



Daniel  
Afonso

Concepção de robô modular para reconhecimento  
e exploração



**Daniel  
Afonso**

**Concepção de robô modular para reconhecimento  
e exploração**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**o júri / the jury**

presidente / president

**Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo**

Professor Associado da Universidade de Aveiro (por delegação da Reitora da Universidade de Aveiro)

vogais / examiners committee

**Professor Doutor António Manuel Ferreira Mendes Lopes**

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Professor Doutor Vitor Manuel Ferreira dos Santos**

Professor associado da Universidade de Aveiro (orientador)

## agradecimentos / acknowledgements

A realização deste trabalho não seria possível apenas com o esforço individual. Para a realização do mesmo contei com a ajuda e apoio de diversas pessoas. Assim gostaria de deixar os meus agradecimentos:

Ao Professor Doutor Vitor Santos pela orientação e disponibilidade dada ao longo do projecto.

A todos os colegas que comigo partilharam o Laboratório de Automação e Robótica, nomeadamente o Eduardo Durana, Eduardo Santos, Hugo Tavares, Mauro Simões, entre outros. Agradeço o companheirismo e a ajuda demonstrada desde o primeiro momento.

Ao Eng. António Festas pelo apoio no fabrico de diversas componentes e ajuda na escolha de materiais e desenho de geometrias.

Ao Professor Carlos Relvas, Eng. João Albuquerque, Ricardo Beja e Eng. Vitor Miranda pela ajuda no processo de concepção e fabrico das jantes.

Ao Alfredo Correia pela ajuda prestada no fabrico de peça fora do departamento, permitindo assim conseguir todas as geometrias pretendidas.

Aos meus colegas e amigos Miguel Mieirol, Rodrigo Coelho, entre outros, pelo companheirismo geral e ideias dadas no decorrer do projecto.

À Adriana Filipe, Leonardo Azevedo, Arnaldina Sampaio, Vince Hamilton, Bruno Lopes, grupo dos Amigos da Pagaia e outros já referidos por permitiram momentos de lazer que contribuiriam para o meu bem estar, permitindo a sanidade necessária para levar o projecto a bom porto.

Aos meus Pais e à minha irmã por me terem dado a possibilidade de concretizar os meus objectivos com todo o seu apoio.

Por último lugar, não menos importante, à minha namorada Carla Santos por ter aguentado o meu mau humor, dando-me sempre apoio. Ainda por ter sempre acreditado que era possível finalizar o trabalho no tempo pretendido.

**Palavras-chave**

Robótica, busca e salvamento urbano, serpentiforme (multi-unidade), modularidade, expansibilidade, adaptabilidade, segurança passiva

**Resumo**

A utilização da robótica em operações de busca e salvamento tem vindo a revelar-se uma opção com interesse crescente em vários grupos. Apesar de haver trabalho relevante desenvolvido nesta área, um pouco por todo o mundo, inclusivamente em Portugal, existem ainda inúmeros problemas em aberto bem como soluções que podem ser melhoradas.

O objectivo deste trabalho é o de conceber e implementar um robô de forma serpentiforme, com controlo tele-autónomo, capaz de se locomover em ambientes de busca e salvamento urbano. Utiliza-se uma geometria multi-unidade de base modular, permitindo a expansibilidade do protótipo e adaptabilidade a novas situações. O sistema consiste em unidades locomovidas por lagartas e interligadas por juntas com 3 graus de liberdade. Através da actuação das juntas, é possível navegar e ultrapassar obstáculos de dimensões superiores às de uma das unidades do sistema. O trabalho desenvolvido introduz algumas ideias novas ou adaptadas de soluções existentes. São exemplos disso a rotação independente em torno do eixo longitudinal das diferentes unidades ou a segurança passiva por deformação elástica das rodas. O protótipo foi integralmente projectado de raiz, e a sua implementação permite avaliar o desempenho em situações similares às solicitadas nas operações de busca e salvamento.

Com a realização de testes e ensaios, pode concluir-se que os conceitos desenvolvidos e aplicados no protótipo são viáveis para outros projectos de robôs de busca e salvamento. Com este sistema, e com a expansibilidade que se procurou ter na sua concepção, fica assim aberto o caminho para futuros projectos na área da busca e salvamento.

**Key-words**

Robotics, urban search and rescue, serpentine (multi-unit), modularity, expansibility, adaptability, passive security

**Abstract**

The use of robots in search and rescue operations is a growing option in different fields. Although there is relevant work developed in this area all over the world, including in Portugal, there still subsist some unsolved issues and improvements to be made.

The goal of this work is to design a serpentine robot, controlled with a tele-autonomous philosophy, capable of moving in the rough terrain typical of urban search and rescue. The modular multi-unit geometry allows the expansion of the prototype and its adaptability to new situations. The system is based on units moved by caterpillars, connected by 3 degree of freedom joints. Through the actuation of the joints, it's possible to navigate and overcome obstacles bigger than one of the system's units. The work also applies some new ideas and explore new views of existing solutions. For example, the independent rotation for the units around the longitudinal axis and the passive safety from deformable elastic wheels. The prototype was completely developed from scratch. Its implementation allows to evaluate the performance of the concepts in near-real situations similar to those happening in urban search and rescue environments.

After the tests and simulations, it was concluded that the developed concepts are reliable to use on other urban search and rescue robots. With this prototype, and the possibility of designing an expansible system, a new research line on the field of search and rescue robotics is opened.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objectivos . . . . .	1
1.2	Enquadramento . . . . .	2
1.3	Busca e Salvamento por Robôs . . . . .	3
1.3.1	Classes Dimensionais . . . . .	4
1.3.2	Características Necessárias . . . . .	8
1.3.3	Diferentes Abordagens . . . . .	10
1.3.4	Modo de Operação . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Proposta de Solução</b>	<b>17</b>
2.1	Modularidade e Multifuncionalidade . . . . .	20
2.2	Projecto Mecânico . . . . .	21
2.2.1	Módulo Base . . . . .	23
2.2.2	Rodas . . . . .	25
2.2.3	Acoplamento . . . . .	26
2.2.4	Módulos de Funções . . . . .	28
2.3	Projecto Electrónico . . . . .	29
2.3.1	Baterias . . . . .	30
2.3.2	Comunicações . . . . .	30
2.3.3	Diagramas de Funcionamento . . . . .	31
2.3.4	Circuitos Impressos Dedicados . . . . .	33
2.4	Software . . . . .	34
2.4.1	Protocolo de Comunicações . . . . .	34
2.4.2	Controlo do Robô . . . . .	35
2.4.3	Autonomia de Navegação . . . . .	35
2.5	Fabrico, Construção e Montagem . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Testes e Ensaios</b>	<b>39</b>
3.1	Testes de Conceito . . . . .	39
3.1.1	Aspectos Construtivos . . . . .	39
3.1.2	Aspectos Funcionais . . . . .	41
3.1.3	Electrónica . . . . .	45
3.2	Ambiente de Testes . . . . .	46
3.3	Resultados dos Testes . . . . .	47

<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>51</b>
4.1	Conclusões . . . . .	51
4.2	Trabalhos Futuros . . . . .	54
<b>A</b>	<b>Resultados da Simulação Numérica</b>	<b>55</b>
<b>B</b>	<b>Circuitos Electrónicos</b>	<b>59</b>
<b>C</b>	<b>Fabrico de Componentes</b>	<b>63</b>
<b>D</b>	<b>Montagem</b>	<b>67</b>
<b>E</b>	<b>Situações Testadas</b>	<b>71</b>

# Lista de Figuras

1.1	Relação entre a probabilidade de sobrevivência de uma vítima e a informação conhecida num desastre marítimo.[2]	2
1.2	Robôs da classe maxi: T-52 Enryu da Universidade de Kyoto (a), Remotec ANDROS Wolverine (V2) da US MSHA (b).	5
1.3	Robô de classe transportável: PackBot da iRobot	6
1.4	Robôs de classe portátil mini: Snoopy da Universidade de Carnegie Mellon (a), Raposa do Instituto Superior Técnico (b).	7
1.5	Robôs de classe portátil micro: Personal Exploration Rover da Universidade de Carnegie Mellon (a), Versatrax 100 da Inuktun (b).	8
1.6	Exemplo de tracção por lagartas: Chaos da Autonomous Solutions.	11
1.7	Exemplo de robô com locomoção por pernas: TerminatorBot da DARPA.	11
1.8	Exemplo de robô com geometria convencional: SPAWAR Urbot do CRASAR.	12
1.9	Exemplo de robô com geometria variável: NUGV da Automated Controlled Environments, Inc - Valencia, California (a), Diferentes configurações (b)(c).	13
1.10	Exemplo de robô baseado em cobras: HyDRAS-Ascent da Virginia Tech.	14
1.11	Exemplo de robôs multi-unidade com geometria serpentiforme: OmniTread da Universidade de Michigan (a), Robô baseado num centipede do Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial de Guseong-dong Yuseong-gu Daejeon, Korea (b).	14
2.1	Representação esquemática das rotações inter-unidades.	18
2.2	Representação esquemática do sistema de ligação dos módulos de uma unidade.	19
2.3	Representação esquemática dos planos de simetria de uma unidade.	20
2.4	Representação da geometria das estruturas dos diversos módulos: ligação da estrutura (a), fixação de componentes à estrutura(b).	21
2.5	Representação do encaixe dos módulos de função: <b>guias</b> de guiamento (a), conector de sinal(b).	22
2.6	Imagem foto-realística do módulo base.	24
2.7	Representação das rodas e sistema de tracção: Imagem fotorealística de uma jante com lagarta de tracção (a), Deslocamentos calculados pelo método dos elementos finitos mediante uma carga axial de 50N (b).	25
2.8	Acoplamento entre unidades: representação esquemática do acoplamento. (a), representação da elevação de unidades(b).	27
2.9	Diagrama de forças para a elevação de duas unidades.	27
2.10	Imagem foto-realística do módulo master.	28
2.11	Imagem foto-realística do módulo slave.	29
2.12	Módulo de comunicação XBee.	31

2.13	Diagrama de funcionamento das secções electrónicas do robô: secção de distribuição de energia e gestão de unidade (a), secção de comunicação e navegação (b).	32
2.14	Placas de circuito impresso: circuitos para módulo base (a), circuitos para módulo master(b).	33
2.15	Representação esquemática da medição dos ângulos do acoplamento através de sistema de emissão e recepção de luz infravermelha.	36
2.16	Representação esquemática da medição de distância para navegação.	36
3.1	Representação esquemática do acoplamento entre unidades.	41
3.2	Fotografia de uma unidade em locomoção.	42
3.3	Ângulos de locomoção: ângulo de ataque e de saída (a), ângulo de subida (b), ângulo lateral (c), ângulo ventral (d), capacidade de vau (e).	43
3.4	Fotografias dos testes de segurança passiva: carregamento da estrutura (a), deformação das rodas(b).	44
3.5	Imagem foto-realística da fixação exterior projectada para as rodas.	44
3.6	Fotografias dos teste de elevação de unidades: acoplamento entre unidades (a), elevação da estrutura de uma unidade(b).	45
3.7	Fotografias dos teste de circuitos electrónicos: circuito com sensores de inclinação, orientação e proximidade e controlo de um servomotor alimentado por uma bateria (a), circuito master com comunicações e iluminação(b).	46
3.8	Fotografia do sistema constituído por quatro unidades em locomoção sobre uma trajectória curvilínea.	48
3.9	Fotografias do sistema constituído por quatro unidades em locomoção: sobre terreno irregular (a), ultrapassagem de obstáculos de dimensões superiores a uma unidade(b).	48
3.10	Fotografias do sistema constituído por quatro unidades sobre escadas: subida de escadas (a), descida de escadas(b).	49
3.11	Fotografia do sistema constituído por quatro unidades em operação vertical, suspenso a descer uma parede.	49
A.1	Resultado dos deslocamentos do chassi sujeito a uma tracção de 300N segundo o eixo longitudinal.	55
A.2	Resultado dos deslocamentos do chassi sujeito a um carregamento de 600N segundo o eixo vertical.	56
A.3	Resultado dos coeficientes de segurança do acoplamento com uma tracção no cabo de 300N.	56
A.4	Resultado dos deslocamentos de um pré-desenho da roda sujeita a um carregamento axial de 50N.	57
A.5	Resultado dos deslocamentos de um pré-desenho da roda sujeita a um carregamento axial de 50N.	57
B.1	Circuito de comunicação e navegação.	59
B.2	Circuito de gestão de energia.	60
B.3	Circuito de gestão de unidades.	60
B.4	Circuito do sensor de proximidade Avago HSDL 9100 com utilização do chip Avago APDS 9700.	61

B.5	Placa de circuito impresso com circuitos de gestão de energia, gestão de unidade e 4 de proximidade. . . . .	61
B.6	Placa de circuito impresso com circuitos de comunicação e navegação dividido. . . . .	62
C.1	Simulação do percurso de maquinagem de uma parte da estrutura do módulo base: tempo previsto de maquinagem 35min. . . . .	63
C.2	Maquinagem de uma parte da estrutura do módulo base: Preparação do bloco para a maquinagem (a), Maquinagem: tempo de maquinagem 40min (b). . . . .	64
C.3	Tratamento térmico das estruturas maquinadas: tratamento térmico com aplicação de carga (a), comparação entre as peças antes e depois do tratamento térmico (b). . . . .	64
C.4	Maquinagem manual das peças do acoplamento: desenhos de fabrico (a), maquinagem em torno manual (b). . . . .	65
C.5	Fabrico das rodas: rodas deformáveis: molde com silicone após submetido ao vácuo, jantes de silicone, aro e montagem (a), rodas rígidas: rodas rígidas, anel de fixação de rolamento e montagem (b). . . . .	65
C.6	Soldagem das componentes electrónicas: soldagem com pasta de solda e ar quente (a), soldagem com ferro de soldar (b). . . . .	66
D.1	Disposição das diversas componentes do acoplamento. . . . .	67
D.2	Módulo de base. . . . .	68
D.3	Módulo Master. . . . .	68
D.4	Módulo Slave e acoplamento. . . . .	69
D.5	Conjunto de quatro módulos base e quatro módulo de função. . . . .	69
D.6	Secção de comunicações ligada ao computador do operador. . . . .	70
E.1	Teste de deformação das rodas. . . . .	71
E.2	Teste de elevação de unidades: elevação da estrutura de uma unidade (a), carga de elevação (b). . . . .	72
E.3	Testes de locomoção: determinação do ângulo lateral máximo (a), controlo de locomoção (b). . . . .	72

# Lista de Tabelas

1.1	Robôs utilizados em operações de busca e salvamento de acordo com o seu tipo e classe dimensional . . . . .	3
1.2	Robôs testados após operações de busca e salvamento de acordo com o seu tipo e classe dimensional . . . . .	4
1.3	Relação entre as classes dimensionais e as localizações de operação . . . . .	4
2.1	Protocolo de comunicações: mensagem de pedido . . . . .	34
2.2	Protocolo de comunicações: mensagem de resposta . . . . .	34

# Capítulo 1

## Introdução

*As catástrofes naturais, acidentes e danos provocados pelo homem criam inúmeras situações onde vidas dependem de operações de busca e salvamento eficientes. Existem equipas especializadas que desempenham essa árdua tarefa, onde todos os meios são necessários. O desenvolvimento de aplicações robóticas pode facilitar o trabalho dessas equipas, permitindo ajudar a salvar vidas nos momentos mais decisivos.*

---

### 1.1 Objectivos

O principal objectivo do trabalho é conceber e construir um protótipo de um robô capaz de colaborar com o homem em operações de busca e salvamento ou de exploração de terreno.

Pretende-se criar uma plataforma que possa movimentar-se em terrenos perigosos ou inacessíveis ao homem, enviando informações para o operador, e facilitando a tomada de decisões acerca dos passos a tomar de forma a resgatar as vítimas localizadas no menor tempo possível.

Para isso são estudadas as necessidades deste tipo de operações, permitindo o desenvolvimento de uma plataforma à medida das exigências. Analisando as soluções implementadas por outros autores e estudando novos conceitos, procura-se contemplar a evolução desta matéria da melhor forma possível.

O plano prevê que, após finalizado o projecto mecânico e electrónico, e construído o protótipo, se façam testes em algumas situações típicas de ambientes resultantes de catástrofes.

Procura-se com o projecto contribuir para a cooperação entre humanos e robôs em operações de busca e salvamento. Além disso, com os dados e conclusões retirados do desenvolvimento e testes, pretende-se contribuir para a evolução futura das áreas da busca e salvamento e exploração autónoma.

## 1.2 Enquadramento

As catástrofes naturais sempre fizeram parte da história da humanidade. Ocorrem sem ninguém esperar, afectando o desenvolvimento económico-social. Incluem-se nos desastres naturais inundações, tempestades, ciclones, tsunamis, marés vivas, incêndios florestais, vulcões, terremotos, avalanches e desabamentos.

Para além dos desastres naturais, existem ainda outras catástrofes, resultantes da mão humana, por erro ou fonte criminosa. São exemplo disso, os acidentes com transportes, incêndios, acidentes industriais, incidentes decorrentes de transporte e armazenamento de substâncias perigosas, actos de guerra ou terrorismo, entre outros.

As zonas mais afectadas por qualquer tipo de desastre são as zonas urbanas e industriais. Devido à grande dependência das sociedades modernas por esse tipo de ambientes, estes sofreram um grande crescimento, associado ao aumento da sua densidade populacional. Além disso, o número de desastres tem vindo a aumentar consideravelmente desde o início da segunda metade do século XX. A junção destes factores faz com que o número de vítimas e pessoas afectadas por acidentes e catástrofes naturais seja cada vez maior. [7]

Uma das actividades mais importantes no seguimento de uma catástrofe é a localização das áreas afectadas e a procura de sobreviventes. Essas tarefas são principalmente realizadas por equipas especializadas. Tradicionalmente é uma operação que, apesar de demorada, deveria ser realizada no mais breve intervalo de tempo. O gráfico da figura 1.1 ilustra o dilema encontrado pelas equipas de busca e salvamento marítimo face ao tempo disponível [2]. Apesar de representar a curva evolutiva numa operação de busca e salvamento marítima, não difere muito de outro tipo de operação, nomeadamente terrestre.

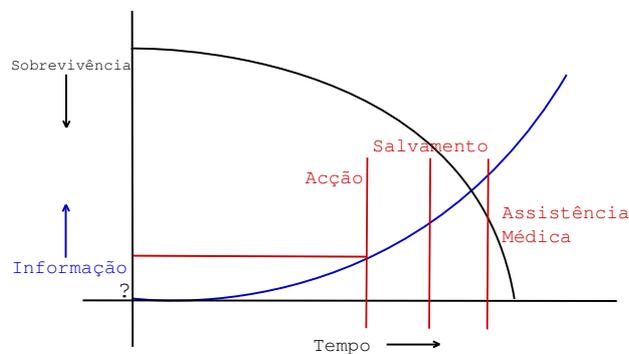


Figura 1.1: Relação entre a probabilidade de sobrevivência de uma vítima e a informação conhecida num desastre marítimo.[2]

A utilização de robôs no auxílio humano em operações de busca e salvamento pode ajudar a diminuir o tempo de resposta e o tempo de salvamento, aumentando a probabilidade de resgatar vítimas com vida. Sendo desenhados de acordo com as necessidades das operações, trabalham como interface entre as equipas de salvamento e o ambiente do desastre, fornecendo-lhes a informação necessária para o resgate.

Este ramo da robótica tem vindo a crescer.[15] Contudo é ainda uma área com grandes lacunas, onde todo o desenvolvimento é bem acolhido, visto nunca se poder saber qual a urgência do auxílio robótico neste tipo de operações.

### 1.3 Busca e Salvamento por Robôs

Para poder utilizar robôs em operações de busca e salvamento é necessário entender os ambientes e cenários característicos dos desastres.

Dadas a variedade de desastres possíveis de acontecer, existe também uma grande diversidade no tipo de ambientes sinistros. A maior diferença entre os tipos de ambiente ocorre entre os desastres em meio aquático e em meio terrestre. Sendo o objectivo do projecto desenvolver um protótipo de reconhecimento e exploração de terreno, não é estudado o ambiente aquático.

Em terra, a diversidade de potenciais desastres pode também provocar diferentes tipos de ambientes. Contudo, dada a maior ocorrência de acidentes em ambiente urbano e a maior concentração da população nestas áreas, é dado maior destaque à caracterização deste tipo de paisagem. As operações neste tipo de ambiente são denominadas de Busca e Salvamento Urbano (USAR - Urban Search and Rescue).

Estes locais são caracterizados por escombros e derrocadas, entre outros. Os terrenos são instáveis e não há informação sobre a sua geometria. O ambiente é normalmente contaminado por fumos, pó, água e, por vezes, gases tóxicos. Os terrenos podem variar entre arenosos, lisos, lamacentos e outros. O leque de temperaturas pode variar entre temperaturas baixas a extremamente frias. A área é também sujeita a qualquer condição climatérica, muitas das vezes sob situações adversas. Devido a substâncias tóxicas e gases, muitos dos ambientes têm um grande risco de explosão. Sendo uma plataforma capaz de se movimentar por este tipo de ambiente, pode, à partida, ser também considerada apta de operar noutros tipos de ambientes.

Sendo os robôs de busca e salvamento considerados como veículos não tripulados, é possível dividi-los em quatro grupos: robôs de campo, aéreos, subaquáticos e de superfície. Estes grupos são frequentemente denominados de UGV, UAV, UUV e USV respectivamente, sigla da expressão inglesa para *unmanned ground vehicles*, *unmanned aerial vehicles*, *unmanned underwater vehicles* e *unmanned surface vehicles*. A tabela 1.1 resume a utilização de robôs em operações de busca e salvamento e a tabela 1.2 o teste de robôs após as buscas serem completas. As classes dimensionais referidas nas tabelas serão descritas à frente. [15]

Tabela 1.1: Robôs utilizados em operações de busca e salvamento de acordo com o seu tipo e classe dimensional

Ano	Incidente	UAV	UGV
2001	World Trade Center, New York, USA		Transportável Portátil
2005	Deslizamento de La Conchita, California, USA		Transportável
2005	Furacão Katrina, Nova Orleães, USA	Transportável	
2005	Furacão Rita, Florida, USA	Transportável	
2005	Furacão Wilma, Florida, USA	Maxi	
2006	Explosão de Sago Mine, West Virginia, USA		Maxi

Visto o projecto em causa se debruçar sobre a busca e salvamento urbano não são estudados todos os tipos de robôs existentes.

Existem duas vertentes na procura de sobreviventes depois de uma catástrofe: sobrevoar a região afectada ou procurar em terra, por entre escombros. Nestas vertentes são utilizados os robôs aéreos e os robôs de campo. A primeira vertente é principalmente utilizada na fase inicial de localização de zonas afectadas, podendo ser utilizados os robôs aéreos. Depois de delimitadas as áreas com maior probabilidade de existência de vítimas, é necessário a sua

Tabela 1.2: Robôs testados após operações de busca e salvamento de acordo com o seu tipo e classe dimensional

Ano	Incidente	UAV	UGV	USV
2001	World Trade Center, New York, USA		Transportável Portátil	
2004	Terramoto de Niigati Chuetsu, Japão	Portátil		
2005	Furacão Katrina, Nova Orleães, USA	Portátil		
2005	Furacão Wilma, Florida, USA	Transportável		Maxi

localização.

Os robôs de campo destinados a USAR devem poder navegar evitando as zonas mais acidentadas, logo dotados de grande manobrabilidade. São ainda obrigados a ultrapassar situações como passagens estreitas, rampas, escadas, amontoados de materiais de construção desfeitos, onde um dos maiores trunfos é a flexibilidade. [11]

Para além de auxiliar na localização de vítimas, os robôs podem ainda ser utilizados para procurar caminhos nos escombros e seleccionar os locais de escavação, inspecção estrutural de áreas com risco de ruir, detecção de contaminação por substâncias tóxicas ou explosivas. Variantes de robôs são desenhados de forma a prestar assistência ou realizar tarefas de remoção de escombros. Podem ainda ser projectados de forma a prestar assistência médica no local a vítimas localizadas, ou a ajudar as equipas especializadas nessa missão. Por fim, outra potencial tarefa de robôs em operações de busca e salvamento é o reforço das linhas de comunicação entre as várias equipas, podendo assim melhorar a sua organização.

