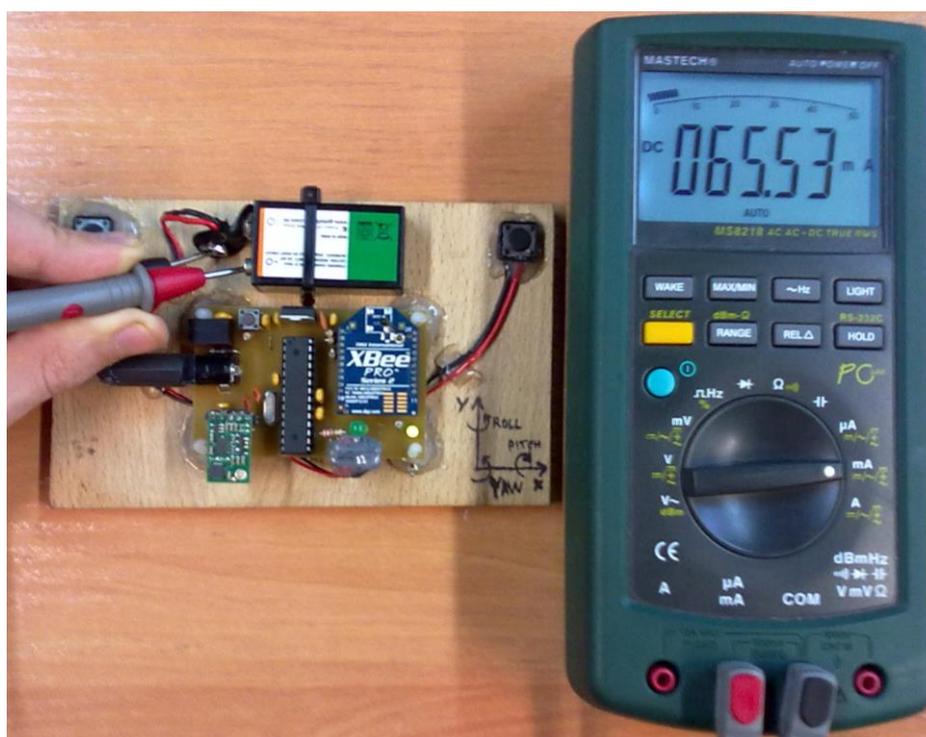


Figura 144 - Medição da corrente elétrica absorvida pelo sistema de telecomando quando este se encontrava em funcionamento.

Em quarto lugar, verificou-se que a autonomia do sistema de telecomando é de aproximadamente 1 hora e 13 minutos. A pilha utilizada apresenta como principais características uma tensão nominal de 8,4 V a capacidade de armazenamento de 200 mAh, pelo que seria

espectável uma autonomia de cerca de 3 horas. O valor da autonomia ficou longe do espectável devido, provavelmente, ao facto de a pilha já ter algum desgaste por ser recarregável (provavelmente já tinha completado muitos ciclos de carga e descarga anteriormente).

Em quinto lugar, constatou-se que comandar a plataforma móvel através do sistema de telecomando é, do ponto de vista do utilizador, um processo simples e extremamente intuitivo. Pediu-se a algumas pessoas que experimentassem comandar a plataforma móvel e notou-se que, apenas com uma breve explicação das funcionalidades associadas aos 2 botões, elas rapidamente se adaptaram ao sistema comandando convenientemente a plataforma móvel.

Finalmente, verificou-se que, se não existirem obstáculos entre o sistema de telecomando e a plataforma móvel, o alcance é superior a 100 m.



# 6. Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo final apresentam-se as conclusões obtidas a partir de todo o trabalho realizado e fazem-se sugestões de trabalho futuro.

O uso de sistemas de direção não-omnidirecionais em plataformas móveis constitui uma severa limitação em termos de liberdade de movimentos. Há situações em que existe uma dificuldade ou até uma impossibilidade de executar determinadas tarefas em locais congestionados, onde o espaço disponível é reduzido. A utilização de sistemas de direção omnidirecionais apresenta vantagens, nomeadamente a redução da distância percorrida para se efetuar uma tarefa (através da otimização do trajeto), a possível redução da quantidade de energia consumida e a diminuição do tempo necessário para a realização de uma tarefa.