### 1.3.1 Classes Dimensionais

Segundo Murphy[13, 14], os robôs de busca e salvamento podem ser divididos em quatro grupos, de acordo com as suas dimensões: portáteis micro, portáteis mini, transportáveis e maxi. As diferentes categorias visam cumprir a procura de vítimas em diferentes situações. A tabela 1.3 resume os locais de trabalho aos quais grupos dimensionais estão melhor adaptados. A indicação “++” indica bem adaptado e a “-” indica não adaptado.

Tabela 1.3: Relação entre as classes dimensionais e as localizações de operação

Classe	Zonas	Zonas	Zonas
	Estruturadas	Confinadas	Sub-Humanas
Portáteis Micro	+	++	++
Portáteis Mini	++	++	+
Transportáveis	++	-	-
Maxi	-	-	-

### Maxi

Os robôs de busca e salvamento de classe maxi são usados em zonas estruturadas, prestando auxílio às equipas no local. São normalmente apenas teleoperados, não dotados de qualquer tipo de autonomia, funcionando principalmente como ferramentas de limpeza e remoção de

escombros, e outras tarefas pesadas para o homem. Além disso, robôs pertencentes a esta classe dimensional são também utilizados para aceder a zonas com ambientes perigosos.

O T-52 Enryu (figura 1.2 (a)), desenvolvido pela Universidade de Kyoto, pelo Departamento de Gestão de Incêndios e Desastres de Kitakyushu e pelo Instituto Nacional de Investigação de Incêndios e Desastre Japonês é um exemplo de um robô desta classe dimensional. Este foi desenvolvido com o propósito de ajudar na remoção de material, de forma a poder resgatar vítimas. Tem 3,45m de altura e 2,4m de largura e pesa cerca de 5 toneladas. Pode ser controlado tanto por um navegador como por um operador remoto. Devido às suas proporções, é possível movimentar objectos de grandes dimensões e massa. Além disso, quando operado remotamente pode aceder a áreas que de outra forma seriam demasiado perigosas para trabalhar. [5]



(a)



(b)

Figura 1.2: Robôs da classe maxi: T-52 Enryu da Universidade de Kyoto (a), Remotec ANDROS Wolverine (V2) da US MSHA (b).

O projecto Remotec ANDROS Wolverine (figura 1.2 (b)) desenvolvido pela Administração para a Segurança e Saúde de Minas do Departamento do Trabalho dos Estados Unidos é exemplo de um robô da classe maxi. Este robô, apelidado de V2 tem cerca de 127cm de altura e pesa mais de 500kg. O V2 é operado remotamente, tendo sido desenvolvido para trabalhar em acidentes em minas, dotado de câmaras, iluminação, detectores de gases, capacidade de visão nocturna, comunicação audio, e um braço manipulador. Este robô permite efectuar operações de exploração ou regate em minas, comunicando com o operador através de um cabo de fibra óptica. Assim, o operador tem acesso em tempo real a diversas informações, incluindo vídeo, audio, concentrações de gases tóxicos e combustíveis, entre outras. Por fim, o V2 está ainda dimensionado de forma a poder resistir a explosões sem pôr em risco a sua integridade.

O Remotec ANDROS Wolverine foi utilizado em 2006, nas buscas de salvamento após o desastre de Sado Mine em 2006. [15, 20]

### Transportáveis

Com dimensões muito reduzidas quando comparados com os maxi, os robôs da classe transportável são também usados no mesmo tipo de tarefas. Contudo, graças à sua maior mobilidade, podem ser movimentados para zonas de difícil acesso. Os robôs desta classe são

principalmente usados em ambientes contaminados com substâncias tóxicas. Para além disso, são ainda utilizados em operações especiais como por exemplo o desarmamento de explosivos.

O PackBot 510 da empresa americana iRobot é exemplo de um robô da classe transportável. Tem uma altura de 40cm, comprimento entre 80cm a 1m e largura entre 40 a 55cm, conforme a configuração. O robô tem um peso de cerca de 30kg, e uma capacidade de carga de 20kg. É dotado de um braço mecânico capaz de se elevar a uma altura de 2,2m. O PackBot foi desenvolvido para prestar auxílio a equipas policiais no desarme de bombas, inspecções, e limpeza de percursos. Contudo, visto ser um produto comercial, dotado de inúmeros acessórios e facilmente adaptável, pode também ser utilizado nas operações mais clássicas da busca e salvamento. De forma a ser operado, está equipado com diversas câmaras, utilizadas não só para obter informação acerca do ambiente mas também sobre o estado do próprio robô. [24, 25]



Figura 1.3: Robô de classe transportável: PackBot da iRobot

### Portáteis

Sendo mais pequenos que os robôs de classe transportável, a principal diferença dos modelos da classe portátil é poderem ser transportados, juntamente com todo o hardware necessário para a sua utilização, pelo homem em mochilas ou malas da transporte. Essa característica torna-se útil uma vez que facilita a colocação dos sistemas robóticos em operação no local. Desta forma, este tipo de robôs é principalmente utilizado para a busca de sobreviventes e inspecção estrutural no período imediatamente a seguir ao desastre. Podem ser assim dos mais propícios a contribuir de forma útil para as missões em que se envolvem.

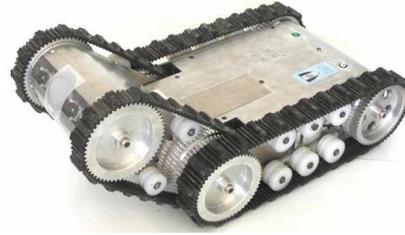
A maioria dos robôs de busca e salvamento pertence à classe portátil. Dentro destes, o grupo preponderante é de tamanho mini, principalmente devido às limitações mecânicas. Estes são capazes de se movimentar por entre escombros e destroços, enviando informação para um operador remoto. Visto terem dimensões mais reduzidas, permitem aceder a espaços mais confinados, por vezes com dimensões sub-humanas.

Os projectos Snoopy (figura 1.4 (a)) e Medusa desenvolvidos pela Universidade de Carnegie Mellon ilustram o conceito de robôs de busca e salvamento portáteis mini. Estes robôs são dotados de uma câmara montada numa haste hiper-redundante, constituída por diversos elementos ligados por uma junta actuada com dois graus de liberdade. Com este sistema é

possível obter imagens de locais muito estreitos, não acessíveis por outros sistemas. O robô é montado numa base de um carro de modelismo, capaz de se movimentar por terrenos irregulares. Foi ainda adicionada uma segunda câmara montada num sistema *pan and tilt* para ser utilizada na navegação. [3]



(a)



(b)

Figura 1.4: Robôs de classe portátil mini: Snoopy da Universidade de Carnegie Mellon (a), Raposa do Instituto Superior Técnico (b).

O Projecto Raposa (figura 1.4 (b)) desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico é também exemplo de um robô de classe portátil mini, sendo também um dos poucos projectos robóticos de busca e salvamento em Portugal. O robô tem um comprimento máximo de 75cm e largura de 37cm, com a sua configuração de maiores dimensões. A sua altura é de 17,5cm, tendo uma altura ao solo de 3cm. O peso do robô é de 27Kg com todos os acessórios e baterias, potencializando uma velocidade máxima de 0.5m/s. Uma das principais características deste robô é ser constituído por dois módulos ligados por uma junta rotacional actuada. A articulação desta junta possibilita ajustar a geometria do robô de forma a superar uma maior diversidade de obstáculos. Além disso, a sua locomoção por meio de lagartas é propícia aos terrenos irregulares, e o facto de ser simétrico em relação a um plano de topo possibilita o funcionamento invertido. Este robô está equipado com 4 câmaras, sendo uma delas térmica, microfone e colunas, iluminação, sensores de temperatura, humidade e gases, sendo por isso versátil no número de operações que pode realizar. Além disso, é alimentado por 3 baterias de 5Ah, conseguindo uma autonomia de 2 horas. [12]

Também pertencentes à classe portátil, os robôs de menores dimensões são denominados micros. Estes devem não só poder locomover-se por entre os escombros, mas também aceder a zonas sub-humanas<sup>1</sup>, deslocando-se por túneis, condutas, cavidades, e outros espaços confinados. São muitas vezes utilizados em operações verticais, por exemplo suspensos por cabos.

Um dos maiores problemas para os robôs pertencentes a esta classe é ultrapassar os obstáculos. Uma vez que são pequenos, um obstáculo médio (por exemplo escadas) torna-se grande quando comparado com as pequenas dimensões dos robôs. Além disso, de forma a manter as proporções reduzidas, adiciona-se também o problema de albergar todos os sistemas necessários à movimentação e percepção do robô.

---

<sup>1</sup>Zonas de acesso impossível ao Homem devido às dimensões reduzidas.

Existe também uma outra vertente de robôs, cuja geometria é baseada no corpo de cobras, que também pode ser considerados como de classe portátil micro. São descritos na secção 1.3.3. Estes, apesar de terem uma dimensão de grande extensão, têm uma área de projecção frontal reduzida permitindo-lhes operar nos mesmos locais que os restantes robôs desta classe. Contudo, é necessário ter em conta que o seu transporte deve cumprir os requisitos de poder ser feito sem meios mecânicos. Caso contrario, são considerados de classe transportável.

O Personal Exploration Rover (PER) (figura 1.5 (a)) desenvolvido pela Universidade de Carnegie Mellon é um dos mais conhecidos robôs de classe micro. Este robô foi concebido com objectivos académicos, tendo como base os robôs de exploração planetária enviados para Marte pela NASA. Não sendo verdadeiramente um robô de busca e salvamento, é uma plataforma versátil quando comparada com o seu tamanho. Desta forma, pode servir como base ao estudo de aplicações robóticas de busca e salvamento. O robô tem aproximadamente 36cm de altura, 33cm de comprimento e 34cm de largura, e um peso de cerca de 7kg. De forma a movimentar-se é equipado com 6 rodas montadas em hastes de forma a assumirem um comportamento de suspensão. A sua direcção é controlada através da regulação do ângulo de duas das rodas. A sua percepção é baseada numa câmara e um sensor infravermelho de distância montados num sistema de *pan and tilt*. [17, 18]



(a)



(b)

Figura 1.5: Robôs de classe portátil micro: Personal Exploration Rover da Universidade de Carnegie Mellon (a), Versatrax 100 da Inuktun (b).

O robô Versatrax 100 (figura 1.5 (b)) da empresa Inuktun foi desenvolvido como ferramenta para inspeção de condutas e prova também ser versátil como robô de busca e salvamento de classe micro. O robô e sistema de controlo pesam apenas cerca de 9kg e permite operar em cavidades (preferencialmente condutas) a partir dos 10cm de diâmetro. É equipado com uma câmara a cores, *pan and tilt* e iluminação, permitindo inspeccionar até 180m de túneis. De forma a ajustar-se ao local de locomoção, o Versatrax tem a capacidade de variar o ângulo e a distância entre os seus sistemas de lagartas. [10]

### 1.3.2 Características Necessárias

Segundo o sítio do CRASAR (Center for Robot Assisted Search & Rescue) orientado pela investigadora Robin Murphy[14], existem diversas características necessárias para os robôs de campo de busca e salvamento urbano. Apesar de não obrigatórias, estas características devem

ser levadas em conta de modo a que os robôs projectados possam realizar as tarefas a que se propõem. É de relevar que não deve apenas ter-se em conta as características do robô mas também de todo o sistema que o permite operar.

### **Sistema Robotizado**

Considera-se um sistema robotizado o grupo do robô e todo o *hardware* necessário para o operar. Um sistema robotizado pode ser constituído por: robô, unidade de controlo, contentor ou mala de transporte, equipamento e ferramentas, peças sobressalentes, etc. Um sistema é normalmente utilizado por um mínimo de dois operadores.

O sistema deve ser empacotado de forma a possibilitar o transporte aéreo e rodoviário num único grupo.

De forma a estar pronto para operar de forma rápida e eficiente, o sistema deve poder ser transportado em mochila, de forma organizada. Deve poder ser preparado para operar num tempo inferior a 5 minutos, preferencialmente cerca de 1,5 minutos.

Estas recomendações apenas se aplicam aos robôs de menores dimensões, pertencentes às classes dimensionais mini e micro, descritas mais à frente neste capítulo. Contudo, é sempre importante assegurar a possibilidade de transporte de qualquer sistema robótico projectado.

Por fim, o *software* deve ser dotado de uma interface de programação de aplicativos (API) de forma a poder desenvolver novas funcionalidades. Deve ainda poder comunicar com outros sistemas, de forma a divulgar toda a informação adquirida.

### **Robôs**

Os robôs de busca e salvamento devem ser capazes de se locomover nos ambientes sinuosos descritos na secção anterior. Para isso, como referido, é fulcral serem dotados de boa flexibilidade e manobrabilidade, podendo isto ser conseguido através de inúmeras abordagens.

Independentemente da forma de locomoção, existem algumas características que podem ser consideradas obrigatórias num robô de busca e salvamento. Estes devem ser equipados no mínimo com uma câmara de vídeo a cores, iluminação e comunicação áudio com dois sentidos. Devem ainda ser capazes de ler a temperatura e a sua posição, nomeadamente a orientação da câmara.

Mecanicamente, devem estar equipados com um ponto de ligação para uma corda de segurança, com possibilidade de desconexão rápida. Devem ser à prova de água (não apenas resistentes à água) e preferencialmente ter algum tipo de blindagem protectora. Devem ainda poder operar invertidos ou ter a capacidade de se auto-inverterem. Tanto durante a sua locomoção como em operações específicas, devem evitar movimentos que levantem poeira. Todas as componentes devem ter cores bem visíveis, de forma a localizar facilmente o robô, facilitar a sua limpeza e ter uma aparência amistosa para as vítimas encontradas. É recomendado o uso de cores de referência para o equipamento de segurança: amarelo, laranja e vermelho.

As comunicações com o operador devem fornecer indicação sobre o estado da bateria. Caso sejam wireless devem ainda fornecer ao operador indicação sobre a intensidade do sinal.

Os robôs devem ser dotados de baterias com carga suficiente para operar durante um tempo superior a 20 minutos. Além disso, o tempo de carga ou substituição de baterias deve permitir um mínimo de 4 operações num período de 12 horas. Robôs com funções especiais devem ter tempo de operação mais prolongado.

Por fim, é desejável um tempo médio entre falhas (MTBF) de 96 horas. Em caso de produção em série, esta deve ir de encontro à norma ISO 9001, garantindo a uniformidade de todas as unidades de um modelo.

### **Unidade de Controlo**

A unidade de controlo de um robô de busca e salvamento deve estar preparada para este ser controlado por dois operadores. Através desta, deve ser possível operar tanto em total ausência de luz como sob incidência do sol. É também útil poder operar sob quaisquer condições climáticas adversas, particularmente calor ou frio extremo e chuva ou neve.

São recomendados ecrãs grandes para o visionamento e controle do robô. Os controlos não devem interferir com o equipamento dos operadores, normalmente equipados com luvas, óculos de segurança, capacetes, etc.

Deve ser guardado um arquivo de todas as imagens e comandos efectuados, sendo possível o visionamento do arquivo em qualquer momento.

### **1.3.3 Diferentes Abordagens**

A secção anterior faz referência a algumas das características que os robôs de campo para busca e salvamento devem respeitar. Contudo, é indiscutível que o cumprimento das características não é suficiente, uma vez que a maior problemática nos robôs de busca e salvamento é a locomoção por terreno adverso. Para isso, existem diferentes abordagens na geometria e componentes utilizadas nos robôs.

### **Elemento de Tracção**

De forma a poder movimentar e manobrar os robôs é necessário um elemento de transmissão de potência ao chão. Existem três formas de locomoção principais: utilização de rodas, pernas ou lagartas. Cada uma destas abordagens oferece algumas vantagens e desvantagens, sendo por isso um ponto fulcral no projecto deste tipo de robôs.

A utilização de rodas é a forma clássica de locomoção de veículos. É uma construção simples, logo pouco susceptível a falhas. A utilização de rodas permite a estabilidade do veículo e o seu repouso sem consumo de energia. No entanto, esta solução não fornece muito contacto com o solo podendo criar problemas de escorregamento.

O projecto Snoopy (referido na secção 1.3.1) desenvolvido pela Universidade de Carnegie Mellon é exemplo da utilização de rodas, uma vez que tem como base a estrutura de um carro de modelismo. Esta solução tem um bom comportamento em terrenos moderados, contudo não permite a locomoção por muitas das situações características de escombros.

Fornecendo uma maior área de contacto com o terreno, as lagartas possibilitam a resolução de alguns dos problemas de escorregamento das rodas, sem adicionar grande complexidade mecânica. Ademais, possibilitam maiores pontos de contacto com o solo, sendo assim mais úteis para terrenos acidentados. Todavia, podem causar também problemas de folgas ou de encravamento em material solto, levando ao bloqueamento dos robôs. De qualquer forma, a utilização de lagartas tem vindo a ser a solução mais utilizada nos robôs de busca e salvamento.

O Chaos (figura 1.6) da empresa Autonomous Solutions é exemplo de um dos muitos robôs de busca e salvamento movidos por sistemas de lagartas. Este robô pertence à classe transportável, tem um comprimento entre 71 e 136cm, uma largura de 68,5cm e uma altura de 20 a 52cm. A sua locomoção é assegurada por quatro lagartas independentes montadas como

hastes rotativas. Possibilita assim velocidades até 8km/h, podendo ultrapassar obstáculos até 45cm de altura e orifícios até 60cm. Consegue ainda operar em inclinações com mais de 45° em qualquer direcção. A utilização das lagartas, juntamente com a geometria variável, é o principal trunfo para a mobilidade deste robô. [22]



Figura 1.6: Exemplo de tracção por lagartas: Chaos da Autonomous Solutions.

Apesar de mecanicamente mais complexa, a utilização de pernas pode também oferecer grande mobilidade por terrenos acidentados. Contudo, isso obriga à utilização de um mínimo de 2 graus de liberdade por perna. Para além disso, a maioria dos sistemas de pernas são mais instáveis que os baseados em rodas e têm também um maior consumo de energia.

Devido às dificuldades inerentes à utilização de pernas, não existem muitos robôs de busca e salvamento movidos por pernas. Existem no entanto algumas soluções baseadas neste conceito que possibilitam uma grande mobilidade.

O TerminatorBot (figura 1.7) da DARPA, apelidado de CRAWLER (*Cylindrical Robot for Autonomous Walking and Lifting during Emergency Response*) é um dos robôs de busca e salvamento cujo sistema de locomoção é assegurado por pernas. Este robô, de classe dimensional micro, é dotado de 6 graus de liberdade distribuídos por 2 pernas. A actuação dessas pernas permite **arrastar** o robô, provando ser particularmente eficaz em terrenos sinuosos e na subida de rampas. [23]



Figura 1.7: Exemplo de robô com locomoção por pernas: TerminatorBot da DARPA.

## Geometrias Mecânicas

Existem diversas abordagens no tipo de geometria adoptada para os robôs de busca e salvamento. Entre as diversas tipologias são de destacar os robôs de geometria convencional, os de

geometria variável, os baseados em ofídeos e os multi-unidades.

Os robôs de geometria convencional têm como principal vantagem a facilidade de operação. Visto terem um comportamento mecânico simples têm um custo de desenvolvimento menor e são menos susceptíveis a falhas. Contudo, visto serem mais simples, são também menos versáteis na transposição de obstáculos.

O SPAWAR Urbot (figura 1.8) do CRASAR foi um dos primeiros robôs de busca e salvamento a ser projectado e testado.



Figura 1.8: Exemplo de robô com geometria convencional: SPAWAR Urbot do CRASAR.

A geometria variável é um dos elementos mais recorrentes no desenvolvimento de robôs de busca e salvamento. Com este tipo de construção consegue-se aumentar a adaptabilidade ao terreno, tornando os robôs mais versáteis, sem grande compromisso com a complexidade mecânica. A criação de geometrias variáveis é conseguida através de juntas actuadas entre diversas secções do robô. A principal dificuldade da utilização de geometrias variáveis passa por assegurar a estabilidade dos robôs em qualquer uma das suas configurações.

O robô NUGV (figura 1.9) desenvolvido pela Automated Controlled Environments, Inc - Valencia, California é um dos robôs de busca e salvamento que representa melhor o conceito de geometria variável. Este robô, pertencente à classe portátil mini, tem 45cm de comprimento, 41cm de largura e 12cm de altura na sua configuração natural (figura 1.9 (a)). Alterando a sua configuração, consegue aumentar o seu comprimento para 125cm e reduzir a sua largura para 25cm. Essas configurações permitem-lhe poder ultrapassar obstáculos de maiores dimensões (como por exemplo subir escadas) e ao mesmo tempo passar por espaços mais confinados. A sua adaptabilidade consegue-se graças à actuação de 6 graus de liberdade independentes. Cada lagarta tem um movimento independente (2 graus de liberdade). As lagartas rodam  $360^{\circ}$  sobre extremidades opostas do módulo central, aumentando o comprimento do robô (2 graus de liberdade). As lagartas em torno da lateral do módulo central diminuem a sua largura (2 graus de liberdade).[1, 21]

Os robôs PackBot, Raposa, Versatrax 100 e Chaos, apresentados nas secções anteriores são também dotados de geometria variável. Todos eles possuem juntas que permitem alterar a forma geral do robô de forma a ajustá-la ao obstáculo a transpor.

Apesar de os robôs de geometria variável se poderem adaptar a diversas situações, as suas configurações são limitadas. Desta forma são criados robôs hiper-redundantes baseados em cobras. Estes são os dotados de maior mobilidade, embora sejam também consideravelmente mais complexos. A maioria dos robôs deste tipo são constituídos por segmentos ligados entre si por juntas actuadas, normalmente com 2 graus de liberdade. A coordenação das várias juntas permite criar movimentos idênticos às cobras, conseguindo assim ultrapassar inúmeros



(a)



(b)



(c)

Figura 1.9: Exemplo de robô com geometria variável: NUGV da Automated Controlled Environments, Inc - Valencia, California (a), Diferentes configurações (b)(c).

complexos e espaços confinados.

Contudo, apesar de proporcionarem um grande potencial para as operações de busca e salvamento, são de difícil controlo e mais susceptíveis a falhas. O tipo de movimentos e número de juntas actuadas provoca também um consumo de energia acrescido quando comparado com os restantes tipos de geometrias.

O protótipo HyDRAS-Ascent (figura 1.10) criado pela Universidade Virginia Tech ilustra o conceito de robôs baseados em cobras. Este é constituído por diversos módulos ligados por juntas flexíveis actuadas. O robô consegue assim controlar o ângulo entre o vários módulos e criar movimento de rotação dos mesmos. Através da combinação dos diversos movimentos o robô consegue locomover-se não só em terreno plano mas também por irregularidades. Uma particularidade deste robô face aos apresentados previamente é o facto de poder deslocar-se na vertical através de postes ou outra estrutura similar. Para isso, o robô enrola-se à estrutura suportando o seu peso pelo atrito causado pela força de aperto. Os movimentos rotacionais permitem então o deslocamento na direcção vertical. [16]

Visto os robôs baseados em cobras terem um controlo e comando demasiado complexo para garantir a sua fiabilidade, procurou-se adaptar esse conceito de forma a resolver esse problema. A geometria multi-unidade consegue conciliar algumas das vantagens das configurações referidas, nomeadamente das geometrias simples e da baseada em cobras. Esta consiste na união de várias unidades de geometria simples, possibilitando a interacção entre as mesmas de forma a cumprir um objectivo comum. A união das várias unidades pode ser feita



Figura 1.10: Exemplo de robô baseado em cobras: HyDRAS-Ascent da Virginia Tech.

por uma junta actuada, permitindo movimentos semelhantes aos robôs baseados em cobras. Frequentemente, os robôs com esta geometria são denominados de serpentiformes.

O projecto OmniTread (figura 1.11 (a)) desenvolvido pela universidade de Michigan é um dos robôs mais versáteis para operações de busca e salvamento. É constituído por 5 unidades juntas por acoplamentos de 2 graus de liberdade actuados. Cada unidade é composta por 4 pares de lagartas, permitindo ao robô operar de forma independente da orientação. O movimento das lagartas apenas é responsável pela progressão no terreno, sendo a direcção unicamente suportada pela actuação dos acoplamentos. A actuação das juntas do acoplamento é pneumática, permitindo a realização de grandes forças mas obrigando o uso de um tubo de ligação. [6]



(a)



(b)

Figura 1.11: Exemplo de robôs multi-unidade com geometria serpentiforme: OmniTread da Universidade de Michigan (a), Robô baseado num centípede do Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial de Guseong-dong Yuseong-gu Daejeon, Korea (b).

O robô do Departamento de Engenharia Mecânica e Aeroespacial de Guseong-dong Yuseong-

gu Daejeon, Korea baseado num centípede (figura 1.11 (b)) é capaz de movimentar por terreno irregular, e transpor obstáculos até cerca de 48% do seu comprimento e 550% da sua altura. Este robô é constituído por 5 unidades, uma principal e quatro secundárias, ligadas entre si por uma junta actuada com um grau de liberdade. A massa total do robô é de 3,76kg. Tem 750mm de comprimento, e largura de 200mm e altura de 65mm. Apesar de apenas se poder deslocar numa direcção, este robô ilustra o potencial do uso da geometria serpentina. O seu controlo é feito de forma autónoma, dependendo o comportamento da unidade principal do ambiente e o comportamento das restantes unidades da unidade principal. [4]

### 1.3.4 Modo de Operação

O modo de operação clássico dos robôs de busca e salvamento baseia-se no controlo remoto. Os robôs são tele-operados a partir da observação do ambiente pelo operador. Contudo, de forma a melhorar o desempenho dos robôs, é-lhes dada autonomia de decisão mediante percepção sensorial. Consoante o grau de autonomia, os robôs podem ser tele-operados, tele-autónomos, de autonomia partilhada ou autónomos.[21]

#### Tele-operados

Os robôs tele-operados não necessitam de qualquer tipo de percepção autónoma acerca do ambiente. O comando deve ser feito a partir da unidade de controlo através de um joystick ou outro dispositivo semelhante. Toda a informação obtida dos sensores é enviada para o operador.

Este tipo de sistema é um dos mais utilizados. Contudo, leva a um comando lento e dificulta a interacção com robôs de muitos graus de liberdade.

#### Autónomo

A automação total é o modo de funcionamento oposto da tele-operação. Este não necessita de operador, sendo todas as decisões tomadas autonomamente pelo robô.

Este modo de funcionamento não se adequa a missões em ambientes desconhecidos, logo não é indicado para robôs de busca e salvamento. Existem porém muitos estudos e investigações com o objectivo de equipar um robô com percepção sensorial suficiente para operar de forma autónoma numa missão de busca e salvamento.

Contudo, as missões de resgate são muito susceptíveis a falhas devidas a alterações do ambiente. Dependem assim não só do conhecimento técnico do qual as equipas de busca e salvamento têm conhecimento, mas também de senso comum. Dificulta-se assim a possibilidade do uso de robôs completamente autónomos nestas missões. Além disso, existe ainda um dilema ético que resultaria deste tipo de operação. As decisões acerca do salvamento de uma vida humana não devem ser feitas por uma máquina.

#### Tele-autónomos

O modo de operação tele-autónomo alia à tele-operação algumas das vantagens do funcionamento autónomo. Assim, mantendo a responsabilidade da tomada de decisões no operador, torna-se possível navegar de forma mais facilitada e controlar um maior número de graus de liberdade.

No modo de funcionamento tele-autónomo todas as decisões acerca da navegação do robô permanecem no operador. Contudo, o robô é capaz de tomar algumas decisões de baixo nível. Assim, existem principalmente duas situações onde a tele-automação traz grandes vantagens em relação à tele-operação: negociação de obstáculos e controlo de graus de liberdade.

Aquando da navegação, apesar de o operador controlar o caminho a percorrer, o robô é capaz de negociar a transposição de obstáculos de forma autónoma. Isto facilita o controlo, permitindo ao operador concentrar-se nas restantes tarefas a que está sujeito.

No caso dos robôs com muitos graus de liberdade, o robô deve ser capaz de controlar todas as suas juntas de forma a produzir o efeito dos comandos enviados pelo operador.

Este modo de operação é um dos mais utilizados, dadas as suas vantagens que se enumeram:

- reduz o tempo de reacção e o tempo de manobras,
- é mais imune a falhas de comunicações,
- não requer controlo constante por parte do operador,
- possibilita ao operador concentrar-se nas tarefas de alto nível,
- pode fornecer melhor informação acerca do ambiente onde navega.

A principal desvantagem deste modo de funcionamento prende-se com o facto de poder ser difícil para o operador libertar-se de parte do controlo do robô. Acontece que técnicos de equipas de busca são reticentes em confiar parte do controlo ao robô.

### **Autonomia Partilhada**

O processo de autonomia partilhada fundamenta-se nos mesmos conceitos que o modo de funcionamento tele-autónomo. Contudo, o seu nível de automação é superior, descartando ainda mais controlo do operador.

Neste modo de funcionamento o robô é capaz de se deslocar autonomamente. Contudo, a sua missão é controlada pelo operador, que interage com ele através de um protocolo de comunicação complexo, dando-lhe objectivos. O robô pode ainda interagir com o operador, de forma a obter informações, através de um protocolo de pergunta/resposta.

A autonomia partilhada pode ser útil uma vez que alia as vantagens da automação ao poder de decisão no operador. Contudo, dadas as dificuldades de navegação, a sua implementação é uma tarefa árdua, ainda pouco desenvolvida.

## Capítulo 2

# Proposta de Solução

*Pretendeu-se projectar um robô serpentiforme locomovido por um sistema de lagartas. Cada unidade deve poder ser autónoma, dotada de alimentação, sistema de controlo e elementos de tracção. Procurou-se ainda trabalhar sobre um conceito modular, permitindo criar bases comuns às diversas funções necessárias no protótipo.*

*Com a geometria multi-unidade e a modularidade pretende-se obter um protótipo expansível, e ao qual possam ser atribuídas novas funcionalidades.*

---

Analisando as várias aplicações já desenvolvidas por inúmeras equipas em diversos países, optou-se por projectar um modelo multi-unidade serpentiforme baseado em unidades de lagartas. Pretende-se um modelo compacto permitindo o acesso e passagem por uma grande diversidade de espaços confinados, e ao mesmo tempo capaz de navegar por terrenos irregulares.

A geometria principal do protótipo, utilizada também em diversos projectos de robôs de busca e salvamento estudados, tem provas dadas da sua eficácia na locomoção por terrenos adversos.

Para além da forma serpentiforme, optou-se pela criação de unidades modulares. Ao propor este tipo de arquitectura, pretende-se potencializar a expansibilidade do protótipo, e a substituição de módulos defeituosos ou danificados. Pretende-se ainda explorar o conceito de multifuncionalidade, procurando desenvolver uma plataforma que possa também ser utilizada em outras operações como por exemplo exploração e cartografia de terreno, inspecções e vigilância, transporte de instrumentos de investigação para terrenos inacessíveis ou não recomendados ao ser humano, entre outros.

No protótipo foram ainda aplicados novos conceitos, de forma a testar a sua possibilidade de integração neste tipo de funcionalidades. Desta forma, as ideias guia são as seguintes:

- Sistema multi-unidade,
- Acoplamento entre unidades com 3 graus de liberdade,

- Actuação de um grau de liberdade de parte dos acoplamentos,
- Unidades modulares com base comum e diferentes módulos de função,
- Estrutura fechada (blindagem) e simétrica,
- Possibilidade de funcionamento invertido, com rotação independente das unidades,
- Utilização de amortecimento como forma de protecção passiva.

Cada unidade é locomovida por um conjunto de duas lagartas independentes responsáveis pela tracção e direcção da mesma. Para isso, é equipada com 2 motores, alimentação e sistema eléctrico-sensorial de forma a possuir independência.

O acoplamento entre as várias unidades é feita por uma junta universal, sendo esta articulada com dois graus de liberdade. A sua montagem é feita através de uma calha, permitindo a rotação e obtendo-se assim um terceiro grau de liberdade.

Parte dos acoplamentos deve ter actuação no grau de liberdade responsável pela rotação em torno do eixo transversal ao robô. Assim, possibilita-se a rotação livre em torno dos eixos longitudinais e verticais do protótipo, permitindo uma boa adaptação ao terreno e manobrabilidade, respectivamente. A rotação em torno do eixo transversal ao protótipo permite a elevação dos módulos e transposição de obstáculos de maiores dimensões. A figura 2.1 representa as rotações inter-unidades livres e actuada. A verde e vermelho as rotações livres e a azul a rotação actuada.

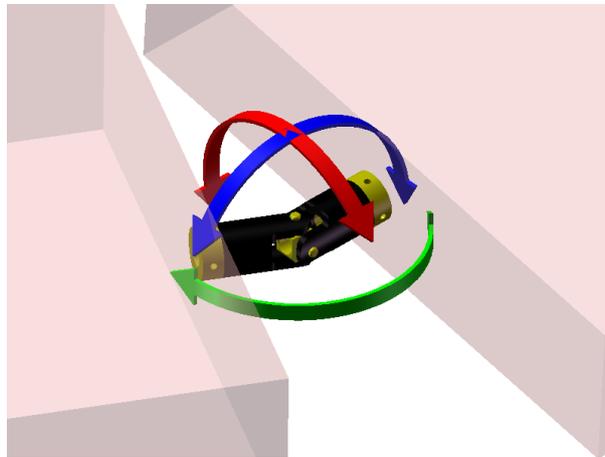


Figura 2.1: Representação esquemática das rotações inter-unidades.

Na maioria dos robôs serpentiformes existem funções específicas para cada unidade, fazendo com que sejam geometricamente diferentes e tenham circuitos electrónicos diferentes. Uma vez que existem funções distintas para as várias unidades, como por exemplo comunicações, isto não pode ser evitado sem o aumento substancial do custo.

De forma a aproximar a geometria de todas as unidades, reduzir o custo do protótipo, e ao mesmo tempo possibilitar a adição de novas funções, cada unidade foi dividida em duas partes: módulo de base e módulo de função. Cada um desses módulos é constituído por diversos componentes, podendo alguns deles ser substituídos de forma a alterar as características dos módulos. A secção 2.1 suporta algumas das decisões tomadas acerca deste conceito.

O módulo de base é constituído por dois motores de locomoção e respectivas lagartas, baterias e uma secção de distribuição de energia e de gestão de unidade. Este é dotado de alguns sensores de auxílio à navegação, podendo ser parcialmente autónomo. Visto albergar o sistema de locomoção completo, o módulo base delimita as dimensões da unidade. Assim, a blindagem é também assegurada por este módulo, contendo o engate para os módulos de função numa zona já protegida.

Os módulos de função são acoplados aos módulos base, especificando o seu propósito no protótipo. Assim, foram desenvolvidos três módulos de função distintos: master, slave e alimentação. O módulo master desempenha as funções de comunicação com o operador e interacção com todos os restantes módulos do protótipo. É ainda dotado de câmara vídeo e iluminação e está preparado para albergar até 4 sensores analógicos e 6 sensores digitais. O módulo slave é responsável pela actuação da ligação inter-unidade. Para isso está equipado com um motor e ponto de acoplamento. O módulo de alimentação tem como função aumentar a autonomia do protótipo, transportando baterias. Além disso, este módulo foi pensado para ser utilizado em último lugar, desempenhando também a função de lastro, possibilitando a elevação de um maior número de unidades na frente.

A figura 2.2 ilustra a forma como os módulos base são equipados com os módulos de função. Módulo base a vermelho e módulo de função a amarelo.

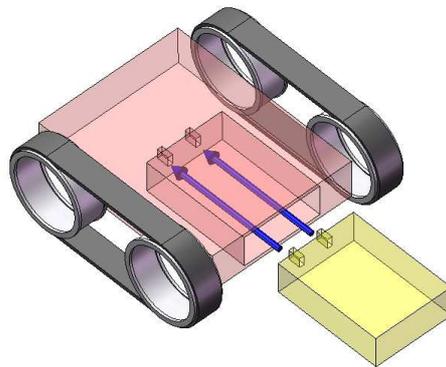


Figura 2.2: Representação esquemática do sistema de ligação dos módulos de uma unidade.

Dada a natureza do terreno onde o robô se vai deslocar ser muito propícia a quedas, todos os módulos são constituídos por uma estrutura fechada, que funciona como blindagem. Além disso, o protótipo está preparado para operar invertido, tendo os módulos dois planos de simetria, como ilustrado na figura 2.3. Devido à rotação inter-unidade segundo o eixo longitudinal do robô, é possível a inversão independente de unidades.

Para além da estrutura protectora, de forma a garantir a integridade das componentes dos módulos, nomeadamente dos eixos e dos motores, são utilizadas rodas deformáveis. Estas devem ter a função de amortecimento, melhorando a adaptação ao terreno, e em caso de carga extrema devem permitir o apoio da estrutura, limitando as cargas suportadas pelos eixos e motores.

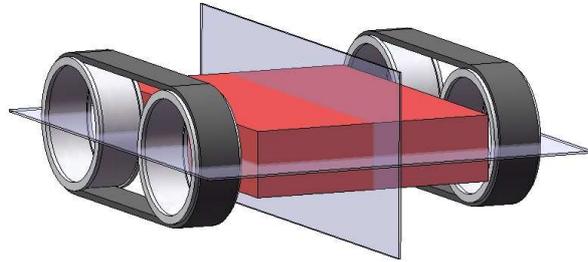


Figura 2.3: Representação esquemática dos planos de simetria de uma unidade.

## 2.1 Modularidade e Multifuncionalidade

Tipicamente, modularidade é um termo que se refere a um projecto composto por várias peças. Neste tipo de projecto é possível trocar componentes, permitindo diversas configurações. Desta forma, um produto modular executa as suas funções através da combinação de diferentes módulos. A modularidade irá assim permitir a criação de diferentes produtos de acordo com a combinação de diferentes componentes (módulos). [19] Este conceito é familiar de todos nós, muito graças ao brinquedo mundialmente famoso da empresa Dinamarquesa LEGO.

A utilização da modularidade no desenvolvimento de produtos é uma tendência actual, sendo utilizada em diversos sectores tais como o automóvel, nas tecnologias de informação e comunicação e na indústria em geral. Contudo continua a existir um entrave à utilização deste conceito, uma vez que pode complicar o projectos mecânico.

O uso da modularidade permite desenvolver uma gama variada de produtos, que se alteram e são adaptáveis a diversas necessidades. Além disso, o desenvolvimento de produto em módulos facilita a sua actualização e reparação. Uma outra vantagem associada a produtos modulares é a facilidade nas questões de transporte e logística, sobretudo quando o produto tem dimensões consideráveis. [19]

Num produto modular denomina-se módulo a um grupo de componentes e desempenha uma função específica, podendo alguns módulos ter arquitectura integral. A interacção entre os vários módulos de um produto é definida e normalmente fundamental para a função do todo. Este tipo de arquitectura permite ainda alterar apenas alguns módulos, sendo integrados de forma diferente e com funcionalidades diferentes no mesmo produto. Isso faz com que a adaptação de um produto a novas necessidades seja facilitada, reduzindo ainda o custo de eventuais melhoramentos. [9]

Para além da modularidade, existem também o conceito de plataformas transversais. Este consiste no uso de plataformas base comuns (módulos) em diferentes produtos. A utilização de uma plataforma estável e bem desenvolvida num novo produto é um elemento chave para o seu sucesso. Pode ainda acelerar o processo de desenvolvimento e adição de novas funções. [26]

Por fim, aliar a modularidade à multifuncionalidade no desenvolvimento de produto é uma vantagem que contribui para a racionalização dos custos e ao mesmo tempo para criar soluções mais apelativas e pluri-funcionais.[26]

## 2.2 Projecto Mecânico

Visto o conceito utilizado para o protótipo ser multi-unidade, o projecto mecânico foi dividido no dimensionamento das unidades independentes e nos seus acoplamentos. Além disso, de forma a possibilitar a modularidade das unidades, estas são também divididas em duas partes: módulo base comum a todas as unidades e módulo de função. O Projecto mecânico dos diversos módulos tem bases comuns.

### Estrutura

Tanto os módulos de base como os módulos de função são desenhados segundo o conceito de *designed for assembly*. Isto é feito minimizando o número de peças do protótipo, principalmente componentes de fixação. Para isso, a estrutura de cada módulo é formada por duas partes. Estas, para além de terem função estrutural e de blindagem, albergam as restantes componentes. Pretende-se assim não só facilitar a montagem mas também a substituição de componentes.

As figuras 2.4 (a) e (b) ilustram as geometrias das estruturas desenhadas. A figura (a) realça os detalhes de ligação entre as componentes da estrutura inferior e superior. A ligação é feita por 4 parafusos de cabeça baixa, distribuídos pelos cantos. Para além disso, foram desenhados entalhes de modo a que sirvam de guia na montagem e obstruam os movimentos no plano de separação. A figura (b) representa a forma de fixação de diversas componentes à estrutura, através de um corte. As componentes são fixas através do fecho das duas partes da estrutura. Algumas componentes têm também uma ligação aparafusada à estrutura.

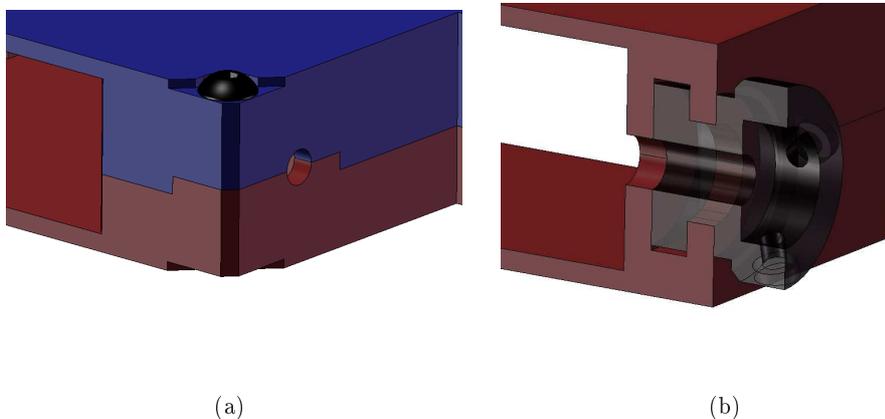


Figura 2.4: Representação da geometria das estruturas dos diversos módulos: ligação da estrutura (a), fixação de componentes à estrutura(b).

Devido ao processo de fabrico das peças passar por uma fase de maquinagem, a espessura mínima aconselhada para as paredes verticais é de 3 a 4mm.

### Encaixe de Módulos

Uma vez que cada unidade é formada por dois módulos, foi necessário estabelecer a forma e ligação entre os dois. Essa ligação deve permitir a troca e a montagem dos módulos comple-

tamente montados, da forma ilustrada na figura 2.2.

Visto o módulo base desempenhar, entre outras, a função primordial de blindagem, a parede interior da estrutura funciona automaticamente de limite aos módulos de função. De forma a condicionar os restantes movimentos e servir de guiamento na montagem dos módulos de função foram criadas guias, tal como mostra a figura 2.5 (a) e (b). Para além das guias, foi criada na estrutura uma zona de encaixe com furos de guiamento. A ligação eléctrica entre o módulos é assegurada por conectores do tipo SUB de nove vias. O correcto fecho dos conectores é assegurado pelo guiamento do módulo. A figura 2.5 (b) representa os conectores de sinal utilizados entre os módulos. De forma a reduzir o custo de fabrico do protótipo, foram utilizados conectores DB9 (ou SUB 9) para a ligação de sinal.

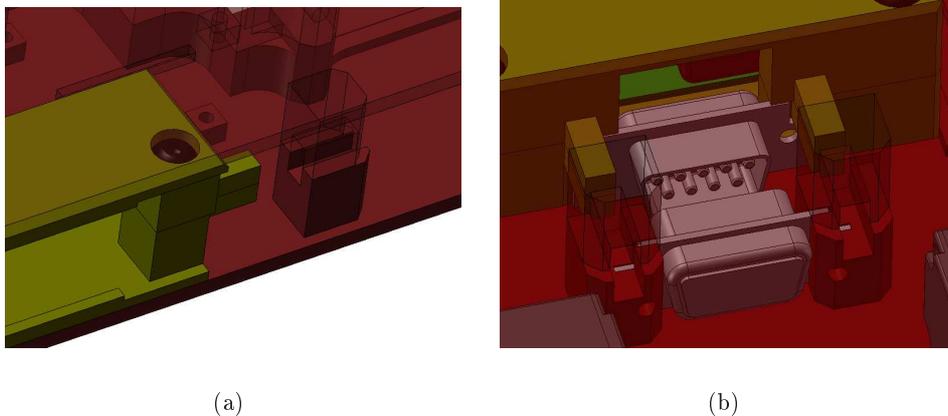


Figura 2.5: Representação do encaixe dos módulos de função: **guias** de guiamento (a), conector de sinal(b).

## Motores

Dadas as necessidades de navegação em terreno irregular, a fonte de energia mecânica é uma componente de elevada relevância no projecto. Contudo, dadas as necessidades de transporte e funcionamento do protótipo, é necessário manter as dimensões e a massa reduzida. Desta forma, a escolha dos motores a serem utilizados passou por optar de entre motores de corrente contínua, motores passo a passo sem escovas ou servomotores.

Destas 3 alternativas optou-se pela utilização de servomotores alterados para funcionamento em rotação contínua [8]. Foi escolhida esta alternativa uma vez que os servomotores têm um binário grande quando comparado com a sua dimensão e o seu peso. Proporcionam ainda facilidade de controlo de velocidade e de sentido de rotação. Além disso, dada a existência de inúmeros modelos de servomotores com características diferentes com um encapsulamento com as mesmas dimensões, é possível a substituição dos motores utilizados sem qualquer alteração ao restante projecto. Por fim, a utilização deste tipo de motores é também a solução economicamente mais viável.

Existindo no entanto vários tipos de encapsulamento, optou-se pela utilização de servomotores de tamanho standard: 40x20x35mm. Esta decisão foi tomada baseada no facto de ser a medida que oferece maior número de alternativas ao servomotor a utilizar. Para além disso, é ainda o encapsulamento dos servomotores com menor custo. A utilização de servomotores de

menores dimensões não é invalidada, apesar de necessitar do desenho de uma componente de adaptação.

## Tracção

De forma a permitir a melhor adaptação possível ao terreno, estudou-se a utilização de pernas ou lagartas. A utilização de rodas não foi estudada, uma vez que não é tão propícia aos objectivos propostos.

Foi estudada a possibilidade de utilização de pernas, baseadas no funcionamento das pernas de um centípede. Contudo, apesar da solução potencializar uma muito boa adaptabilidade às irregularidades, seria mecanicamente mais complexa e teria uma grande exigência de energia.

Desta forma, visto ter também sido posto de parte o uso de rodas, optou-se pela implementação de um sistema de lagartas. De forma a diminuir os custos do projecto, foram utilizadas como lagartas correias de transmissão síncronas com dentado recto em uma fase (série XL). Pretendeu-se com isto utilizar o dentado das correias como rasto das lagartas, de forma a aumentar a tracção. O lado liso das correias seria guiado por rodas (polias). Em caso de escorregamento entre as correias e as polias, poderão ser utilizadas correias de dentado em dupla face (série DT XL), rodando sobre polias dentadas.

## Materiais

Dadas as diferentes necessidades mecânicas para as diversas componentes, foram utilizados diferentes materiais, poliméricos e metálicos, nas peças construídas.