O elevado tempo de carga das baterias geralmente encontradas em sistemas elétricos móveis também constitui uma importante limitação em plataformas móveis uma vez que, quando estas se encontram imobilizadas a carregar, normalmente não são produtivas. Por isso, é importante minimizar o tempo de carregamento. Uma forma de o conseguir consiste em recorrer a módulos de ultracondensadores como elementos de armazenamento de energia. No entanto, tentar resolver este problema recorrendo exclusivamente módulos de ultracondensadores não é, neste momento, economicamente viável. De facto, um módulo de ultracondensadores é muito mais dispendioso que uma bateria com a mesma capacidade de armazenamento energético. Desta forma, a solução passa por recorrer a um sistema híbrido, isto é, um sistema que integra uma bateria e um módulo de ultracondensadores. Nesta dissertação, a integração visa dotar uma plataforma móvel omnidirecional de uma autonomia de algumas dezenas de minutos, após um período de carregamento de alguns minutos, quando os seus elementos armazenadores de energia ficam descarregados e não há tempo suficiente para carregar convenientemente a bateria. A integração também visa assegurar uma autonomia de várias horas quando não existem restrições temporais para se efetuar o carregamento energético.

Desenvolveu-se um sistema de alimentação híbrido, energeticamente otimizado e totalmente incorporado na plataforma móvel omnidirecional, baseado numa bateria de ácido-chumbo e num módulo de ultracondensadores. A implementação do sistema foi precedida de simulações em PSIM que visaram avaliar a sua viabilidade e ajudar no dimensionamento adequado dos seus componentes eletrónicos.

Os resultados obtidos com o sistema de alimentação híbrido e energeticamente otimizado cumprem integralmente os objetivos propostos para o trabalho. Nos testes realizados constatou-se que a autonomia da plataforma móvel é de 23 minutos e 13 segundos quando o tempo de carregamento é de 3 minutos e 42 segundos. Por outro lado, quando não há restrições temporais para se efetuar o carregamento, a autonomia é de aproximadamente 9 horas e 40 minutos após um tempo de carregamento de aproximadamente 8 horas e 30 minutos. Constatou-se que o sistema de alimentação é capaz de extrair praticamente toda a energia armazenada no módulo de ultracondensadores, levando a tensão aos seus terminais até praticamente 0 V. O sistema faz, efetivamente, uma gestão otimizada da energia armazenada pois recorre sempre, em primeiro lugar, à energia disponível no módulo de ultracondensadores e só posteriormente à energia disponível na bateria. Assim, o sistema contribui para uma redução do desgaste da bateria.

Desenvolveu-se um sistema de controlo da locomoção cujo propósito é possibilitar o comando da plataforma móvel omnidirecional de forma remota, intuitiva e simples para o utilizador. Este desenvolvimento implicou um estudo minucioso do sistema de direção da plataforma móvel omnidirecional (o qual tem por base 4 rodas *Mecanum*) e, posteriormente, a implementação de diversos programas informáticos, nomeadamente para o controlador PID das rodas, para a aplicação gráfica no computador (em C#) e para o sistema de telecomando inercial.

Os resultados obtidos com sistema de controlo da locomoção também cumprem integralmente os objetivos propostos. A plataforma móvel omnidirecional foi programada com o *software* de controlo, baseado num controlador PID, e equipada com toda a estrutura necessária para acomodar o sistema de alimentação. A plataforma móvel foi ainda equipada com *encoders* (indispensáveis para a estabilidade e para o correto funcionamento do controlador PID) e sensores de distância, temperatura e humidade relativa. O controlador PID é o responsável por assegurar que a velocidade medida em cada uma das 4 rodas *Mecanum* segue de perto a respetiva velocidade de referência, a qual é calculada recorrendo às equações da Cinemática que regem o

sistema de direção da plataforma móvel omnidirecional. A aplicação gráfica para computador mostrou ser uma ferramenta extremamente útil para se fazer a monitorização e avaliação do comportamento da plataforma móvel omnidirecional. O sistema de telecomando inercial revelou-se uma alternativa perfeitamente viável de comando da plataforma móvel omnidirecional. Os movimentos da plataforma móvel são gerados através da inclinação do telecomando em cada um dos seus eixos. Através dos resultados obtidos é possível concluir que o modelo matemático desenvolvido para converter os eixos *roll*, *pitch* e *yaw* nas 3 componentes do sistema de direção é adequado à plataforma móvel omnidirecional.