Foi utilizado polietileno de alta densidade, com uma densidade de  $0,96g/cm^3$ , um módulo de elasticidade de  $1,07GPa$  e tensão de cedência de  $29MPa$ . A temperatura de operação do material varia entre os  $-100$  e  $80^{\circ}C$ . Com este material, conseguem-se peças com peso reduzido, sendo também impermeáveis, dieléctricas e isolantes. Tem ainda boa resistência ao desgaste e ao impacto. Têm ainda a vantagem de ter um custo reduzido e de ser facilmente maquinável. O polietileno é ainda disponível em diversas cores, sem influenciar as suas características mecânicas.

Empregou-se ainda uma poliamida, tendo sido escolhido o Ertalon 6 PLA. Este polímero tem uma densidade de  $1,15g/cm^3$ , um módulo de elasticidade de  $3,5GPa$  e uma tensão de cedência de  $85MPa$ . O ponto de fusão deste polímero é  $220^{\circ}C$ , sendo também isolante e impermeável. Esta poliamida tem boa resistência ao desgaste e ao envelhecimento térmico. Caracteriza-se ainda por ter uma fácil maquinação.

Utilizou-se ainda uma liga de alumínio - cobre, série 2030-T4, com um módulo de elasticidade de  $72,5GPa$  e tensão de cedência de  $295MPa$ . Apesar de consideravelmente mais resistente que os polímeros utilizados, o alumínio tem uma densidade de  $2,82g/cm^3$  o que o torna inadequado para algumas peças de maiores dimensões. A liga de alumínio utilizada tem um ponto de fusão entre os  $510$  e  $640^{\circ}C$ . A escolha desta liga deve-se ao facto de ser fornecida em varão maciço e ser utilizada principalmente para peças de revolução.

Foram ainda utilizados outros materiais no fabrico de componentes específicos. Os materiais cuja selecção é relevante para o projecto são apresentados juntamente com as componentes.

### 2.2.1 Módulo Base

O módulo base é a plataforma transversal a todas as unidades. Como referido, é constituído por uma estrutura onde são montados 2 motores, o sistema de locomoção por lagartas e o

encaixe dos módulos de função. A figura 2.6 representa o módulo de base desenvolvido. Este módulo requer a utilização de duas placas de circuito impresso, estando preparado para a adição de outras 2 placas com as mesmas medidas.

As dimensões principais do módulo base são de 160 x 160 x 32mm, tendo as rodas um diâmetro de 62mm. Visto as lagartas terem uma espessura de 2mm, a altura do módulo ao solo é de 17mm.



Figura 2.6: Imagem foto-realística do módulo base.

Ao necessitar de uma estrutura leve e ao mesmo tempo resistente, optou-se pela utilização de materiais poliméricos, tendo sido utilizado o polietileno anteriormente referido. Apesar de não ser o material mais indicado para um robô de busca e salvamento, principalmente devido ao baixo ponto de fusão, esta opção foi tomada para o protótipo devido ao baixo custo associado ao material. Embora o seu módulo de Young seja baixo (cerca de 70 vezes menor que o alumínio), a utilização deste polímero foi validada por simulação numérica. Os resultados mostraram resistir a carregamentos de 600N segundo o eixo vertical e a tracção de 300N segundo o eixo longitudinal, com coeficiente de segurança mínimo de 1.2. Os resultados dos testes de elemento finitos encontram-se no apêndice A. De notar que a maior deformação no carregamento vertical ocorre na área de encaixe dos módulos de função que será reforçada pela sua estrutura.

A estrutura completa do módulo base tem uma massa inferior a 200g. Uma vez que esta é a componente mais pesada, a massa total de uma unidade é, com factor de segurança, inferior a 1kg. O centro de massa aproxima-se do centro geométrico, logo a uma distância de 33mm da superfície de contacto das lagartas, independentemente da orientação da unidade. Assim, para que os motores sejam capazes de locomover a unidade em qualquer ângulo, o seu binário deverá ser igual ou superior a  $3,3\text{kgf.cm}$ . Assim, optou-se pela escolha dos servomotores da Futaba S3003, com um binário de  $3,2\text{kgf.cm}$  a 4.8V e  $4,1\text{kgf.cm}$  a 6V. Sendo utilizados 2 motores, o binário mínimo transmitido ao solo é de  $6,4\text{kgf.cm}$ . A velocidade de rotação dos servomotores é de  $0,23\text{s}/60^\circ$  o corresponde a uma velocidade da unidade de  $150\text{mm/s}$ . Estes foram alterados para funcionarem em rotação contínua.

O módulo base é equipado com uma secção de distribuição de energia e uma secção de gestão de unidade. Estas são responsáveis pela distribuição da energia consumida pela unidade e controlo dos sensores a bordo. A descrição destas unidades electrónicas encontra-se na secção 2.3.3. A estrutura do módulo tem ainda pontos de fixação para circuitos electrónicos, permitindo assim a adição de novas funções.

## 2.2.2 Rodas

A primeira fase do desenho das rodas foi a selecção do seu diâmetro. Uma vez que se pretendiam utilizar correias de transmissão, foi necessário adaptar o diâmetro das rodas e distância entre eixos de forma a poder utilizar as correias disponíveis no mercado. O comprimento da correia a utilizar é igual ao perímetro das rodas mais duas vezes a distância entre eixos. Após estudar diversas alternativas, optou-se por utilizar rodas com 62mm de diâmetro com uma distância entre eixos de 105,6mm, utilizando correias 160XL com 406,40mm de comprimento e 20mm de largura.

Como referido, um dos conceitos a estudar no projecto é a utilização de rodas deformáveis com a função de amortecimento e segurança passiva. De forma a que as rodas assegurem a função de segurança passiva, é necessário que a sua deformação (excentricidade) para uma carga crítica ao eixo seja igual à altura ao solo. Isso faz com que uma sobrecarga sobre uma unidade leve ao apoio da estrutura no solo, aliviando a carga nos seus eixos. Desta forma, determinou-se que uma carga de 50N deveria provocar um deslocamento de 17mm do eixo da roda. Contudo, uma vez que as rodas têm a função de polias para a utilização de lagartas, estas têm de manter uma superfície exterior cilíndrica. Para além disso, as rodas têm ainda de permitir a ligação a um eixo, ou directa aos motores. A figura 2.7 (a) representa uma roda do protótipo.

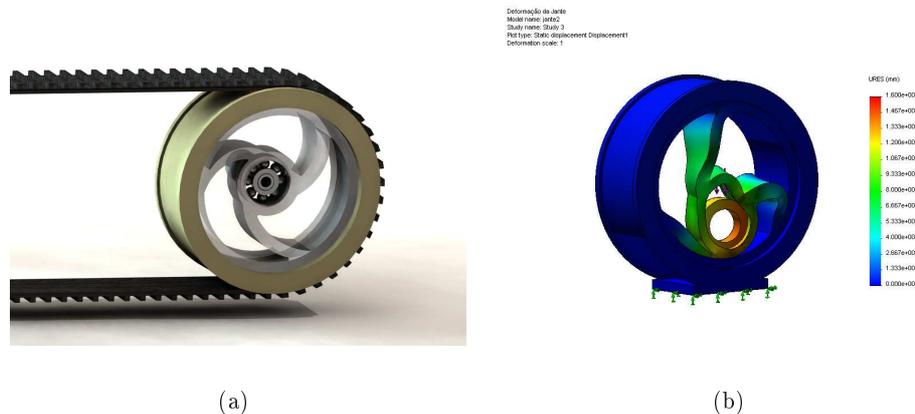


Figura 2.7: Representação das rodas e sistema de tracção: Imagem fotorealística de uma jante com lagarta de tracção (a), Deslocamentos calculados pelo método dos elementos finitos mediante uma carga axial de 50N (b).

De forma a conseguir o comportamento pretendido, as rodas foram divididas em três partes: aro, jante e centro. O aro tem a função de garantir a forma exterior cilíndrica da roda, permitindo a interacção com as correias. A jante tem a função de deformar, provocando uma excentricidade entre o aro e o eixo. O centro tem o objectivo de ligar a um eixo ou a um

motor.

Para o aro das rodas, optou-se pelo uso da poliamida anteriormente referida, uma vez que é um componente sujeito a elevada fadiga causada pelo contacto com o solo. Para além disso, esse material é fornecido em tubo, com dimensões aproximadas das pretendidas, minimizando o material removido e o tempo de maquinagem. O aro, para além de ser a parte exterior rígida da roda, serve de guia às correias através de entalhes.

O centro é também rígido, existindo dois tipos diferentes. Para a ligação a um motor utiliza-se um disco em alumínio. Para a ligação a um eixo livre utiliza-se um rolamento. A ligação entre o centro e a jante, tal como entre a jante e o aro, é colada, sendo utilizado um epóxico para essa interface.

A jante é a componente flexível, sendo feito em silicone VTV 750 com endurecedor CAT 750. Este material tem uma rigidez de  $4\text{MPa}$  permitindo deformação com cargas baixas. Para além disso, tem uma tensão de cedência de  $6,5\text{MPa}$ , correspondendo a uma deformação de 350% à ruptura. Para além disso, é formado pela junção de dois líquidos, facilitando o fabrico de geometrias complexas em moldes. A densidade deste material é de  $1,08\text{g/cm}^3$  e é caracterizado por um aspecto semi translúcido.

O desenho da jante foi conseguido através de uma iteração de simulações numérica pelo método dos elementos finitos e re-desenhos. No entanto, dada a natureza do fabrico das jantes, seria impossível o uso de espessuras muito reduzidas. O desenho final, apresentado na figura 2.7 (a) foi o resultado final. O deslocamento do eixo é conseguido associando a extensão com a torção do material. A figura 2.7 (b) representa os resultados dos deslocamentos obtidos por análise de elementos finitos para a roda sujeita a uma carga axial de 50N. Pela análise dos resultados verifica-se que o centro da roda sofre um deslocamento de cerca de 15mm, sendo a deformação máxima da jante inferior a 75%. Para além disso, a deformação máxima do aro é inferior a 0,5% em todos os pontos, pelo que se pode considerar que a sua forma não é alterada. No anexo A encontram-se resultados de alguns desenhos estudados antes da versão final.

### 2.2.3 Acoplamento

O acoplamento entre as unidades é o elemento mais importante do protótipo. Este permite que as unidades simples assumam um comportamento conjunto de forma a superar o objectivo pretendido. Como descrito, a utilização de uma junta universal permite duas rotações e a sua montagem permite um terceiro grau de liberdade. A figura 2.8 (a) representa o funcionamento do acoplamento desenhado. A tracção dos cabos, assinalada pelas setas a vermelho e verde, permitem a actuação da rotação do acoplamento assinalada pela seta azul. Possibilita-se assim cumprir o propósito representado na figura 2.8 (b).

Uma vez que é permitida a rotação das unidades segundo um eixo longitudinal ao protótipo, pode ocorrer inversão de uma unidade em relação ao outra. Para o sistema de cabos poder ser utilizado nessa situação, foi desenhada uma peça rotativa sobre um rolamento axial, mantendo assim a orientação dos cabos mediante inversão da unidade.

De forma a poder actuar a junta através do acoplamento desenhado, é importante saber qual a força de tracção necessária. O diagrama da figura 2.9 permite calcular a força necessária para a elevação de duas unidades. O diagrama representa o início da elevação, uma vez que é o momento em que a força necessária é superior.

Para calcular a força de tracção representada por  $F$  estabelece-se um equilíbrio de momentos:

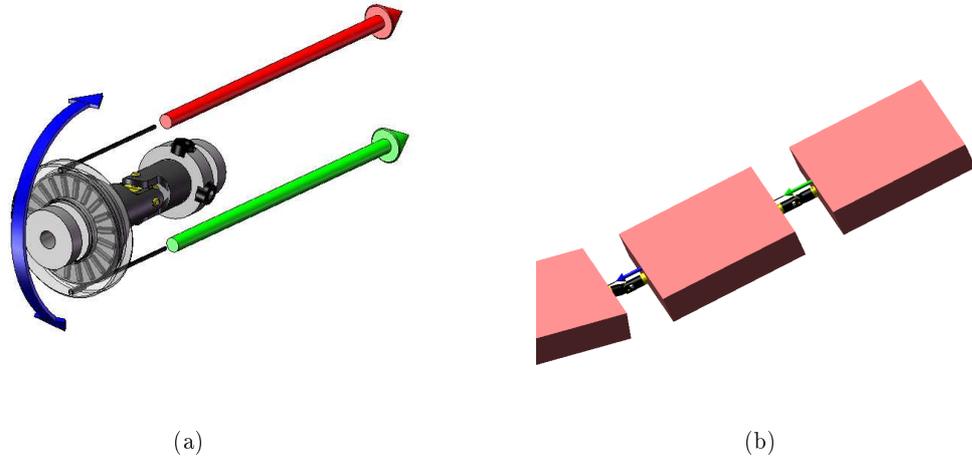


Figura 2.8: Acoplamento entre unidades: representação esquemática do acoplamento. (a), representação da elevação de unidades(b).

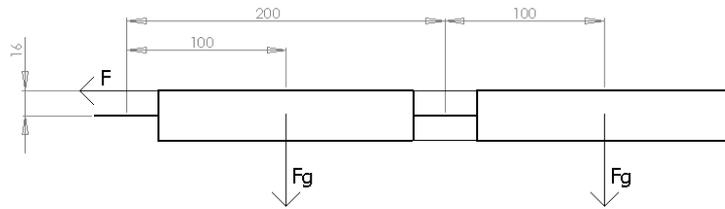


Figura 2.9: Diagrama de forças para a elevação de duas unidades.

$$\begin{aligned}
 F.16 &= Fg.100 + Fg.(100 + 200) \\
 F &= 25.Fg
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Visto a massa máxima de uma unidade ser de 1kg, o peso é de cerca de 10N ( $Fg = 10N$ ). Assim, a força de tracção no cabo para a elevação de duas unidades é de 250N. No apêndice A encontram-se os resultados da análise numérica da estrutura do acoplamento sujeita a um carregamento de 300N, tendo um coeficiente de segurança mínimo de 1,2.

De realçar que, para permitir a elevação de unidades, é necessário que a massa atrás do ponto de rotação seja superior à massa das unidades elevadas. Para que seja possível actuar um acoplamento de forma eficaz é necessário que o centro de massa do robô seja atrás do mesmo. Assim, utilizando um número ímpar de unidades é possível elevar metade truncada e utilizando um número par de unidade é possível elevar metade menos uma unidades. De modo a que seja possível elevar metade das unidades do robô com número par de unidades, utiliza-se um módulo de lastro em último lugar.

## 2.2.4 Módulos de Funções

Apesar de existirem diversos módulos de função, uma vez que requerem o mesmo encaixe no módulo base, todos têm estrutura similar. As dimensões exteriores dos módulos são de 90 x 65 x 26 mm, expandindo-se para 100mm de comprimento no encaixe representado na figura 2.5. No entanto, uma vez que cada módulo requer diferentes componentes, a estrutura interna difere.

A estrutura dos módulos de função é também feita em polietileno de alta densidade. A utilização do mesmo material simplificou o fabrico, uma vez que o processo de produção é o mesmo. Para estes módulos optou-se pelo uso da cor amarela, de forma a obter um grande contraste com o módulo base.

### Módulo Master

O módulo master é responsável pelas comunicações entre o operador e o robô, através de uma comunicação wireless por XBee. Para além disso, este módulo carrega ainda uma câmara de vídeo "wireless", dispositivo de comunicação audio e iluminação. A figura 2.10 representa o módulo master. Uma vez que o funcionamento deste módulo depende principalmente da electrónica, será descrito na subsecção seguinte. Contou-se ainda com o dimensionamento da placa de circuito impresso como suporte para a maioria das componentes deste módulo.

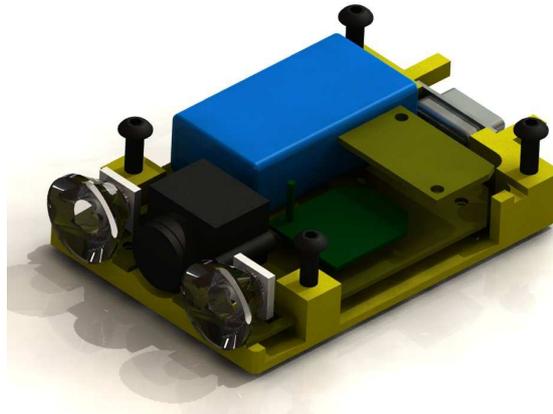


Figura 2.10: Imagem foto-realística do módulo master.

### Módulo Slave

O módulo slave, representado na figura 2.11, é responsável pela elevação dos módulos à sua frente. Para isso utiliza um veio como roldana para traccionar os cabos do acoplamento. Este módulo é equipado com um servomotor responsável pela actuação do veio. São utilizados duas engrenagens cónicas para a transmissão entre o servomotor e o veio.

De forma a que o servomotor seja capaz de actuar o mecanismo de cabos do acoplamento, deve conseguir transmitir a força de 250N aos cabos. A utilização de uma relação de transmissão pelas engrenagens cónicas, juntamente com a transmissão com roldana permitem a utilização de um servomotor com um binário pouco elevado. Assim, optou-se pela utilização de um veio com 6mm de diâmetro. Para realizar a força de 250N com um braço de 3mm é

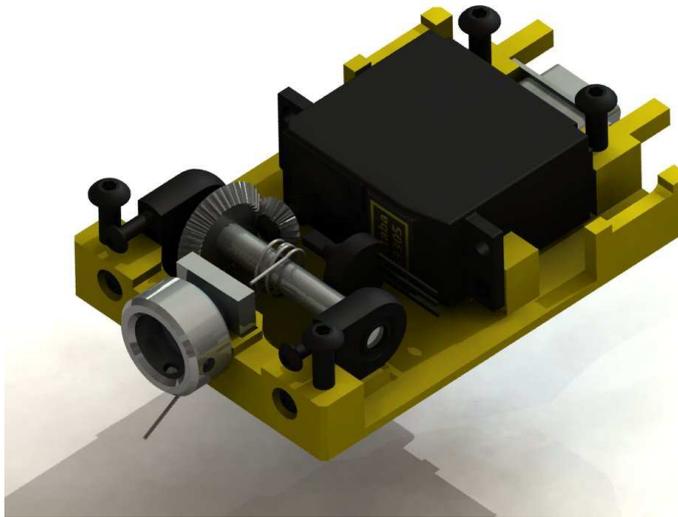


Figura 2.11: Imagem foto-realística do módulo slave.

necessário aplicar um binário de  $75N.cm$  ao veio. Para além disso, utilizou-se uma relação de transmissão de 1:1,5 nas engrenagens cónicas, com um pinhão de 16 dentes e uma coroa de 24 dentes. Desta forma, o binário necessário para actuar o acoplamento elevando duas unidades é de  $50N.cm$ , aproximadamente  $5kgf.cm$ .

De forma a operar com segurança, optou-se pelo uso do servomotor de dimensões standard Futaba S3305, com um binário de  $7,1kgf.com$  a  $4,8V$  e de  $8,9kgf.cm$  a  $6V$ . Estes servomotores alteraram-se de forma a que o fecho da sua malha de controlo seja feito pelo ângulo do acoplamento actuado.

### Módulo de Alimentação ou Lastro

O módulo de alimentação, ou lastro, tem como principais funções aumentar a autonomia do robô e recuar o centro de massa do protótipo. A utilização deste módulo no robô com um número par de unidades é essencial para a elevação de metade das suas unidades. Em qualquer utilização tem a função do aumento de autonomia do robô, permitindo também a ligação para alimentação por cabo.

Para além disso, a estrutura do módulo de lastro está também equipada com furos para fixação de placas de circuito impresso. Desta forma, a mesma estrutura pode também ser utilizada para o desenvolvimento e adição de novas funcionalidades.

## 2.3 Projecto Electrónico

Apesar de a componente mecânica ter grande relevância no projecto, as componentes eléctricas e electrónicas são fulcrais para o seu funcionamento. Para poder ser controlado remotamente, o protótipo requer alguns recursos. Além disso, para operar o robô é indispensável ter controlo sobre todas as suas componentes, tendo sido desenvolvidas algumas placas de circuito impresso. As diversas componentes necessárias para o funcionamento do protótipo são:

- baterias,
- comunicações,
- secção de distribuição de energia,
- secção de gestão de unidades,
- secção de comunicação e navegação.

### 2.3.1 Baterias

Para poder operar de forma autónoma, é necessária a utilização de baterias. Desta forma, são utilizados dois tipos de bateria. Para os módulos base são necessárias baterias com dimensões máximas de  $50 \times 45 \times 25 \text{ mm}^3$  e uma massa inferior a 150 g. Essas baterias devem suportar os circuitos eléctricos do módulo base e 2 servomotores. Devem ainda suportar a energia requerida pelos módulos de função, ou seja, um terceiro servomotor ou um módulo de comunicações XBee e iluminação. Para o módulo de lastro as baterias devem ter dimensões inferiores a  $80 \times 60 \times 24 \text{ mm}^3$ . Todas as baterias devem ser recarregáveis e ter um custo reduzido.

De forma a alimentar os servomotores e os circuitos, a tensão deve ser igual ou superior a 5V. A carga das baterias deve ainda permitir a operação do protótipo por períodos de uma hora. Além disso, a sua taxa de descarga deve suportar o funcionamento de todas as componentes em simultâneo.

O maior consumo de energia ocorre nas unidades em funcionamento como slave. Admitindo um consumo de 500 mA pelo circuito do módulo base, um consumo de 500 mA a uma taxa de 95% pelos motores de locomoção e um consumo de 1000 mA a uma taxa de 20% pelo servomotor de inclinação, o consumo total equivalente do módulo é de 1650 mA.

As baterias dos módulos base devem permitir operar autonomamente durante um período mínimo de 20 minutos, logo devem ter uma carga superior 550 mAh. Utilizando um módulo de lastro em cada 4 unidades, de forma a aumentar a autonomia para 1 hora, as baterias do módulo de lastro devem poder alimentar 4 unidades (6600 mA) durante 40 minutos. Assim, devem ter uma carga igual ou superior a 4400 mAh.

De forma a reduzir o custo das baterias, optou-se por utilizar baterias recarregáveis de NiMh. Para os módulos base, 4 baterias tamanho AAA de 1,25 V e 1100 mAh, com uma capacidade de descarga superior a 10 A. Ligadas em série ocupam um volume de  $45 \times 42 \times 10,5 \text{ mm}^3$  e têm uma massa inferior a 60g. Os módulos de lastro utilizam 8 baterias de tamanho AA de 1,25 V e 2700 mAh, com capacidade de descarga de 10A. Dois conjuntos de 4 baterias em paralelo ocupam um volume de  $58 \times 55 \times 24 \text{ mm}^3$  e uma massa superior a 200 g.

### 2.3.2 Comunicações

Como referido, as comunicações sem fios entre o operador e o robô são feitas através de módulos de XBee. Estes módulos permitem comunicar através do protocolo ZigBee, sendo a comunicação feita por linha série (RS232). A figura 2.12 representa um módulo utilizado.

Este módulo de comunicações permite um alcance até 30m em ambiente interior e até 100m em espaço aberto, com uma taxa de transferência de 250kbps. O módulo utilizado pode ser substituído pelo modelos superiores permitindo alcances até 370m em interior e 9,6km no exterior. Contudo, os módulos de maior alcance têm restrições legais de utilização em determinadas regiões, estando a Europa limitada ao uso de um módulo com alcance de até



Figura 2.12: Módulo de comunicação XBee.

100m em interior e 1,6km no exterior. Visto a comunicação com o módulo de XBee ser feita por linha série, estes também podem ser substituídos por uma comunicação por cabo.

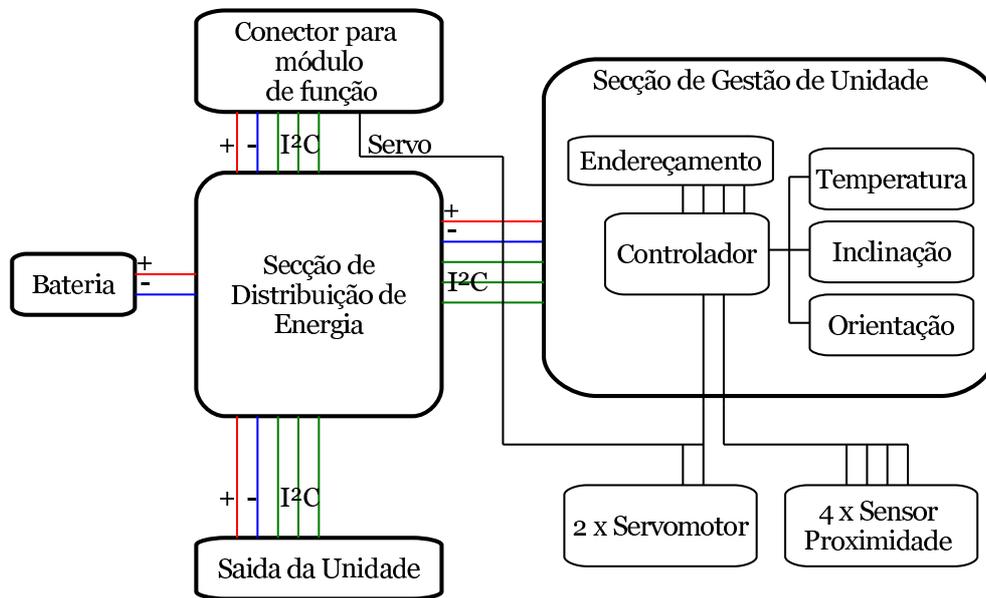
Uma vez que o robô é constituído por várias unidades, é também necessário estabelecer a comunicação entre as mesmas. Esta comunicação é feita através do protocolo I<sup>2</sup>C, sendo o módulo equipado com o XBee o master dessa comunicação e todos os restantes módulos slaves. O uso do protocolo I<sup>2</sup>C, permite a adição de unidades ao protótipo, tendo cada uma um endereço próprio. Uma vez que cada unidade tem um endereço manual o número máximo de unidades para o robô é de 16. No entanto, é reservada uma linha de forma a potencializar o endereçamento automático das unidades, permitindo uma maior expansibilidade. A transmissão de dados entre as unidades é feita por um cabo coaxial, minimizando a probabilidade de ocorrência de erros.

### 2.3.3 Diagramas de Funcionamento

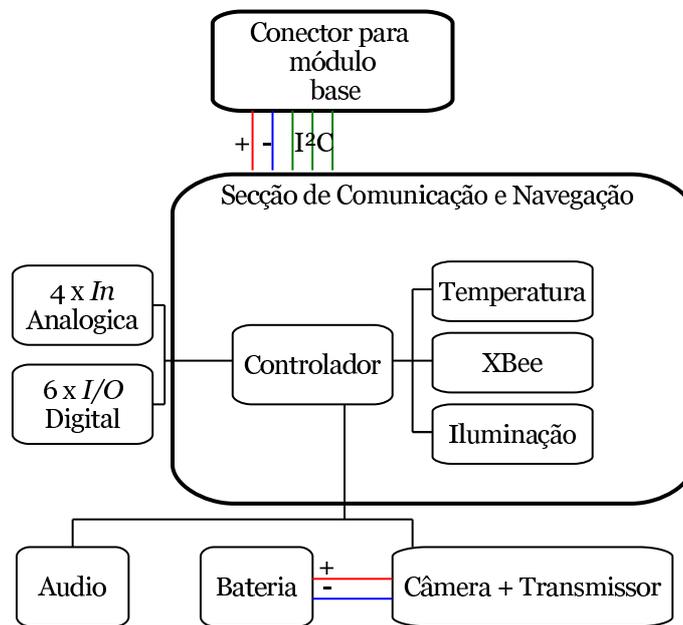
De forma a operar o robô, cada unidade deve ser capaz de controlar os seus motores e monitorizar os seus sensores e comunicações. O módulo base, comum a todas as unidades, é equipado com uma secção de distribuição de energia e uma secção de gestão de unidade. O módulo maser é equipado com uma secção de comunicação e navegação. Os módulos de lastro e slave não são equipados com circuitos, sendo passivos ou comandados pelo módulo base.

A secção de distribuição eléctrica permite estabelecer a ligação entre a energia das baterias com uma linha comum a todas as unidades. Cumpre também a função de distribuição e regulação de energia para os diversos componentes de uma unidade, quer a 5V como a 3.3V. Para além disso, a secção de distribuição de energia estabelece também a ligação entre a linha de comunicação I<sup>2</sup>C e um módulo.

A secção de gestão de unidade, para além de controlar os componentes do módulo base, permite ainda o controlo de uma componente externa. Isso é utilizado para o controlo do servomotor no módulo slave. O diagrama da figura 2.13 (a) representa o funcionamento das secções de distribuição de energia e de gestão de unidade. A secção de gestão de unidade está equipada com sensor de temperatura, de inclinação e de orientação. O sensor de inclinação permite saber se a unidade está em subida ou descida e o sensor de orientação permite distinguir o funcionamento normal do invertido. Para além disso, a monitorização de até quatro sensores de proximidade permite a navegação autónoma das diversas unidades em função da trajectória da primeira. A secção 2.4.3 resume a forma de navegação autónoma das unidades.



(a)



(b)

Figura 2.13: Diagrama de funcionamento das secções electrónicas do robô: secção de distribuição de energia e gestão de unidade (a), secção de comunicação e navegação (b).

A secção de comunicação e navegação apenas é associada ao módulo master. O diagrama da figura 2.13 (b) representa o funcionamento desse circuito. Esta unidade permite a comunicação com o robô através do módulo XBee. Através dessa comunicação é possível controlar a utilização da camera e da iluminação. A placa de comunicação e navegação permite ainda a adição de até 4 sensores analógicos e 6 entradas ou saídas digitais.

### 2.3.4 Circuitos Impressos Dedicados

Sabendo as necessidades de cada módulo, foram desenhados os circuitos electrónicos para o protótipo. Os circuitos projectados encontram-se no apêndice B.

Após desenhados os circuitos, foi necessário desenhar as placas de circuito impresso. De forma a minimizar o custo da impressão, foi juntado mais que um circuito na mesma placa. Essa distribuição foi feita de forma a que a separação possa ser feita por cortes longitudinais em toda a dimensão ou ortogonais exteriores. Desta forma, seria possível separar os diversos circuitos utilizando uma guilhotina de canto. De forma a facilitar ainda mais a separação as diversas partes das placas, foram criados percursos de maquinagem, deixando as placas ligadas por uma pequena quantidade de material. Assim, numa placa juntou-se o circuito de gestão de energia, o circuito de gestão de unidade e 4 circuitos para o sensor de proximidade. Visto estes circuitos serem todos destinados ao módulo base são sempre necessários na mesma quantidade. Numa segunda placa foi impresso o circuito do módulo master, tendo sido dividido de forma a permitir a sua disposição pelo volume do módulo. As figuras 2.14 (a) e (b) representam os circuitos impressos. A área azul turquesa é a região a ser maquinada para a separação das placas. No anexo B encontram-se as mesmas figuras mais detalhadas.

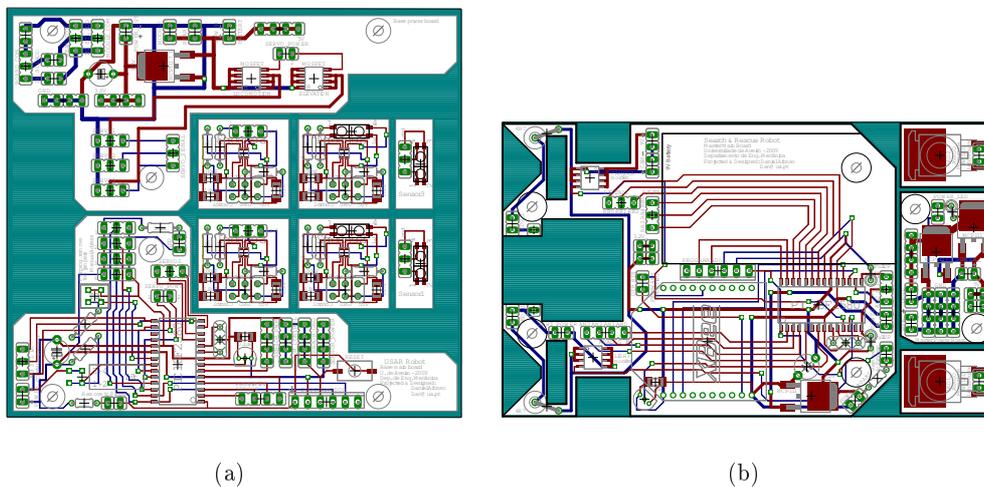


Figura 2.14: Placas de circuito impresso: circuitos para módulo base (a), circuitos para módulo master(b).

A maioria dos componentes electrónicos utilizados é de montagem superficial de forma a conseguir placas de menores dimensões. Os componentes de montagem superficial foram soldados utilizando pasta de solda e pistola de ar quente. Os restantes componentes foram soldados utilizando um ferro com ponta fina.

## 2.4 Software

### 2.4.1 Protocolo de Comunicações

Através de uma mensagem estruturada enviada para o master é possível estabelecer conexão entre o operador e qualquer unidade. Desta forma, é possível controlar e monitorizar todo o robô. Como referido, a comunicação entre o operador e a unidade master é feita por uma comunicação linha série RS232 e a comunicação entre a unidade master e as restantes é feita por I<sup>2</sup>C.

Uma vez que a comunicação entre as unidades é realizada por I<sup>2</sup>C, e o endereçamento das mesmas é manual, o protocolo de comunicações permite a operação de um máximo de 16 controladores. O módulo master faz a ligação entre a comunicação linha série e a comunicação I<sup>2</sup>C, estabelecendo assim uma ponte entre o operador e o destinatário da mensagem enviada.

O protocolo de comunicações desenvolvido baseia-se numa estrutura de 2 *bytes*. O primeiro *byte* define o tipo de mensagem e o endereço de destino. O segundo *byte* contém a informação a ser transmitida. O modo de funcionamento principal do protótipo é por pedido (*request mode*), podendo também ser utilizada uma transmissão contínua (*continuous mode*).

A tabela 2.1 resume a mensagem de pedido do funcionamento nesse tipo de modo. A tabela 2.2 resume a mensagem de resposta ao pedido realizado pelo operador. No modo de funcionamento contínuo, é enviada uma mensagem do mesmo tipo da resposta do modo de funcionamento por pedidos.

Tabela 2.1: Protocolo de comunicações: mensagem de pedido

Byte	Bit	Função	Valor
byte 0	bit 0	tipo de pedido	0 - pergunta 1 - comando
byte 0	bit 1 a 4	endereço de unidade	0000 (0) - primeira unidade 0001 (1) - segunda unidade 1111 (16) - última unidade
byte 0	bit 5 a 7	endereço do dispositivo	000 (0) - motor esquerdo 001 (1) - motor direito 010 (2) - motor elevação 011 (3) - sensor temperatura 100 (4) - sensores de inclinação/orientação 101 (5) - sensores de proximidade 110 (6) - alteração do modo de funcionamento 111 (7) - reservado
byte 1	bit 0 a 4	valor do comando	
byte 1	bit 5 a 7	indicação de byte 1	111

Tabela 2.2: Protocolo de comunicações: mensagem de resposta

Byte	Bit	Função	Valor
byte 0	bit 0 a 7	verificação de pedido	byte 0 do pedido
byte 1	bit 0 a 4	valor do resposta	
byte 1	bit 5 a 7	indicação de byte 1	111

### 2.4.2 Controle do Robô

Sendo o funcionamento do robô tele-autônomo, o controle do mesmo é dividido pelo operador e pela gestão dos seus sensores.

O controle da primeira unidade do robô e da actuação das juntas é feito pelo operador a partir de um computador ligado a um módulo de XBee. Este troca mensagens automáticas com o robô utilizando o protocolo referido. Para isso, o protocolo de comunicação é transparente para o operador, sendo a navegação feita através do teclado. De futuro planeia-se adicionar o controle através de *joystick*.

O controle das restantes unidades é feito de forma autónoma, por um comportamento de imitação do módulo à frente. Para além disso a detecção de pequenos obstáculos possibilita uma navegação mais facilitada para o operador. A secção seguinte indica a forma de funcionamento dos sistemas de autonomia do robô.

### 2.4.3 Autonomia de Navegação

Uma vez que o controle do robô é tele-autônomo, para além do controle pelo operador existem sensores de ajuda à navegação.

#### Navegação Autónoma das Unidades Posteriores

O acoplamento entre as unidades utiliza uma junta universal. Essa articulação permite duas rotações em torno de um ponto. Como referido, é dessa forma que se obtém a rotação em torno dos eixos transversal e vertical do acoplamento.

A variação do ângulo de rotação em torno do eixo transversal ocorre quando da actuação do acoplamento. A variação do ângulo em torno do eixo vertical ocorre em situação de curva. De forma a que as unidades à retaguarda possam navegar autonomamente é útil monitorizar os ângulos de rotação da junta do acoplamento, principalmente da rotação em torno do eixo vertical.

Foram estudadas duas formas para a determinação do ângulo da junta. Uma das formas envolvia a emissão de um cone de luz infravermelha por uma unidade e a detecção dessa luz em pontos específicos da unidade atrás. A figura 2.15 representa o sistema estudado. Apesar de permitir determinar ambos os ângulos da junta universal do acoplamento, esta forma não era muito precisa uma vez que dependia do terceiro grau de liberdade e não o contemplava. Além disso necessitava de um circuito de controle que ocuparia um grande número de entradas do microcontrolador.

Desta forma, abandonou-se o sistema de luz infravermelha para a navegação do robô. A medição das distâncias assinaladas pelas setas na figura 2.16 por sensores de proximidade permite determinar o ângulo em relação ao eixo vertical com a unidade em frente. Comparando as distâncias dos lados esquerdo e direito, torna-se possível determinar o ângulo da rotação referida. Este sistema apenas permite determinar o ângulo de rotação em torno do eixo vertical. Contudo, a determinação deste ângulo é praticamente independente dos restantes, dependendo apenas da orientação da unidade. Essa orientação é determinada através de um sensor de orientação. Além disso, a determinação deste ângulo é suficiente para a navegação e possibilita utilizar apenas três entradas do microcontrolador.

Conhecendo a orientação e o ângulo com a unidade da frente, é possível automatizar um comportamento de imitação, de forma a seguir-lo. Para isso, cada unidade navega de forma a aproximar a zero o ângulo com o módulo à sua frente. O sentido de rotação das rodas é

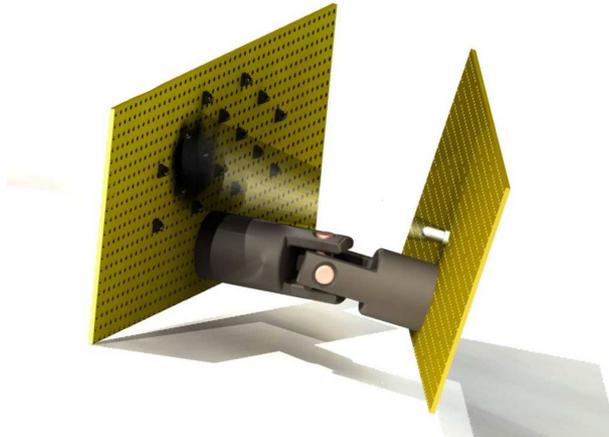


Figura 2.15: Representação esquemática da medição dos ângulos do acoplamento através de sistema de emissão e recepção de luz infravermelha.

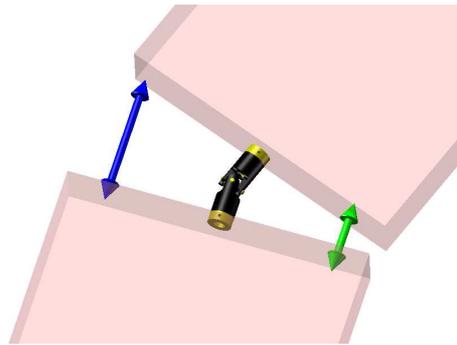


Figura 2.16: Representação esquemática da medição de distância para navegação.

determinado através da orientação. Esse comportamento provoca uma navegação e controlo mais simples para o operador.

### **Ultrapassagem Autônoma de Pequenos Obstáculos**

Uma vez que os sensores de proximidade estão montados nos módulos base, comuns a todas as unidades, estes também são utilizados para apoio à ultrapassagem de pequenos obstáculos.

A detecção de um objecto em ambos os sensores de proximidade da primeira unidade provoca o envio de uma mensagem de forma a actuar a junta do primeiro acoplamento. A perda de obstáculo por ambos os sensores provoca o envio de uma nova mensagem terminando a actuação da junta referida e inicializando a actuação da junta seguinte. Desta forma é possível ultrapassar pequenos obstáculos sem actuação directa das juntas por parte do operador.

De forma a melhorar este nível de autonomia, prevê-se adicionar sensores ao módulo master, de forma a implementar o algoritmo sugerido em [4]. Este prevê não só detectar obstáculos à frente do robô, mas também nas direcções oblíquas abaixo e acima. Desta forma, torna-se possível determinar um maior número de situações: terreno livre, espaço vazio em baixo, obstáculo ou ponto sem saída.

## 2.5 Fabrico, Construção e Montagem

Uma vez idealizado e concebido o projecto, foi construído um protótipo para realização de testes. Dada a diversidade dos tipos de componentes, foram utilizados vários processos de fabrico.

O desenho dos componentes mecânicos foi feito no *software* de CAD (*Computer Aid Design*) Solid Works. Para a simulação numérica foram utilizados os softwares de CAE (*Computer Aid Engineering*) Cosmos e Abaqus.

A maioria das componentes fabricadas foram maquinadas. As estruturas para os diferentes módulos foram maquinadas em CNC. Para isso, o percurso das ferramentas foi programado utilizando o *software* de CAM (*Computer Aid Manufacturing*) Power Mill e simulados e corrigidos utilizando o *software* CIMCO V5. As peças mais simples, nomeadamente para os eixos, acoplamentos e aros das rodas foram maquinadas em torno manual.

O fabrico das jantes das rodas foi feito por moldação de silicone. Foi utilizado um molde maquinado em CNC mediante um percurso realizado no mesmo *software* de CAM. Para a realização destas peças foi retirado o ar da mistura do silicone e endurecedor numa máquina de vácuo e foi feita a cura num forno, a cerca de 60°C.

Os circuitos electrónicos e respectivas placas foram desenhados no *software* de CAD Eagle. Foi também utilizado o mesmo *software* para a realização dos ficheiros *gerber* e *excellon* para impressão das placas de circuito, tendo sido testados no *software* Gerb Tool. Como referido, os componentes das placas de circuito impresso foram soldados com pasta de solda e ar quente e com ferro de soldar.

O apêndice C resume o fabrico de diversas componentes e o apêndice D a sua montagem.



## Capítulo 3

# Testes e Ensaaios

*Após a idealização do projecto e início da construção do protótipo realizaram-se alguns testes de forma a validar os conceitos utilizados. Para além dos testes mais simples, submete-se o protótipo a desafios de forma a avaliar a sua potencial prestação na realização de operações de busca e salvamento.*

---

### 3.1 Testes de Conceito

Após a construção do protótipo foram testados os diversos conceitos utilizados. O teste dos conceitos permite reeditar o projecto de forma a corrigir eventuais problemas. Para além disso, estes testes ajudam a antecipar o desempenho do protótipo na realização das tarefas que lhe serão propostas.

#### 3.1.1 Aspectos Construtivos

##### Estruturas (chassi)

A estrutura construída cumpriu as expectativas de suporte de componentes e blindagem. Contudo, principalmente devido ao material utilizado e ao processo de fabrico, surgiram diversos empenos prejudicando as tolerâncias dimensionais. A remoção de mais de 2/3 do material de um compósito leva à flexão do mesmo no sentido do material removido, uma vez que perde estabilidade estrutural. Essa deformação teve também como consequência um pior acabamento superficial da maquinagem.

Contudo, foi possível a correcção do defeito através de um tratamento térmico e aplicação de tensões de forma a corrigi-lo. Para além disso, foram adicionados dois parafusos de fixação, mantendo assim a geometria estrutural pretendida para o protótipo. Os mesmo parafusos servem de auxílio à fixação entre os módulos base e os módulos de função. No apêndice C apresentam-se fotografias relativas ao tratamento térmico e no anexo D apresentam-se fotografias relativas à fixação dos módulos de função.

No fabrico de novas peças estruturais, a fixação dos blocos será alterada. Em vez de uma fixação em prensa de maxilas, será utilizada uma fixação a uma placa plana através de parafusos ou fita adesiva de dupla face. Espera-se com essa forma melhorar as tolerâncias dimensionais das peças e os acabamentos de todas as superfícies.

### **Encaixe dos módulos**

A solução estudada para o encaixe dos módulos de função nos módulos base mostrou funcionar, embora tenha sofrido alguns melhoramentos. As calhas para guiamento dos módulos cumpriram a sua função, não existindo qualquer problema no encaixe. Foram apenas adicionados dois parafusos, referidos na subsecção anterior, tendo a função de bloquear a posição dos módulos de função. Este parafusos foram usados no ponto de fixação posterior dos módulos. De forma a isso ser possível para todos os módulos, mantendo o conceito de uma plataforma transversal, os furos de fixação posterior do módulo master foram alterados para a mesma posição dos restantes módulos de função (comparar figuras 2.10 e 2.11).

### **Motores**

A escolha dos motores levou a uma facilidade no controlo dos movimentos do robô. A alteração dos servomotores para rotação contínua é um processo rápido, sem aumento considerável do custo dos mesmos. Apenas foram utilizados motores de dimensões standard, não tendo sido estudada a adaptação para as dimensões inferiores.

A fixação dos servomotores na estrutura é um dos processos de montagem mais demorados, uma vez que é aparafusada. De forma a melhorar e tornar essa fixação mais rápida, tal como referido, a fixação dos servomotores passará a ser feita numa calha, da mesma forma indicada na figura 2.4 (b).

### **Acoplamento Entre Unidades**

Após o fabrico do acoplamento desenhado, foi encontrado um problema com a rotação segundo o grau de liberdade longitudinal. Era esperado que a fixação do acoplamento às estruturas do robô não impedisse a sua rotação. Contudo, para essa rotação ocorrer era necessário vencer uma grande força de atrito. Para que fosse possível a rotação livre segundo o eixo longitudinal verificou-se a necessidade de utilização de folgas. Porém, o uso de folgas na fixação poderia prejudicar a actuação da junta, não sendo assim uma alteração viável. Além disso, verificou-se que a rotação entre a peça de fixação do acoplamento e a peça rotativa tem um bom comportamento sem a utilização do rolamento axial, podendo este ser eliminado.

Desta forma, a fixação da junta universal foi alterada, sendo utilizada a peça rotativa destinada à actuação da mesma para a fixar. A figura 3.1 representa a nova fixação do acoplamento à estrutura. Para além disso passou a utilizar-se uma forma ortogonal na fixação posterior do acoplamento (fixação ao módulo de função). Assim, isolou-se toda a rotação segundo o eixo longitudinal num único ponto. Uma vez que esta alteração traz grandes melhoramentos ao funcionamento do robô, foi de imediato posta em prática, tendo sido abandonada a fixação anterior. Os parafusos de fixação da junta universal na peça rotativa servem também de fixação para os cabos de actuação da junta. No fabrico de futuros acoplamentos deverá optar-se pelo uso de uma forma ortogonal na fixação dianteira (fixação ao módulo base). Apesar de não trazer vantagens funcionais essa alteração facilita a obtenção de furos perpendiculares nas peças.