Os objetivos referentes à deteção de situações anómalas também foram integralmente cumpridos. O *software* desenvolvido assegura a imobilização da plataforma móvel quando uma situação anómala é detetada.

O carácter inovador do princípio subjacente ao sistema de alimentação da plataforma móvel foi validado pela publicação de um artigo com a categoria de *Full Paper* (categoria de maior valor) na *ICINCO 2014 – 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* [65]. É de salientar que as publicações nesta conferência internacional são equiparadas pela Universidade do Minho a publicações em revistas científicas de tipo A.

Neste momento já se encontram em preparação mais dois artigos científicos sobre os conteúdos apresentados nesta dissertação.

O trabalho desenvolvido é extenso e complexo pois abrange vastas áreas do conhecimento, tais como a Eletrónica de Potência, o Controlo e a Informática. Há vários aspetos que poderão ser melhorados no futuro. Sugere-se o seguinte:

- O desenvolvimento de uma única placa de circuito impresso que substitua as 3 desenvolvidas para a plataforma móvel. Dessa forma, reduzir-se-ia o espaço ocupado e a suscetibilidade do sistema a falhas;
- A substituição da bateria de ácido-chumbo presente na plataforma móvel por uma bateria de ião-lítio de polímero (mais conhecida por lítio-polímero). Esta substituição apresenta como vantagens uma maior autonomia e uma redução do peso do sistema;
- A adição de sensores à plataforma móvel por forma a possibilitar o mapeamento do espaço envolvente e a deteção de gases perigosos como, por exemplo, o monóxido de carbono;

### **Conclusões e trabalho futuro**

---

- A adaptação da aplicação gráfica desenvolvida em C# a outros sistemas operativos tais como o Linux;
- O desenvolvimento de uma aplicação para dispositivos móveis que possibilite o mesmo tipo de comando que é feito pelo sistema de telecomando desenvolvido.

# Referências

- [1] R.P.A. van Haendel, "Design of an omnidirectional universal mobile platform", DCT 2005.117, DCT traineeship report, Eindhoven, September 2005.
- [2] Daniel W. Hart, "Power Electronics", ISBN 978-0-07-338067-4, MHID 0-07-338067-9, Valparaiso University, Valparaiso, Indiana, 2011.
- [3] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications and Design", Second Edition, ISBN 0-471-58408-8, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, EUA, 1995.
- [4] Jorge Villagra, David Herrero-Pérez, "A Comparison of Control Techniques for Robust Docking Maneuvers of an AGV", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, No. 4, July 2012.
- [5] Florentina Adăscăliței, Ioan Doroftei, "Practical Applications for Mobile Robots based on Mecanum Wheels - a Systematic Survey", Gh. Asachi Technical University of Iasi, Mechanical Engineering Faculty, Theory of Mechanisms and Robotics Department, B-dul D. Mangeron, 61-63, 700050, Iasi, Romania, MECAHITECH'11, Vol. 3, 2011.
- [6] Christina Tsalicoglou, Xavier Perrin, "Survey on Navigation Assistants for People with Disabilities", Autonomous Systems Laboratory, ETHZ, Zurich, Switzerland, 2010.
- [7] Desmond King-Hele, "Erasmus Darwin's Improved Design for Steering Carriages – and Cars", The Royal Society, London, 2002.
- [8] Marcy Lowe, Saori Tokuoka, Tali Trigg, Gary Gereffi, "Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain", Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University, Durham, North Carolina, October 5, 2010.
- [9] B. G. Kim, F. P. Tredeau, Z. M. Salameh, "Fast Chargeability Lithium Polymer Batteries", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Massachusetts Lowell, Lowell, MA 01854, 2008.