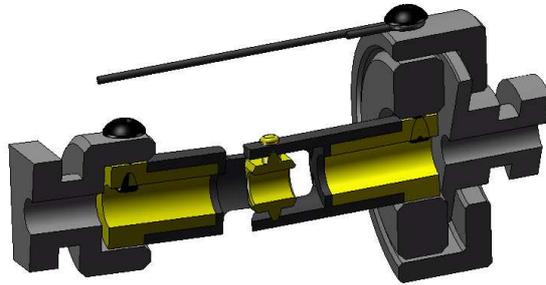


Figura 3.1: Representação esquemática do acoplamento entre unidades.

O redesenho do acoplamento permite a adição de um segundo par de cabos, permitindo actuar o segundo grau de liberdade da junta universal. Ao fazer isso, apenas ficaria livre a rotação segundo o eixo longitudinal do robô.

## Rodas

O comportamento geométrico das rodas desenvolvidas é o previsto, permitindo através de deformação elástica criar excentricidade entre o veio e o aro da roda. Contudo, a deformação das jantes prejudica o paralelismo entre o veio e o aro, sendo prejudicial para o guiamento das lagartas. Os testes do comportamento das rodas serão descritos na secção seguinte, bem como a proposta de resolução dos problemas encontrados.

Existiu apenas um problema com o fabrico das rodas, nomeadamente no fabrico das jantes em silicone. Uma vez que só foram maquinados dois moldes, apenas foram manufacturadas duas jantes de cada vez. Sendo a mistura do silicone e do endurecedor feita manualmente, utilizando uma balança com apenas 1g de resolução, existem algumas variações das proporções. Essas variações provocam algumas alterações nas características elásticas do produto final. Devido a isso, a deformação de diversas rodas, sujeitas à mesma carga, tem algumas diferenças. Para além disso, a geometria da roda leva a um comportamento dinâmico variado conforme a velocidade e sentido de rotação.

De forma a uniformizar o comportamento das quatro rodas de uma unidade deveria ser realizado um novo molde. Esse deveria ter cavidades para o fabrico de 2 pares de rodas simétricas em simultâneo. Dessa forma conseguir-se-ia o mesmo comportamento para as quatro rodas de cada unidade.

### 3.1.2 Aspectos Funcionais

#### Locomoção

O sistema de motorização e tracção desenhado para o robô é capaz de cumprir as necessidades de locomoção do robô. A fotografia da figura 3.2 mostra uma unidade equipada com um módulo master em movimento num plano inclinado. As rodas utilizadas não são as projectadas

inicialmente uma vez que provocaram alguns problemas. A subsecção seguinte refere alguns dos problemas causados.

O sistema de lagartas permite a uma unidade deslocar-se por inclinações laterais de até  $25^\circ$ . Permite ainda uma capacidade de subida de  $70\%$  ou  $35^\circ$  e uma capacidade de descida de  $58\%$  ou  $30^\circ$ . Para além da altura ao solo de  $17\text{ mm}$ , apesar de não ser possível submergir o protótipo, a capacidade de vau é de  $20\text{ mm}$ . De forma a poder submergir o robô é necessário torná-lo completamente impermeável, através da adição de borrachas de vedação. Por fim, dada a colocação das lagartas, o ângulo de ataque é superior a  $90^\circ$  e o ângulo de saída de  $30^\circ$ , sendo capaz de superar qualquer ângulo ventral. Os ângulos máximos determinados foram limitados pelo escorregamento das lagartas, e não por binário insuficiente. Assim, a operação do robô em terreno rugoso, com maior atrito com as lagartas possibilitará maiores ângulos de operação. A figura 3.3<sup>1</sup> representa os ângulos e outras medidas referidos.

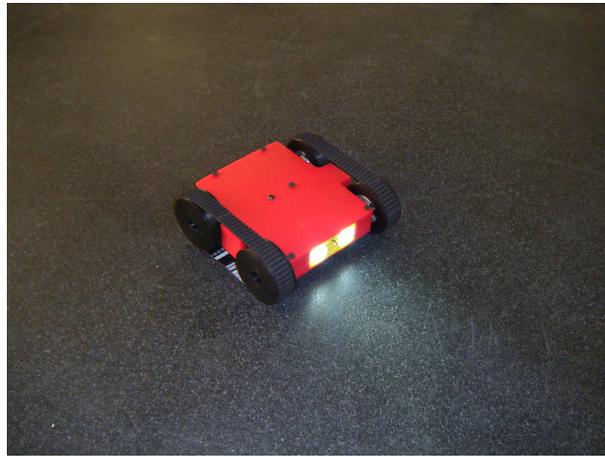


Figura 3.2: Fotografia de uma unidade em locomoção.

O acoplamento de diversas unidades não interfere com a mobilidade das mesmas, limitando apenas o ângulo de brecagem em cerca de  $30^\circ$ , levando a um raio de curvatura mínimo de cerca de  $500\text{ mm}$ . Isso acontece porque um ângulo de brecagem mais apertada provoca interferência das lagartas de duas unidades adjacentes. É possível reduzir o raio de viragem através da utilização de rodas de menor diâmetro, diminuindo no entanto a altura ao solo. O aumento do ângulo de brecagem também pode ser conseguido através do aumento do comprimento da junta do acoplamento, sendo no entanto necessário um maior binário para a elevação das unidades. Essas alterações poderão ser feitas após a realização em testes em ambientes reais, mediante as dificuldades encontradas.

Para além disso, através da detecção da orientação da unidade, conseguiu-se o mesmo comportamento independentemente da face voltada a cima. Teme-se apenas que o comportamento de uma unidade se altere quando estiver a ser elevada contra uma parede e ultrapasse o ângulo de  $90^\circ$ . De qualquer forma, caso essa falha se verifique, pode ser corrigida através de alterações no software.

---

<sup>1</sup>in: <http://www.volkswagen.pt/gama/touareg/highlights/offroad.shtml>

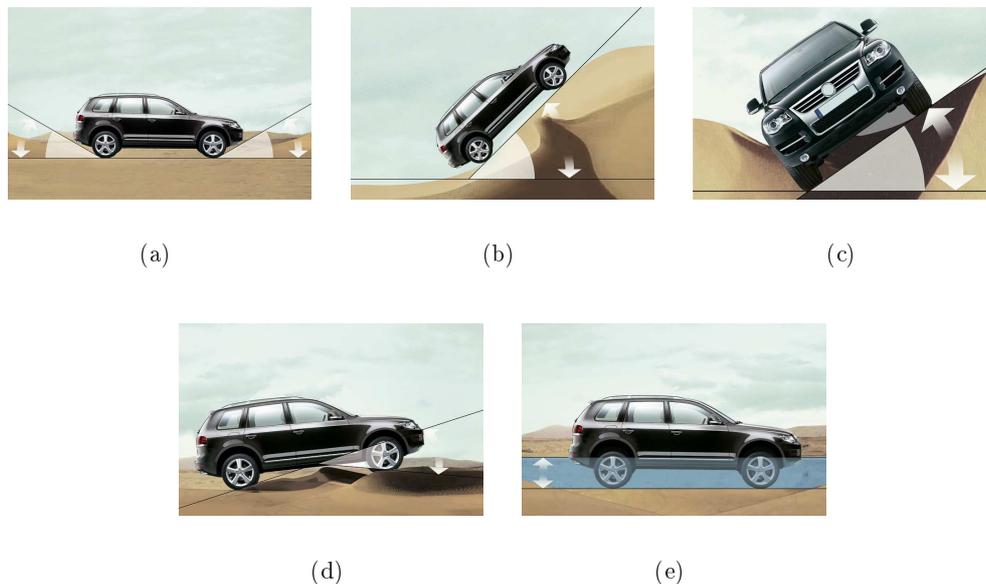


Figura 3.3: Ângulos de locomoção: ângulo de ataque e de saída (a), ângulo de subida (b), ângulo lateral (c), ângulo ventral (d), capacidade de vau (e).

### Segurança Passiva

Apesar dos problemas com o fabrico das estruturas e rodas, a segurança passiva do protótipo não foi prejudicada. No geral, o comportamento das diversas componentes está de acordo com a simulação numérica realizada. Contudo, os elementos de segurança passiva concebidos provocaram alguns problemas no funcionamento do protótipo.

A estrutura individual do módulo base, sendo a principal blindagem do protótipo, foi submetida a um carregamento distribuído de 700N segundo o eixo vertical não tendo sofrido quaisquer danos. Para além disso, a estrutura foi traccionada com uma carga de cerca de 300N segundo o eixo longitudinal pelo ponto de apoio do acoplamento. O teste não provocou deformações prejudiciais ao funcionamento do protótipo, nomeadamente ao nível da fixação do acoplamento. A fotografia da figura 3.4 (a) representa um dos testes realizados à estrutura do protótipo. As estruturas dos módulos de funções, apesar de constituídas por espessuras menores, suportam os mesmos carregamentos, uma vez que as suas dimensões gerais também são menores.

As rodas do robô deformaram da forma esperada, sendo necessária uma carga distribuída de 180 N para apoiar a estrutura ao solo na totalidade. A fotografia da figura 3.4 (b) representa o teste realizado à deformação das rodas. Para além disso, a flexão das rodas mostrou melhorar a adaptabilidade a pequenas irregularidades de terreno. No entanto, torção das rodas e a possibilidade de aproximação dos aros das jantes foi prejudicial ao guiamento das lagartas.

Os entalhes de guiamento dos aros não podem ser mais profundos porque têm que ter uma altura inferior à espessura das lagartas. Assim, para esse problema poder ser corrigido, devem-se utilizar lagartas com entalhe de guiamento centrais. Para além disso, deve haver folgas entre as lagartas e as guias dos aros, abrigando assim a um maior deslocamento para a remoção das lagartas. De forma a eliminar ao máximo a torção das jantes, estas devem ser



Figura 3.4: Fotografias dos testes de segurança passiva: carregamento da estrutura (a), deformação das rodas(b).

desenhadas com simetria segundo um plano perpendicular ao eixo. O rolamento ou o anel de transmissão de potência devem-se localizar no centro geométrico das jantes. Deve ainda ser criado um sistema de forma a bloquear completamente a torção, permitindo apenas a deformação no plano.

Uma vez que não foi possível fabricar as novas jantes, de forma a testar os restantes conceitos implementados (incluindo a locomoção já descrita), foram desenhadas e construídas rodas rígidas. No entanto, apesar de não ocorrer deformação das jantes, ocorre torção dos veios, principalmente do motor. De forma a evitar essa torção deve redesenhar-se o apoio das rodas, adicionada uma travessa com o comprimento do entre-eixo do lado exterior das rodas. A figura 3.5 representa a fixação projectada para as rodas de forma a manter o paralelismo dos eixos.

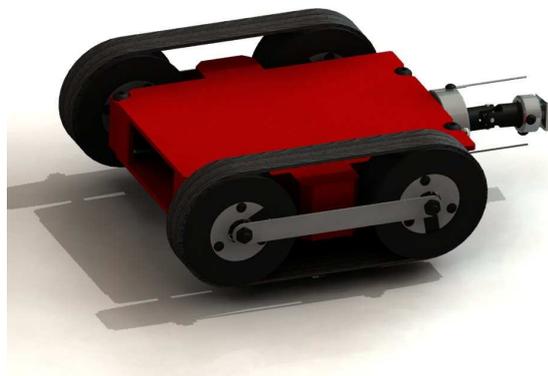


Figura 3.5: Imagem foto-realística da fixação exterior projectada para as rodas.

### Elevação das Unidades

Para a realização dos ensaios de elevação de unidades foi utilizada uma montagem com apenas um módulo slave ligado através de um acoplamento a uma balança. O accionamento do servomotor do módulo slave foi feito através de um circuito externo. A fotografia da figura 3.6 (a) representa o acoplamento entre o módulo slave e a balança. O accionamento do acoplamento provocou uma carga de 6.34 kgf a 40 mm do ponto de rotação, utilizando uma bateria com uma tensão de 5V. Essa carga corresponde à elevação de cerca de 2 unidades. A fotografia da figura 3.6 ilustra a elevação da estrutura de um módulo base.

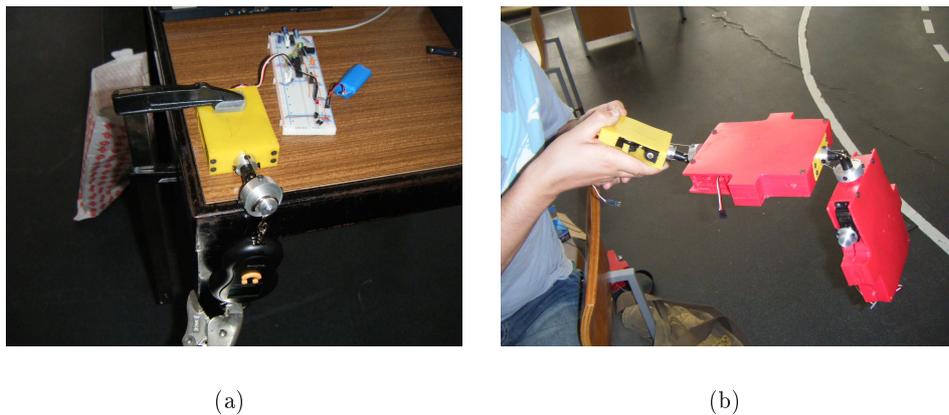


Figura 3.6: Fotografias dos teste de elevação de unidades: acoplamento entre unidades (a), elevação da estrutura de uma unidade(b).

Os testes mostraram ser possível elevar uma unidade até um ângulo de  $60^\circ$  com a anterior, em ambos os sentidos. Para além disso, a torção causada na fixação rotativa do acoplamento pela elevação de uma unidade, aumenta o atrito à rotação. Essa situação torna-se benéfica uma vez que impede a rotação segundo o eixo longitudinal de unidades não apoiadas. Contudo, a tensão nos cabos do acoplamento cria um sistema instável, ocorrendo facilmente rotação em torno do eixo vertical do robô. Tendo o acoplamento ficado pronto para o accionamento do segundo grau de liberdade, foi adicionado um segundo par de cabos limitando a rotação segundo o eixo vertical. Com a actuação desse segundo par de cabos torna-se possível estabilizar o sistema, para além de se assumir controlo sobre as rotações segundo os eixos vertical e transversal com a unidade elevada.

### 3.1.3 Electrónica

As diferentes componentes electrónicas utilizadas e a sua integração foram testadas no circuito apresentado na fotografia da figura 3.7 (a). O circuito integra as diversas partes das secções de distribuição de energia e gestão de unidades. As baterias totalmente carregadas têm uma tensão de 5,6V, superior à esperada. Durante o consumo de energia acumulada a tensão desce até cerca de 4,5V. Os sensores de inclinação e orientação dão leituras correctas com ângulo morto inferior a  $10^\circ$ . Os sensores de proximidade detectaram uma amostra de polietileno até distâncias de cerca de 50mm. O controlo do servo permite a rotação nos dois sentidos a diferentes velocidades. A alteração do sentido de rotação ocorre um espaço muito curto de tempo.

A secção de comunicação e navegação foi testada de forma independente das restantes secções. A comunicação foi feita com uma velocidade de transmissão de 9600 bps. A subsecção seguinte refere os alcances registados. A iluminação é suficiente para a obtenção de uma imagem com uma camera de video sem luz exterior. O consumo total da iluminação é inferior a 250 mA. A fotografia da figura 3.7 (b) representa a secção de comunicação e navegação.

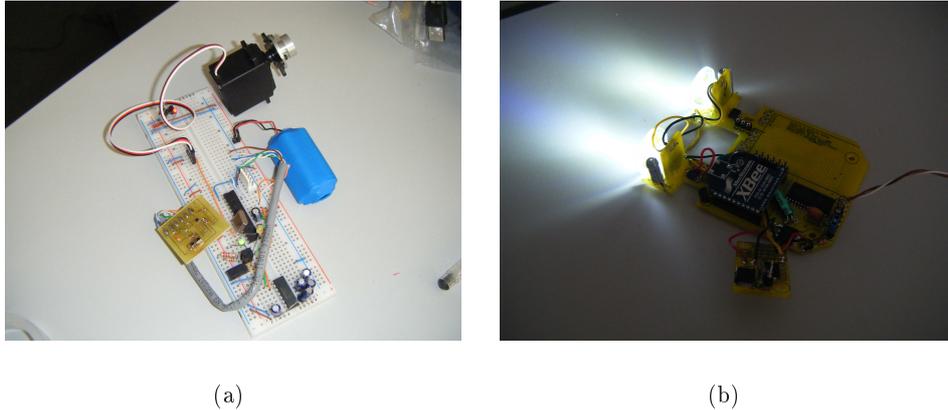


Figura 3.7: Fotografias dos teste de circuitos electrónicos: circuito com sensores de inclinação, orientação e proximidade e controlo de um servomotor alimentado por uma bateria (a), circuito master com comunicações e iluminação(b).

### Comunicações

Apesar de documentado que o alcance dos módulos de XBee seria de até 30m em ambiente interior e 100m em espaço aberto, foram testadas as comunicações, de forma a prever a distância máxima entre o operador e o módulo master. Para isso, foi testada a comunicação em espaço aberto, tendo-se conseguido um alcance superior a 70 m. Em espaço interior o alcance é extremamente limitado por obstáculos (principalmente paredes), levando a alcances máximos inferiores a 10 m. Além disso, não foi possível comunicar entre andares diferentes de um edifício.

## 3.2 Ambiente de Testes

Uma vez que não nos é possível preparar ambientes realistas de operações de busca e salvamento urbano, optou-se por simular algumas dificuldades que possam ser enfrentadas. Desta forma, algumas das situações a testar são:

- locomoção num plano,
- seguimento de uma trajectória,
- navegação em terreno irregular,
- ultrapassagem de obstáculos de altura superior ao protótipo,

- subir e descer escadas,
- suspensão e descida em parede.

Estes testes foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e noutros locais do campus da Universidade. Pretende-se no futuro realizar testes noutros ambientes, incluindo em simulações de situações reais.

Os testes realizados com o objectivo de testar o comportamento do protótipo foram realizados com uma configuração de 4 unidades, tendo sido utilizado 1 módulo master, 2 módulos slave e 1 módulo de lastro. É assim possível actuar as juntas entre as três primeiras unidades, elevando as duas primeiras. Esta configuração foi escolhida por ser o melhor compromisso entre custo de produção e comprimento das necessidades para testar a aplicabilidade dos diversos conceitos em ambientes reais simulados. O conjunto tem  $66\text{mm}$  de altura e  $176\text{mm}$  de largura, iguais às de uma unidade, e um comprimento total de cerca de  $830\text{mm}$ . A massa total do protótipo é inferior a 3,5 kg e é facilmente transportável numa mochila.

### 3.3 Resultados dos Testes

De uma forma geral, o comportamento do protótipo face aos testes realizados foi positivo. Apesar do protótipo ainda não estar completamente desenvolvido, o sistema mostrou ser capaz de superar alguns dos ambientes de teste, e prevê-se que a ultrapassagem de todos os obstáculos referidos é possível. Pensa-se ainda que o aumento do número de unidades pode trazer benefícios ao comportamento do robô. A introdução de mais duas unidades equipadas com módulos slave pode contribuir de forma positiva para a navegação por terrenos irregulares, nomeadamente para superar obstáculos de maiores dimensões. Para além disso, os maiores melhoramentos podem-se conseguir através da actuação do segundo grau de liberdade do acoplamento.

Como esperado, o comportamento do sistema constituído pelas quatro unidades foi idêntico ao de apenas uma unidade aquando da locomoção num plano. O robô conseguiu superar as mesmas inclinações e ângulos que uma unidade independente. A rotação de unidades não provocou alterações ao comportamento do robô, podendo esta ser feita durante o funcionamento.

O seguimento de uma trajectória curvilínea foi também cumprido mediante o comando da unidade com o módulo master e funcionamento autónomo das restantes unidades. A fotografia da figura 3.8 ilustra o sistema a ser conduzido sobre uma linha. Os testes de seguimento de trajectórias permitiram verificar que o raio de curvatura mínimo é de 500 mm. Esse raio de viragem permite uma curva a  $90^\circ$  num espaço com faixa de circulação com 300 mm largura. A relação entre a viragem das várias unidades pode ser regulada através de alterações de software.

A introdução de irregularidades de terreno aparenta causar dificuldades à navegação, sendo também possível operar sobre diferentes superfícies. Para além da rotação dos três graus de liberdade das juntas, principalmente das rotações segundo os eixos longitudinais e transversais, a deformação das lagartas é proveitosa para a adaptação a pequenas irregularidades. A fotografia da figura 3.9 (a) representa o robô em navegação sobre terreno irregular artificial. As irregularidades construídas simulam as dificuldades de navegação de um terreno de escombros. Desta forma, prevê-se que o protótipo vai poder navegar num ambiente de busca e salvamento urbano.



Figura 3.8: Fotografia do sistema constituído por quatro unidades em locomoção sobre uma trajectória curvilínea.



(a)



(b)

Figura 3.9: Fotografias do sistema constituído por quatro unidades em locomoção: sobre terreno irregular (a), ultrapassagem de obstáculos de dimensões superiores a uma unidade(b).

Para além das pequenas irregularidades de terreno, foi possível ultrapassar um obstáculo de dimensões superiores a uma unidade do robô. Foi possível superar diversos obstáculos, tendo-se superado uma altura máxima de 200 mm. A fotografia da figura 3.9 (b) ilustra uma das fases da ultrapassagem do obstáculo referido. Pensa-se que o aumento do número de unidades equipadas com o módulo slave pode permitir a ultrapassagem de obstáculos de dimensões superiores.

O protótipo aparenta ainda ser capaz de subir e descer escadas, apesar destes testes ainda não terem sido realizados. De forma a obter uma previsão do comportamento neste tipo de operação, o protótipo foi colocado em várias posições em diferentes escadas. Embora possam surgir dificuldades, prevê-se que o protótipo seja capaz de superar escadarias com até 29 mm de degrau e 17 mm de espelho, dimensões típicas de edifícios. As fotografias das figuras 3.10 (a) e (b) ilustram uma posição de subida e descida respectivamente. Apesar de não haver muitas dificuldades em superar escadas de menores dimensões, o aumento dos espelhos oferece maiores

dificuldades ao protótipo desenvolvido. Teme-se que existam dificuldades acrescidas para a subida e descida de escadas cujo degrau e espelho originem uma hipotenusa de comprimento igual à distância entre juntas do robô. Para além disso, escadarias sem espelho ou com rebordo nos degraus podem ainda trazer dificuldades acrescidas à transposição do obstáculo. De forma a ultrapassar essas dificuldades será necessário uma abordagem de subida angular, face à abordagem de topo. Contudo, para que isso possa ser realizado de forma adequada, é necessário implementar a actuação da rotação segundo o eixo vertical das juntas.



(a)



(b)

Figura 3.10: Fotografias do sistema constituído por quatro unidades sobre escadas: subida de escadas (a), descida de escadas(b).

Por fim, o protótipo foi suspenso por uma corda de alpinismo, conseguindo assim uma descida controlada ao longo de uma parede vertical. A fotografia da figura 3.11 ilustra o ensaio de operação vertical realizado. O afastamento de unidades da parede mediante a actuação das juntas provoca um momento que força o apoio do robô contra a parede, permitindo a navegação. É ainda possível passar de um pano vertical para um plano horizontal.



Figura 3.11: Fotografia do sistema constituído por quatro unidades em operação vertical, suspenso a descer uma parede.



# Capítulo 4

## Conclusões

*Com a realização dos diversos ensaios verificou-se que, apesar de existirem algumas limitações com o protótipo, as ideias estudadas são viáveis e de possível implementação em projectos de busca e salvamento.*

*Apesar de o protótipo desenvolvido não estar pronto para a incursão numa missão de busca e salvamento, é possível alterar alguns pormenores de forma a eliminar essa lacuna. Contudo, sendo um trabalho conceptual, é mais interessante estudar mais conceitos ao invés de preparar o actual robô para missões de campo.*

---

### 4.1 Conclusões

O ramo da robótica para operações de busca e salvamento recorre a sistemas formados por inúmeras geometrias e tamanhos, utilizando diferentes conceitos e com vista à resolução de diversos problemas. Não podendo trabalhar sobre todas as vertentes existentes, optou-se pelo desenvolvimento de um protótipo de classe portátil, tendo como principal objectivo a navegação por terreno irregular. Para isso, optou-se pelo uso de uma forma serpentina, sabendo-se à partida que era possível transpor obstáculos de dimensões superiores a uma unidade do sistema. Além disso, trabalhou-se sobre uma arquitectura modular com plataforma transversal a todas as unidades e foram ainda testados novos conceitos. Uma vez que foram aplicadas diversas ideias, existiu sempre uma incerteza acerca do desempenho do modelo desenvolvido.

O fabrico do protótipo revelou alguns pequenos problemas existentes no projecto, além de possíveis melhoramentos. A fixação do acoplamento entre unidades foi redesenhada da forma descrita na secção 3.1.1. Os restantes melhoramentos ao projecto não foram implementados, uma vez que o benefício não o justificava. Assim, apenas serão implementados no fabrico de futuras unidades com base no projecto. De forma geral, conclui-se que ao nível do projecto as soluções estudadas cumpriram os objectivos.

Utilizando a geometria multi-unidade tinha-se uma boa base de partida para a navegação em terreno irregular. Contudo, ao utilizar juntas com três graus de liberdade desconhecia-se o comportamento geral que o sistema iria ter. Os testes realizados demonstraram que o uso deste tipo de junta beneficia a navegação.

A articulação segundo o eixo longitudinal do robô provou contribuir para o aumento do contacto entre as lagartas e o solo. Desta forma, minimiza-se a possibilidade de falha por escorregamento das lagartas, reduzido a probabilidade de atolamento. Além disso, a rotação independente das unidades deixa o robô pronto a operar após quedas que provoquem a revolução parcial do protótipo. Apesar desta rotação ser limitada, uma vez que provoca a torção dos cabos entre as unidades, esta limitação pode ser eliminada com a utilização de contactos de escovas junto dos acoplamentos.

A actuação da articulação segundo o eixo transversal ao robô teve o comportamento esperado, permitindo a elevação das unidades dianteiras e ultrapassagem de obstáculos. Contudo, apesar da rotação segundo o eixo vertical ser limitada aquando da suspensão de uma unidade, será vantajosa a actuação dessa junta. Essa actuação, em conjunto com a possibilidade de bloqueio da rotação da unidade permitirá a completa estabilidade e controlo de unidades elevadas. Isso poderá não só melhorar a versatilidade de navegação, mas também a orientação da câmara e luzes em diversas direcções. O sistema de actuação de juntas por tracção de cabos é uma solução simples. Esta pode não só ser utilizada nas juntas de robôs de forma serpentiforme, mas também em varas com juntas múltiplas actuadas manualmente. Este tipo de actuação permite não só o distanciamento da fonte de potência da junta a actuar mas também a redução dos esforços por desmultiplicação de forças numa roldana. Para além disso, a tracção dos cabos através da roldana permite a actuação da junta nos dois sentidos através de um único motor, de uma forma simples e com baixas probabilidades de falha.

Para além da geometria serpentiforme, o uso de uma plataforma transversal provou também ser um conceito vantajoso para este tipo de robôs, para além da possibilidade de integrar novas funções. A substituição de módulos danificados é rápida, permitindo um arranjo rápido em caso de avaria.

A geometria da estrutura desenhada provou também ser adequada a este tipo de robôs, uma vez que possibilita a substituição de componentes de forma fácil e rápida. Assim, a reparação dos módulos danificados referidos no parágrafo anterior pode também ser uma tarefa rápida. Para além disso, a estrutura blinda todos os componentes interiores, contribuindo para a sua integridade. Apesar da interface entre as estruturas ter folgas e permitir a entrada de água, isso pode ser corrigido através do uso de vedantes. Para a implementação deste tipo de estrutura num robô de campo, é apenas necessário utilizar materiais diferentes, nomeadamente polímeros concebidos para altas temperaturas ou metais de baixa densidade.

As rodas estudadas, apesar de não terem sido utilizadas, provaram também contribuir de forma eficiente para a segurança do robô. A sua deformação permite o contacto da estrutura com o solo mediante a aplicação de uma carga excessiva, protegendo assim os veios e os motores. Contudo, para a sua utilização devem ser redesenhadas de forma a que apenas possibilitem o deslocamento num plano, inibindo assim a torção. Tanto das rodas deformáveis como nas rodas rígidas posteriormente desenhadas existe possibilidade de escorregamento das lagartas em situações de maiores esforços. Além disso, para utilizar qualquer um destes tipos de rodas num robô de campo é necessário substituir os materiais utilizados. Poderá utilizar-se borracha e polímeros resistentes a altas temperaturas para a jante e aro respectivamente. O escorregamento das lagartas pode ser eliminado através do uso de dentado interior e aros síncronos. De notar que o dimensionamento de rodas deformáveis deve ser feito para um

veículo específico, uma vez que não depende apenas da geometria mas também da massa e carga máxima a que pode ser sujeito.

Apesar do bom comportamento geral do protótipo, as comunicações utilizadas mostraram ser uma das maiores limitações. De forma a corrigir essa lacuna, os módulos de comunicação XBee utilizados podem ser substituídos por módulos XBee PRO, com maior alcance máximo interior teórico de 100m. Esses módulos têm o mesmo funcionamento dos utilizados e a sua utilização é permitida mundialmente. A comunicação com o robô pode ainda ser substituída por um sistema de cabos, através de um cordão umbilical.

Em conclusão, os conceitos estudados que podem trazer maiores mais-valias aos robôs para operações de busca e salvamento são:

- utilização de geometria serpentiforme,
- utilização de geometria modular e plataforma transversal,
- acoplamento entre unidades com três graus de liberdade,
- rotação independente de unidades,
- actuação da juntas por tracção de cabos por sistema de roldana,
- blindagem dos robôs e segurança passiva por deformação das rodas,
- fixação sem parafusos das componentes dentro das estruturas.

Por outro lado existem aspectos no projecto que não podem ser integrados nos robôs de campo. Estas limitações podem porém ser corrigidas, permitindo a integração do robô numa operação de busca e salvamento. As características que necessitariam ser implementadas tornando o protótipo mais versátil são:

- accionamento do segundo grau de liberdade da junta universal do acoplamento,
- utilização de rodas deformáveis sem possibilidade de torção,
- utilização de polímeros resistentes a alta temperatura,
- eliminação de folgas na fixação das componentes pela estrutura, inibindo a entrada de água,
- utilização comunicações sem fios de longo alcance.

O desempenho geral do protótipo foi positivo, trazendo confiança ao projecto. Conseguiu-se conceber uma plataforma robotizada estável, cujas imperfeições podem ser facilmente corrigidas. O sucesso conseguido e o desejo de melhorar trazem incentivos para a continuação do trabalho e desenvolvimento de novas ideias.

## 4.2 Trabalhos Futuros

De forma a poder participar activamente em operações de busca e salvamento, seria necessário corrigir as lacunas do projecto. As principais alterações a realizar com esse intuito seriam a substituição dos materiais utilizados por outros resistentes a uma maior gama de temperaturas e a impermeabilização completa do robô. Contudo, visto ser um projecto conceptual, onde o principal objectivo é desenvolver e estudar ideias que possam contribuir para o desenvolvimento desta área, é mais proveitoso continuar o trabalho nessa vertente.

Desta forma, os trabalhos que se avizinham passam pela continuação dos testes de campo, de forma a verificar todas as necessidades ainda não cumpridas. Para isso, procura-se estabelecer relações com equipas de protecção civil especializadas em operações de busca e salvamento.

De forma a melhorar e complementar o projecto são previstos alguns trabalhos. Além das ideias resultantes de futuros testes ao protótipo desenvolvido, tem-se o objectivo de actuar o segundo grau de liberdade do acoplamento. Com essa implementação, a junta continuará com três graus de liberdade, sendo dois deles actuados e apenas a rotação sobre o eixo longitudinal livre. Pretende-se ainda estudar a possibilidade de bloqueio do eixo livre referido, melhorando o seu comportamento quando elevado. Estuda-se ainda o desenho de um sistema de sensores externo para anexar ao módulo master, aumentando a possibilidade de automação do robô. Para isso, pretende-se utilizar as entradas analógicas e digitais reservadas na unidade de circuito do módulo master. Para além disso, prevê-se redesenhar as rodas deformáveis de forma a torna-las compatíveis com a utilização de lagartas. Explorando a multifuncionalidade do projecto, prevê-se também o desenvolvimento de novos módulos de função, nomeadamente para a inspecção de condutas.

Para além dos trabalhos a desenvolver sobre o projecto, tem-se ainda a ideia de o integrar com outros projectos. Uma vez que se utiliza um módulo de comunicações XBee, pretende-se estabelecer uma interacção entre a navegação do protótipo com outros projectos que utilizam o mesmo módulo de comunicações.

Por fim, têm-se ainda o objectivo de estudar novos conceitos a aplicar em robôs de busca e salvamento, apesar de poderem por vezes ser incompatíveis com alguns das aplicações implementadas. Tem-se a ideia de desenvolver uma ligação ao robô por cordão umbilical, sendo esta responsável pela comunicação com o robô, refrigeração através de ar comprimido e envio de água ou alimentos líquidos para sobreviventes encontrados. Sabemos no entanto que a implementação desta ideia impossibilita a rotação independente das várias unidades.

Espera-se com o projecto realizado e com as ideias para o futuro contribuir da melhor forma para o desenvolvimento da área de busca e salvamento por robôs. Tendo sempre a esperança de nunca virem a ser precisos, esperamos que, num futuro próximo, a vida das vítimas de catástrofes e acidentes possa ser assegurada no mais curto espaço possível.

## Apêndice A

# Resultados da Simulação Numérica

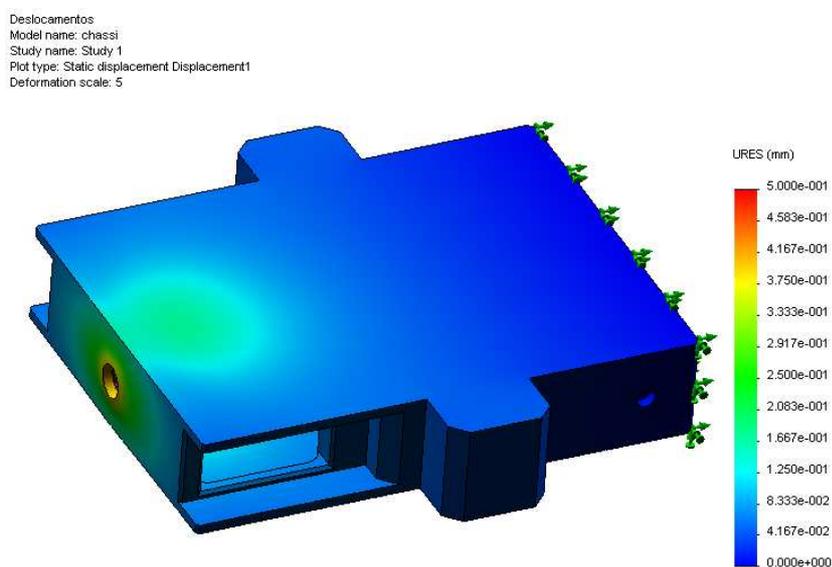


Figura A.1: Resultado dos deslocamentos do chassi sujeito a uma tração de 300N segundo o eixo longitudinal.

Model name: chassi  
Study name: Study 2  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

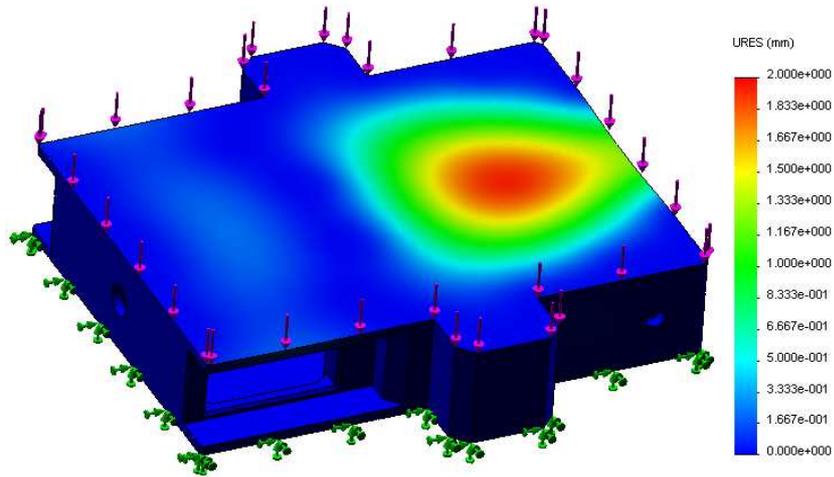


Figura A.2: Resultado dos deslocamentos do chassi sujeito a um carregamento de 600N segundo o eixo vertical.

Model name: acoplamento  
Study name: Study 1  
Plot type: Design Check Design Check1  
Criterion : Max von Mises Stress  
Factor of safety distribution: Min FOS = 1.2

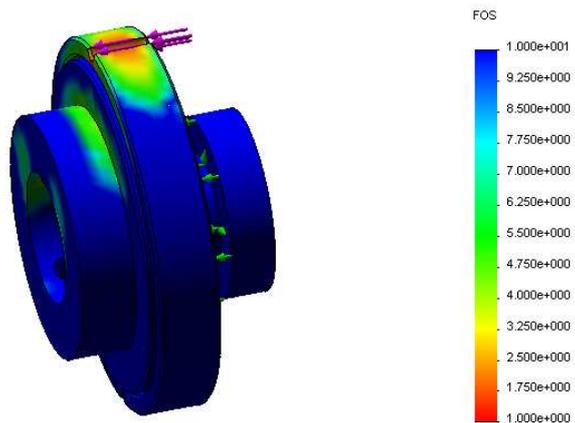


Figura A.3: Resultado dos coeficientes de segurança do acoplamento com uma tracção no cabo de 300N.

Model name: jante2  
Study name: Study 1  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

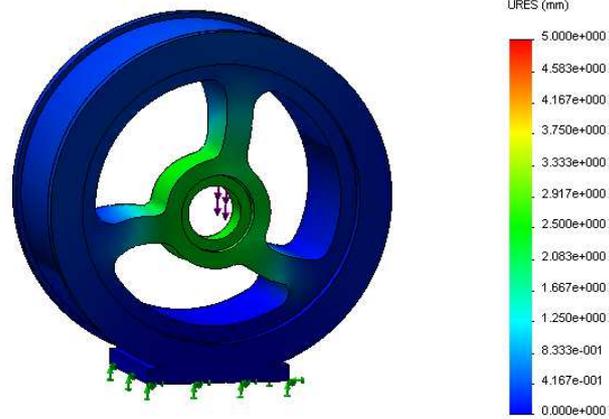


Figura A.4: Resultado dos deslocamentos de um pré-desenho da roda sujeita a um carregamento axial de 50N.

Model name: jante2  
Study name: Study 2  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

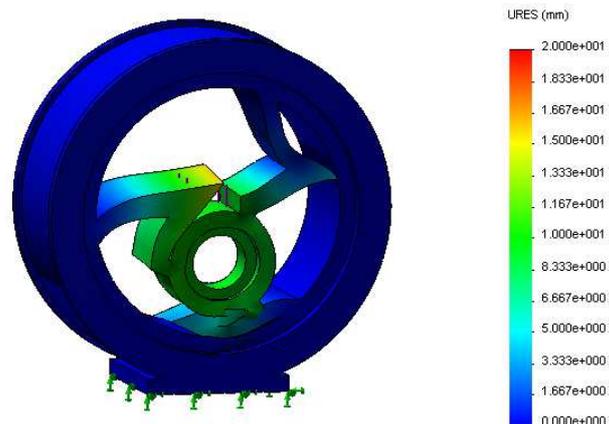


Figura A.5: Resultado dos deslocamentos de um pré-desenho da roda sujeita a um carregamento axial de 50N.



# Apêndice B

## Circuitos Eletrônicos

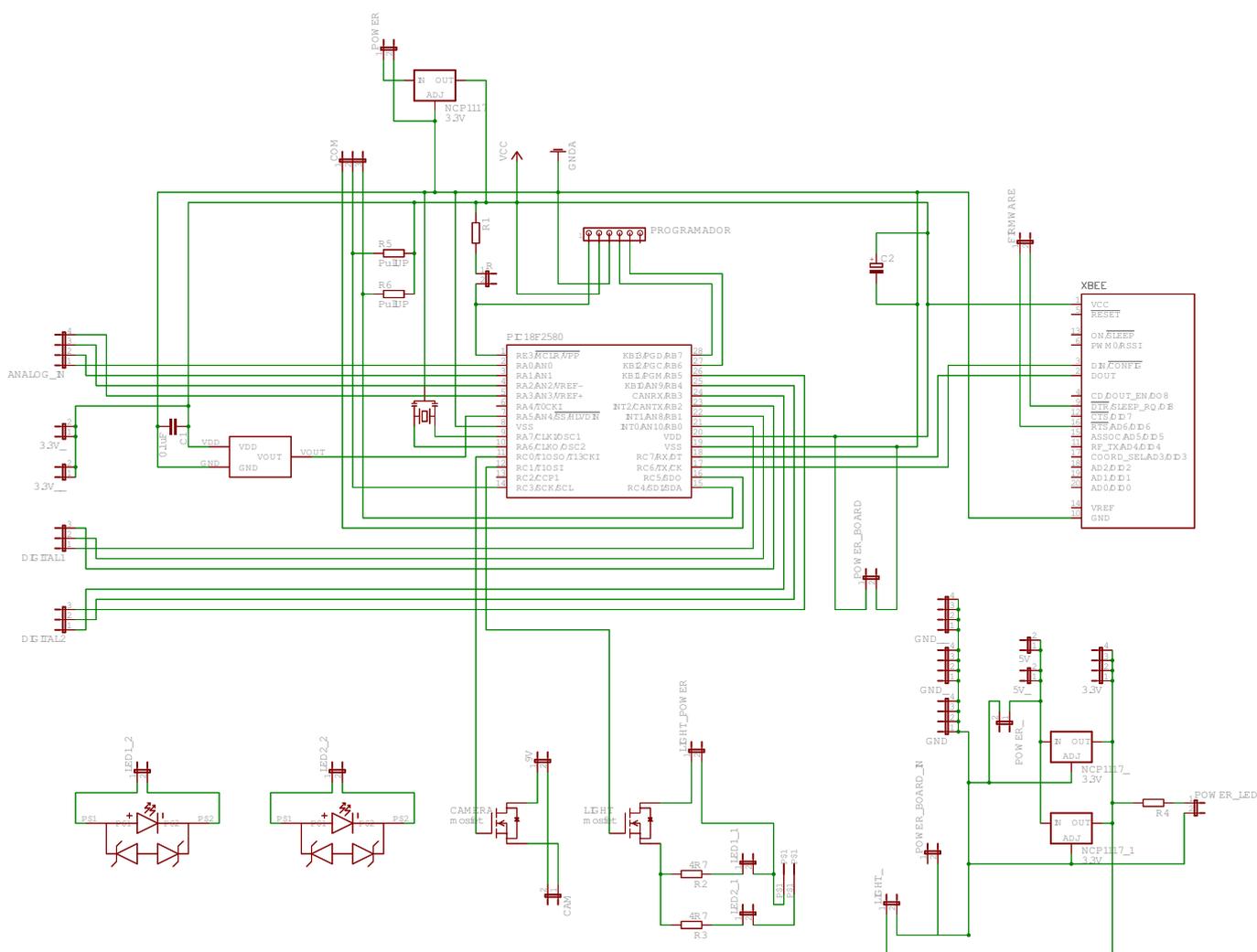


Figura B.1: Circuito de comunicação e navegação.

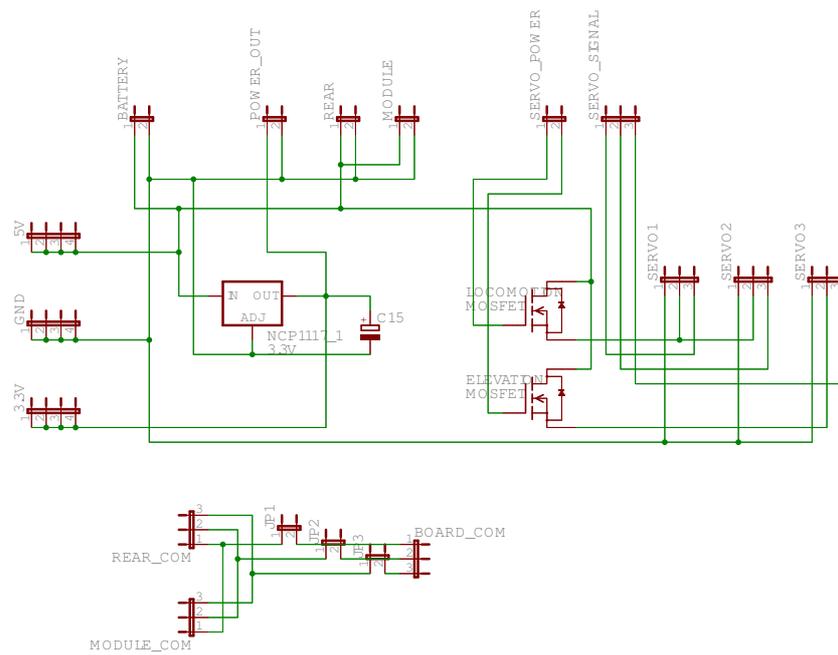


Figura B.2: Circuito de gestão de energia.

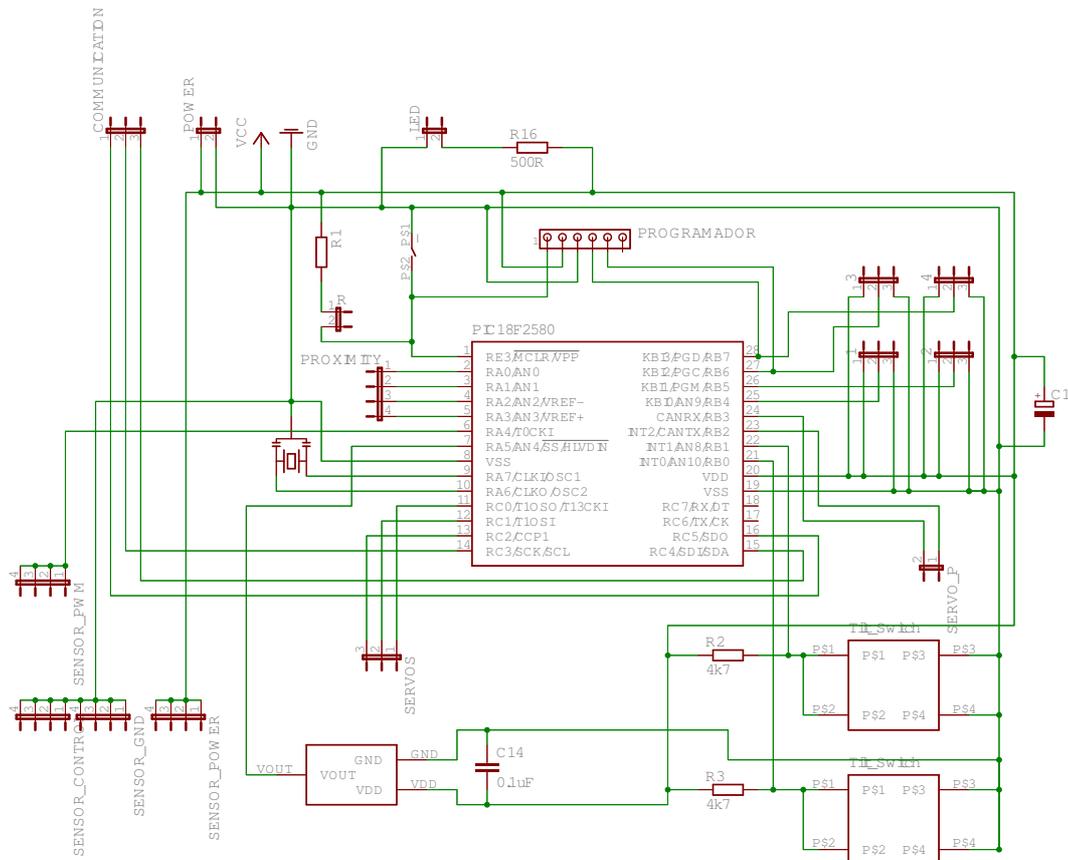


Figura B.3: Circuito de gestão de unidades.