## Referências

---

- [10] Onib Nasir, Musman Yousuf, "Introducing: The Mecanum Wheel", IEEE PNEC PERSPECTIVE, Vol. 4, Autumn 2012.
- [11] John R. Miller, Patrice Simon, "Fundamentals of Electrochemical Capacitor Design and Operation", The Electrochemical Society, Spring 2008.
- [12] Ryan Thomas, "Omni-Directional Mobile Platform for The Transportation of Heavy Objects", Massey University, Palmerston North, New Zealand, 2011.
- [13] Mohamed Hedi Chabchoub, Hafedh Trabelsi, "Consolidation of the Electric Vehicle Battery by an Ultracapacitor for Performance Improvement", Computer Embedded System (CES), National School of Engineers of Sfax, 10th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Hammamet, Tunisia, March 18-21, 2013.
- [14] Melvin M. Morrison, "Inertial Measurement Unit", US Patent 4711125 A, December 8, 1987.
- [15] Anders Hejlsberg, Mads Torgersen, Scott Wiltamuth, Peter Golde, "The C# Programming Language", Fourth Edition, ISBN 978-0-321-74176-9, Microsoft Corporation, Redmond, King County, Washington, USA, 2010.
- [16] Digi International, "XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules", 11001 Bren Road East, Minnetonka, MN 55343, November 2010.
- [17] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, Davide Scaramuzza, "Introduction to Autonomous Mobile Robots", Second Edition, ISBN 978-0-262-01535-6, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2011.
- [18] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/wheels-casters-standard-materials-handling-8534-2473159.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/wheels-casters-standard-materials-handling-8534-2473159.jpg) (Acedido em Setembro de 2014).
- [19] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.portalmotorcar.com.br/wp-content/uploads/2011/11/Roda-Traseira.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).
- [20] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://3.imimg.com/data3/QV/IF/MY-1484654/wheel-castor-250x250.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).

## Referências

---

- [21] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
[http://i00.i.aliimg.com/img/pb/953/078/309/309078953\\_325.jpg](http://i00.i.aliimg.com/img/pb/953/078/309/309078953_325.jpg) (Acedido em Setembro de 2014).
- [22] Joseph Grabowiecki, "Vehicle Wheel", US Patent 1305535 A, June 3, 1919.
- [23] Gareth Cawood, "Summary of Omni-Direction Drive Choices", Mechatronics Dep., Nélson Mandela Metropolitan University, November 12, 2012.
- [24] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://robomatter.com/images/ifi/omniwheel.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).
- [25] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://robomatter.com/images/ifi/largeomniwheel.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).
- [26] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Omni\\_wheel?oldid=545433567](http://en.wikipedia.org/wiki/Omni_wheel?oldid=545433567) (Acedido em Setembro de 2014).
- [27] Mohammad Afif Bin Ayob, Mohamad Fauzi Zakaria, "3WD Omni-Wheeled Mobile Robot using ARM Processor for Line Following Application", Dept. of Mechatronics and Robotics Eng., Fac. of Electrical and Electronics Eng., Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM), 86400 Batu Pahat, Johor, Malaysia, ISIEA2011, September 25-28, 2011.
- [28] Bengt Ilon, "Wheels for a course stable self propelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base", US Patent 3876255 A, April 8, 1975.
- [29] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://electronhobbies.com/157-392-thickbox/mecanum-wheels-4-pack.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).
- [30] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://dynamicsystems.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1393369>  
(Acedido em Setembro de 2014).
- [31] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/picture/view/OJ1166> (Acedido em Setembro de 2014).

## Referências

---

- [32] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.pololu.com/product/1505/> (Acedido em Setembro de 2014).
- [33] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Mouse\\_\(computing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Mouse_(computing)) (Acedido em Setembro de 2014).
- [34] Tom Lauwers, George Kantor, Ralph Hollis, "One is Enough!", The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 12th Int'l Symp. on Robotics Research, San Francisco, October 12-15, 2005.
- [35] Kristof Goris, "Autonomous Mobile Robot Mechanical Design", Free University of Brussels, 2005.
- [36] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.eloutletdelabiciqueta.cl/wp-content/gallery/bicicletas/4173.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).
- [37] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.cs.cmu.edu/~parag/research/cye/chromecyesr.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).
- [38] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/Piaggio\\_Ape\\_Kasten.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/Piaggio_Ape_Kasten.jpg) (Acedido em Setembro de 2014).
- [39] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.theoldrobots.com/images27/Denning6.JPG> (Acedido em Setembro de 2014).
- [40] A. Salam Al-Ammri, Iman Ahmed, "Control of Omni-Directional Mobile Robot Motion", Department of Mechatronics Engineering, Al-Khwarizmi College of Engineering, University of Baghdad, Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol. 6, No. 4, 11 November 2010.
- [41] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Khepera\\_mobile\\_robot.jpeg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Khepera_mobile_robot.jpeg) (Acedido em Setembro de 2014).
- [42] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://viablogs.net/wp-content/uploads/2010/12/veiculo.jpg> (Acedido em Setembro de 2014).