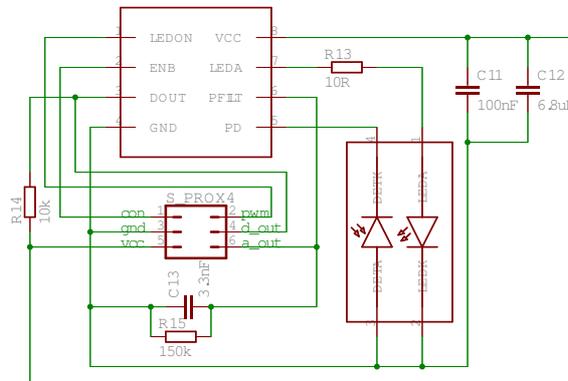


Figura B.4: Circuito do sensor de proximidade Avago HSDL 9100 com utilização do chip Avago APDS 9700.

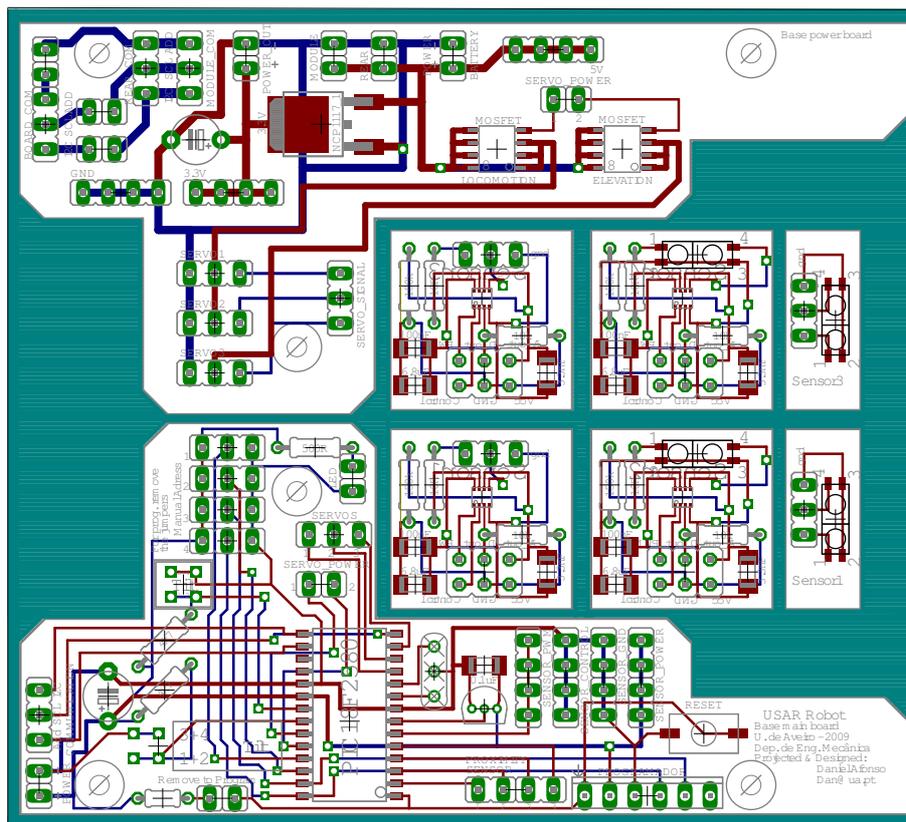


Figura B.5: Placa de circuito impresso com circuitos de gestão de energia, gestão de unidade e 4 de proximidade.

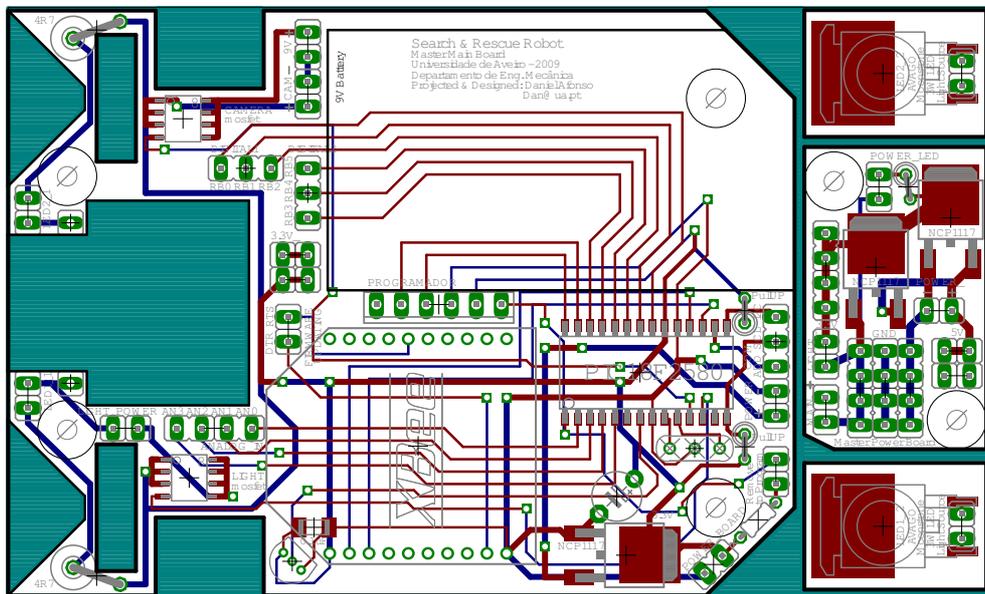


Figura B.6: Placa de circuito impresso com circuitos de comunicação e navegação dividido.

## Apêndice C

# Fabrico de Componentes

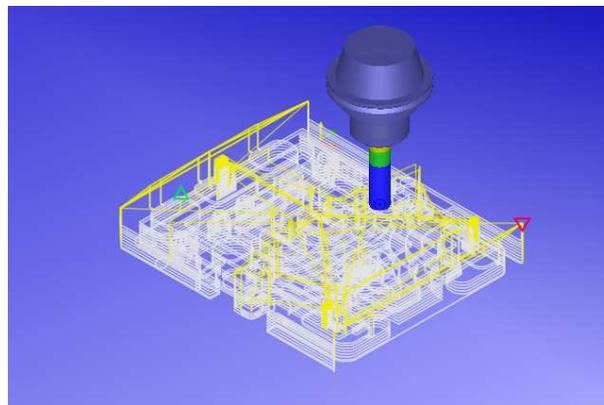


Figura C.1: Simulação do percurso de maquinagem de uma parte da estrutura do módulo base: tempo previsto de maquinagem 35min.



(a)



(b)

Figura C.2: Maquinagem de uma parte da estrutura do módulo base: Preparação do bloco para a maquinagem (a), Maquinagem: tempo de maquinagem 40min (b).

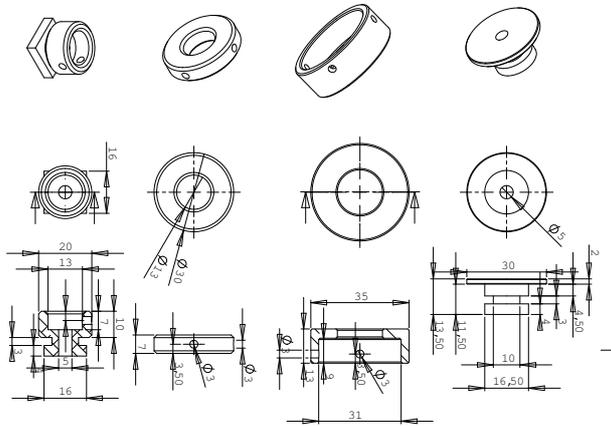


(a)

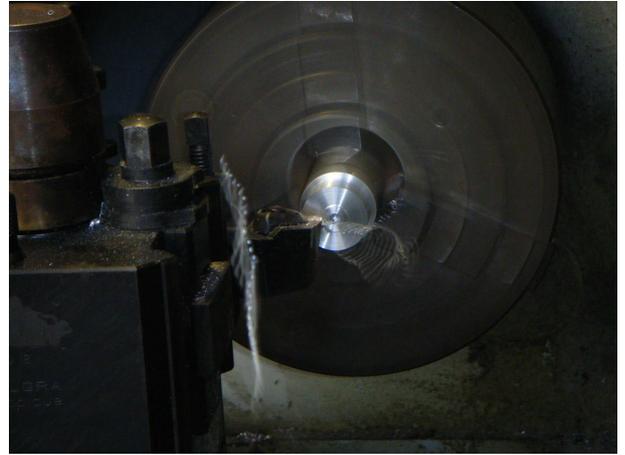


(b)

Figura C.3: Tratamento térmico das estruturas maquinadas: tratamento térmico com aplicação de carga (a), comparação entre as peças antes e depois do tratamento térmico (b).



(a)



(b)

Figura C.4: Maquinagem manual das peças do acoplamento: desenhos de fabrico (a), maquinagem em torno manual (b).



(a)

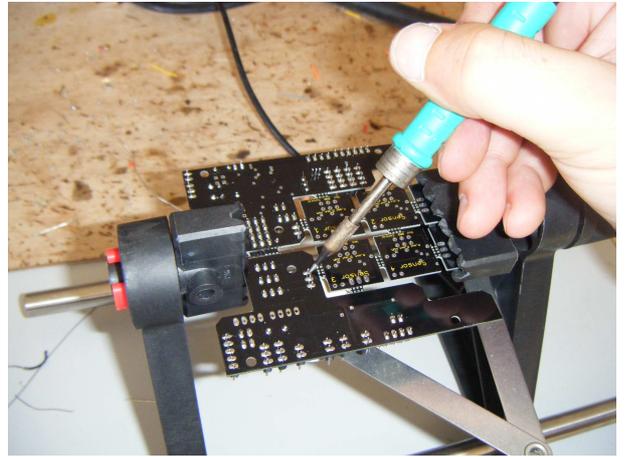


(b)

Figura C.5: Fabrico das rodas: rodas deformáveis: molde com silicone após submetido ao vácuo, jantes de silicone, aro e montagem (a), rodas rígidas: rodas rígidas, anel de fixação de rolamento e montagem (b).



(a)



(b)

Figura C.6: Soldagem das componentes electrónicas: soldagem com pasta de solda e ar quente (a), soldagem com ferro de soldar (b).

# Apêndice D

## Montagem



Figura D.1: Disposição das diversas componentes do acoplamento.

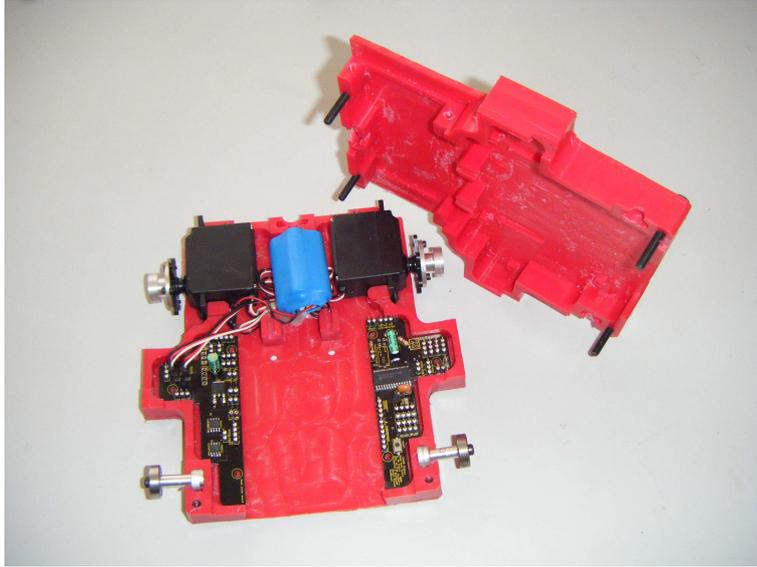


Figura D.2: Módulo de base.

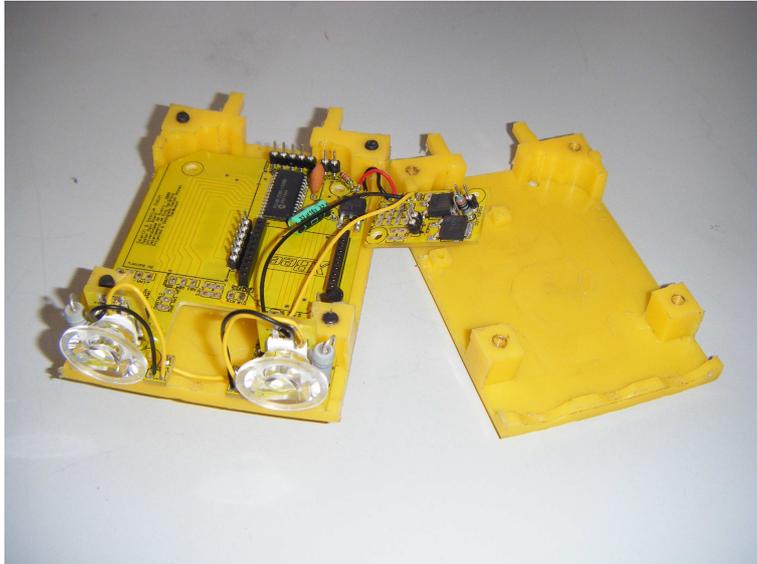


Figura D.3: Módulo Master.



Figura D.4: Módulo Slave e acoplamento.



Figura D.5: Conjunto de quatro módulos base e quatro módulo de função.

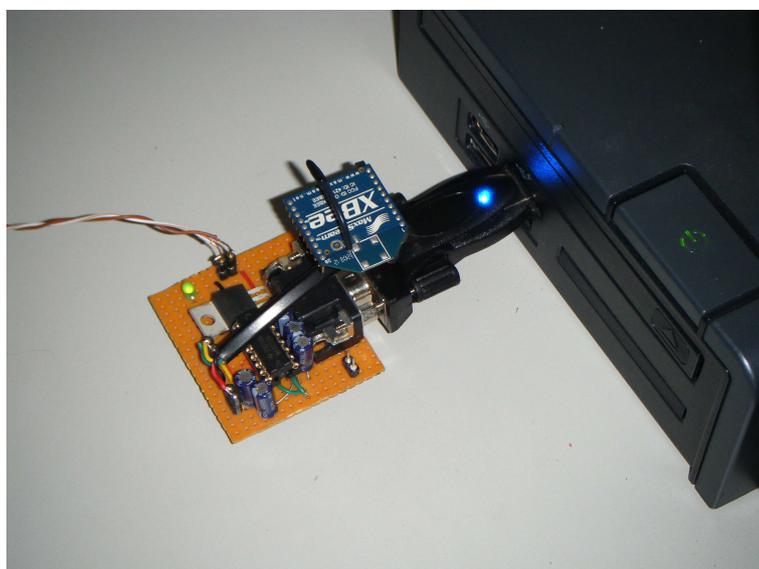


Figura D.6: Secção de comunicações ligada ao computador do operador.

## Apêndice E

### Situações Testadas

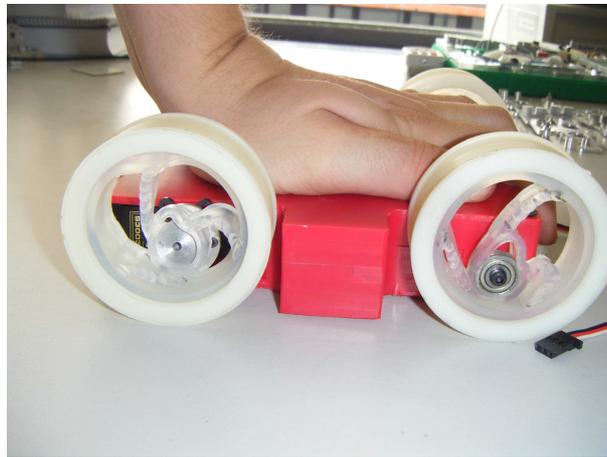
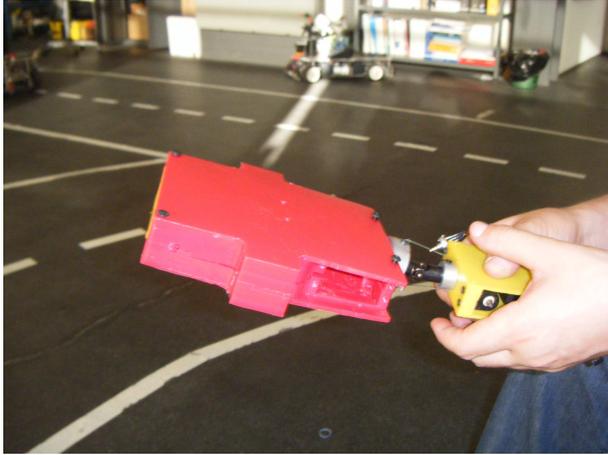


Figura E.1: Teste de deformação das rodas.

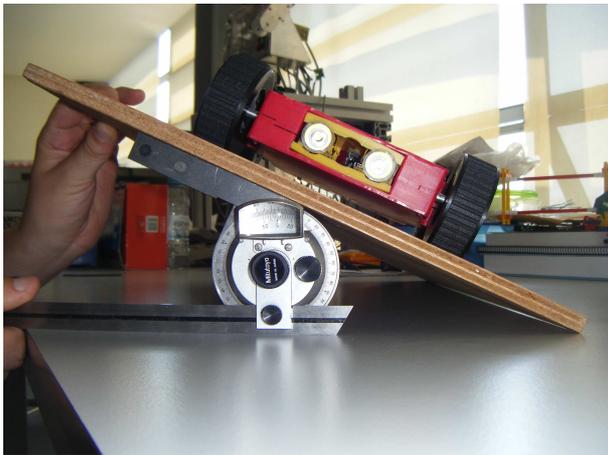


(a)



(b)

Figura E.2: Teste de elevação de unidades: elevação da estrutura de uma unidade (a), carga de elevação (b).



(a)



(b)

Figura E.3: Testes de locomoção: determinação do ângulo lateral máximo (a), controlo de locomoção (b).

# Referências

- [1] Michael R. Blackburn, Richard Bailey, and Brent Lytle. Improved mobility in a multidegree-of-freedom unmanned ground vehicle. In *Unmanned Ground Vehicle Technology VI. Automated Controlled Environments*, Inc - Valencia, California, 2004.
- [2] BMT Cordah. *Maritime Search and Rescue (SAR) Training Courses - SAR Mission Co-ordinator (SMC)*, may 2007.
- [3] Howie Choset. Carnegie mellon - the robotics institute: Search and rescue. World Wide Web electronic publication, 2006. [http://www.ri.cmu.edu/research\\_project\\_detail.html?type=description&project\\_id=407&menu\\_id=261](http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?type=description&project_id=407&menu_id=261).
- [4] Taeil Chung, Kyung Hak Hyun, Chun-Kyu Woo, Soohyun Kim, and Yoon Keun Kwak. Control of the multi-track type robot inspired from antennae of a centipede. In *11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, pages 214 – 220. Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering - Guseong-dong Yuseong-gu Daejeon, Korea, 2008.
- [5] Shiro Fujita, Katsuyuki Baba, and Daisaku Sudoh. Rescue robot "t-52 enryu". In *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pages 237–240. Tmsuk Co., Ltd., 2006.
- [6] Grzegorz Granosik, Malik G. Hansen, and Johann Borenstein. The omnitread serpentine robot for industrial inspection and surveillance. *International Journal on Industrial Robots*, Março 2005.
- [7] David Greer, Phillip M<sup>c</sup>Kerrow, and Jo Abrantes. Robots in urban search and rescue operation. In *Australasian Conference on Robotics and Automation*, pages 25–30. School of Information Technology and Computer Science - University of Wollongong, 2002.
- [8] Kinleong Ho, Hudock Bryan, Bradley E. Bishop, Jenelle Armstrong Piepmeier, George Piper, and Kenneth A. Knowles. The use of low-cost rc servos in a robotics curriculum. Technical report, Weapons and Systems Engineering - United States Naval Academy, 2003.
- [9] Chun-Che Huang. Overview of modular product development. Technical report, National Chi-Nan University, Taiwan, 1999.
- [10] Inuktun. Confined space video inspection systems: Miniature robotic crawler. World Wide Web electronic publication. <http://www.inuktun.com/versatrax100.htm>.

- [11] Adam Jacoff, Elena Messina, and John Evans. A standard test course for urban search and rescue robots. Technical report, Intelligent Systems Division - National Institute of Standards and Technology, 2000.
- [12] Carlos Marques, João Cristóvão, Pedro Lima, João Frazão, Isabel Ribeiro, and Rodrigo Ventura. Raposa: Semi-autonomous robot for rescue operation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3988–3993. IdMind - Engenharia de Sistemas, Lda and Instituto Superior Técnico, 2006.
- [13] Robin R. Murphy. Robots, rescue, and reach-back. Technical report, Center for Robot Assisted Search and Rescue Presentation - University of South Florida, 2003.
- [14] Robin R. Murphy. Center for robot assisted search and rescue - rescue robots. World Wide Web electronic publication, 2006. <http://crasar.cse.tamu.edu/rescuerobots/robots.htm>.
- [15] Robin R. Murphy, Satoshi Tadokoro, Nardi Daniele, Adam Jacoff, Paolo Fiorini, Howie Choset, and Aydan M. Erkmen. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2008.
- [16] Bryn Nelson. No obstacle too high for climbing snakebots. World Wide Web electronic publication, 2009. <http://www.msnbc.msn.com/id/28543005//>.
- [17] Illah Nourbakhsh, Emily Hamner, Debra Bernstein, Kevin Crowley, Eric Porter, Thomas Hsiu, Brian Dunlavey, Ellen Ayoob, Mark Lotter, Skip Shelly, Anuja Parikh, and Daniel Clancy. The personal exploration rover. Technical report, The Robotics Institute - Carnegie Mellon University, 2004.
- [18] Illah R. Nourbakhsh, Katia Sycara, Mary Koes, Mark Yong, Michael Lewis, and Steve Burion. Human-robot teaming for search and rescue. *PERVASIVE computing*, Janeiro - Março 2005.
- [19] Henrique Rozenfeld, Sandro Giovanni Valeri, and Leonardo Paranaguá. Produto modular - conceitos básicos. Technical report, NUMA - Núcleo de Manufatura Avançada, Brasil, 1999.
- [20] Mine Safety and Health Administration (MSHA). Msha - sago mine explosion information - mine rescue robot. World Wide Web electronic publication. <http://www.msha.gov/SagoMine/robotdetails.asp>.
- [21] Alessandro Saffiotti. Platforms for rescue operations. Technical report, AASS Mobile Robotics Laboratory - Örebro University, Örebro, Sweden.
- [22] Autonomous Solutions. Autonomous solutions mining solutions - chaos: High mobility robot. World Wide Web electronic publication, 2007. <http://autonomoussolutions.com/products/chaos.php>.
- [23] Richard M. Voyles, Roy Godzdanker, and Tae-Ho Kim. Auxiliary motive power for terminatorbot: An actuator toolbox. In *International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 2007.
- [24] Brian Yamauchi. Packbot: A versatile platform for military robotics. Technical report, iRobot Corporation.

- [25] Brian Yamauchi. irobot packbot 510 with eod kit. World Wide Web electronic publication, 2008. [http://www.robosoft.fr/img/data/iRobot\\_PackBot510\\_EOD.pdf](http://www.robosoft.fr/img/data/iRobot_PackBot510_EOD.pdf).
- [26] Tae G. Yang, Kurt A. Beiter, and Kosuke Ishii. Product platform development: Considering product maturity and morphology. Technical report, Department of Mechanical Engineering Stanford University, USA, 2005.