## Referências

---

- [43] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.standfilipeempilhadores.com/extras/empilhador-1.png> (Acedido em Setembro de 2014).
- [44] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://www.tektite.ca/content\\_admin/uploads/P3160010.JPG](http://www.tektite.ca/content_admin/uploads/P3160010.JPG) (Acedido em Setembro de 2014).
- [45] Hélder P. Oliveira, Armando J. Sousa, A. Paulo Moreira, Paulo J. Costa, "Modeling and Assessing of Omni-directional Robots with three and four wheels" FEUP, INESC-Porto, 2010.
- [46] Christof Rohrig, Daniel Heb, Christopher Kirsch, Frank Kunemund, "Localization of an Omnidirectional Transport Robot Using IEEE 802.15.4a Ranging and Laser Range Finder", The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, October 18-22, 2010.
- [47] Jungmin Kim, Jungje Park, Sungshin Kim, "Inertial Navigation System for Omni-directional AGV with Mecanum Wheel", School of Electrical Engineering, Pusan National University, Geumjeong, Busan 609-735, Korea, Advances in Mechanical Engineering, ISSN: 2160-0619, Vol. 2, No. 1, March 2012.
- [48] Fairchild Semiconductor, "LM78XX/LM78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator", Datasheet, Ver. 1.3.0, 2006.
- [49] Texas Instruments, "LM117/LM317/LM317-N Three-Terminal Adjustable Regulator", Datasheet, SNVS774N – May 2004.
- [50] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Switches\\_domain.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Switches_domain.svg) (Acedido em Setembro de 2014).
- [51] Marian K. Kazmierczuk, "Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters", ISBN 978-0-470-77301-7, Wright State University, Dayton, Ohio, USA, 2008.
- [52] Charles E. Mullett, "An Efficient Nonisolated DC-DC Converter and a Review of the More Common Topologies", ON Semiconductor, Phoenix, Arizona, U.S.A..

## Referências

---

- [53] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/2110> (Acedido em Setembro de 2014).
- [54] Donald Schelle, Jorge Castorena, "Buck-Converter Design Demystified", Power Electronics Technology, Maxim Integrated Products, Sunnyvale, California, June 2006.
- [55] Brigitte Hauke, "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage", Texas Instruments, Application Report, SLVA372C - November 2009 - Revised January 2014.
- [56] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/2564> (Acedido em Setembro de 2014).
- [57] Michael Green, "Design Calculations for Buck-Boost Converters", Texas Instruments, Application Report, SLVA535A - August 2012 - Revised September 2012.
- [58] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/2119> (Acedido em Setembro de 2014).
- [59] Dongbing Zhang, "AN-1484 Designing A SEPIC Converter", Texas Instruments, Application Report, SNVA168E - May 2006 - Revised April 2013.
- [60] Jeff Falin, "Designing DC/DC converters based on SEPIC topology", Texas Instruments, Analog Applications Journal, 4Q 2008.
- [61] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/2096> (Acedido em Setembro de 2014).
- [62] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/758> (Acedido em Setembro de 2014).
- [63] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
[http://www.dalmotors.com/Images/CFW-09\\_G.jpg](http://www.dalmotors.com/Images/CFW-09_G.jpg) (Acedido em Setembro de 2014).
- [64] Vincent Sieben, "A High Power H-Bridge", Revision 1.0 - September 2003.
- [65] Carlos Arantes, João Sepúlveda, João Sena Esteves, Hugo Costa, Filomena Soares, "Using Ultracapacitors as Energy-Storing Devices on a Mobile Robot Platform Power System for Ultra-Fast Charging", 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, September 2014.

## Referências

---

- [66] Ixus Ultracapacitors, "Series iMOD: 16V, 58F", Datasheet, 2012.
- [67] Fairchild Semiconductor, "MRB1635 - MBR1660", Datasheet, Rev. C, 2001.
- [68] STMicroelectronics, "STP80PF55", Datasheet, Doc ID 8177 Rev 6, August 2010.
- [69] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/2453> (Acedido em Setembro de 2014).
- [70] STMicroelectronics, "STP60NF06", Datasheet, Rev 6, March 2007.
- [71] Fairchild Semiconductor, "1N5817 - 1N5819 Schottky Barrier Rectifier", Datasheet, Rev. C2, November 2010.
- [72] STMicroelectronics, "L298N", Datasheet, January 2000.
- [73] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/1187> (Acedido em Setembro de 2014).
- [74] TracoPower, "TSR-1 Series, 1A", Datasheet, Rev. 05/12, 2012.
- [75] STMicroelectronics, "LD1117 Series", Datasheet, Rev. 19, December 2005.
- [76] Website oficial do software: <http://www.cadsoftusa.com/> (Acedido em Setembro de 2014).
- [77] Website oficial do software: [http://www.atmel.com/microsite/atmel\\_studio6/](http://www.atmel.com/microsite/atmel_studio6/) (Acedido em Setembro de 2014).
- [78] Atmel Corporation, "ATmega 328P", Datasheet, Rev. 8271D-AVR-05/11, 2011.
- [79] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.pololu.com/product/1300> (Acedido em Setembro de 2014).
- [80] Atmel Corporation, "ATmega 1284P", Datasheet, Rev. 8272D-AVR-05/12, 2012.
- [81] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet:  
<http://www.robotshop.com/en/4wd-arduino-compatible-mecanum-robot-kit.html> (Acedido em Setembro de 2014).
- [82] Nexus robot, "4WD 100mm Mecanum wheel robot kit 10011", disponível a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.nexusrobot.com/> (Acedido em Maio de 2014).
- [83] Sharp Corporation, "GP2Y0A21YK0F", Datasheet, December 2006.
- [84] Analog Devices, "TMP35/TMP36/TMP37", Datasheet, Rev. G, November 2013.

## Referências

---

- [85] Honeywell, "HIH-4030/31 Series Humidity Sensors", Datasheet, March 2008.
- [86] Robert Faludi, "Building Wireless Sensor Networks", ISBN 978-0-596-80773-3, First Edition, December 2010.
- [87] Website oficial do software: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/xctu> (Acedido em Setembro de 2014).
- [88] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <https://www.sparkfun.com/products/8687> (Acedido em Setembro de 2014).
- [89] Website oficial do software: <http://www.visualstudio.com/> (Acedido em Setembro de 2014).
- [90] Informação obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.pololu.com/product/2470> (Acedido em Setembro de 2014).
- [91] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: <http://www.pololu.com/product/1268> (Acedido em Setembro de 2014).
- [92] STMicroelectronics, "L3GD20", Datasheet, DocID022116 Rev 2, February 2013.
- [93] STMicroelectronics, "LSM303DLHC", Datasheet, Doc ID 018771 Rev 1, April 2011.
- [94] Erick Macias, Daniel Torres, Sourabh Ravindran, "Nine-Axis Sensor Fusion Using the Direction Cosine Matrix Algorithm on the MSP430F5xx Family", Texas Instruments, Application Report, SLAA518A - February 2012.
- [95] Informação obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Attitude\\_and\\_heading\\_reference\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Attitude_and_heading_reference_system) (Acedido em Setembro de 2014).
- [96] Figura original obtida a partir do seguinte endereço da internet: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c1/Yaw\\_Axis\\_Corrected.svg/709px-Yaw\\_Axis\\_Corrected.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c1/Yaw_Axis_Corrected.svg/709px-Yaw_Axis_Corrected.svg.png) (Acedido em Setembro de 2014).
- [97] Michael Margolis, "Arduino Cookbook", Second Edition, ISBN 978-1-449-31387-6, 2012.
- [98] Website oficial do software: <http://arduino.cc/en/Main/Software> (Acedido em Setembro de 2014).

# Apêndices

Os apêndices referentes a esta Dissertação não se encontram disponíveis nesta versão digital.  
Para ter acesso aos apêndices entre em contacto com o autor da Dissertação.