

CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ TREPADOR COM LOCOMOÇÃO ATRAVÉS DE RODAS E ADESÃO ATRAVÉS DE MEIOS MAGNÉTICOS

António Luís da Costa Oliveira



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

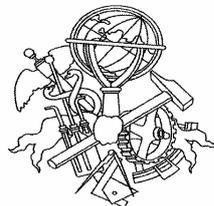
2010

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

Candidato: António Luís da Costa Oliveira, Nº 1900166, 1900166@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, MSS@isep.ipp.pt

Co-Orientação científica: Ramiro de Sousa Barbosa, RSB@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

25 de Novembro de 2010

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta Tese/Dissertação e me ajudaram a ultrapassar as dificuldades sentidas na realização da mesma.

Aos meus orientadores, Eng^o Manuel Silva e Eng^o Ramiro Barbosa, por toda a ajuda que me prestaram ao longo deste trabalho, pela confiança e motivação que me transmitiram, pela cedência de material para aplicação no protótipo e indicação de fontes fidedignas de informação.

Por fim, à minha família pelo apoio incondicional e infindável paciência que tiveram ao longo de todo este processo.

Resumo

O interesse no desenvolvimento de robôs do tipo trepador tem vindo a crescer rapidamente nos últimos anos. Os robôs trepadores são equipamentos úteis que podem ser adoptados numa variedade de aplicações, tais como na manutenção, na construção, na inspecção e na segurança, em indústrias de processo e da construção civil. Estes sistemas são essencialmente adoptados em locais onde o acesso directo por um operador humano é demasiado caro, devido à necessidade de montagem de andaimes, ou muito perigoso, devido à presença de um ambiente hostil. As principais motivações para a sua utilização prendem-se com o aumento da necessidade de maior eficiência nas operações a realizar, através da eliminação da montagem de andaimes, ou com a necessidade de protecção da integridade física dos trabalhadores humanos na realização de tarefas consideradas perigosas. Vários robôs trepadores foram já desenvolvidos, e outros encontram-se em desenvolvimento, para aplicações que vão desde a limpeza até à inspecção de construções de difícil acesso.

Um robô trepador deve, não só, ser leve mas também apresentar uma elevada capacidade de carga, de forma a reduzir as forças de adesão necessárias e conseguir transportar equipamentos e instrumentos durante a sua navegação. Estas máquinas devem ser capazes de se movimentarem em diferentes tipos de superfícies, com diferentes inclinações, e de passarem de umas superfícies para as outras. Para além disso, devem ser capazes de se adaptarem a diferentes condições ambientais e de se reconfigurarem.

Até à data, já foi dedicado um esforço significativo de investigação ao desenvolvimento destas máquinas e já foram propostos diferentes tipos de modelos experimentais. Os dois aspectos principais a considerar no desenvolvimento de robôs trepadores são os seus métodos de locomoção e adesão.

Relativamente ao tipo de locomoção, são geralmente considerados três tipos de robôs: com segmentos deslizantes, com rodas e com pernas. Quanto ao princípio de adesão às superfícies, os robôs devem ser capazes de produzir uma força elevada utilizando um mecanismo relativamente leve. De acordo com o método de adesão utilizado, estes tipos de

equipamentos são geralmente classificados em quatro grupos: por vácuo ou sucção, os magnéticos, por prensão à superfície e através de propulsão. Recentemente têm vindo a ser propostos novos métodos para assegurar a adesão, baseados em princípios de inspiração biológica.

Este trabalho apresenta um tipo específico de robô trepador, que possui rodas para locomoção e pertence ao grupo dos robôs trepadores magnéticos, relativamente ao princípio de adesão adoptado. A sua diferenciação está associada ao mecanismo utilizado para controlar o sistema magnético de adesão, cujo principal objectivo é otimizar a produção de forças elevadas, e equilibradas, sobre a superfície e minimizar os atritos, independentemente das irregularidades que as superfícies a explorar apresentem. A sua principal aplicação será a utilização com o objectivo de inspecionar diferentes tipos de estruturas ferromagnéticas para, por exemplo, detectar fragilidades devidas à corrosão, nomeadamente em depósitos de combustível, cascos de navios, etc. O robô terá um comportamento semi-autónomo, permitindo um processo de inspecção controlado à distância por um técnico especializado, reduzindo os riscos associados às inspecções em altura e em outros locais onde existem características associadas perigosas para a inspecção directa por humanos.

Palavras-Chave

Robótica, Trepador, Locomoção, Adesão, Magnético.

Abstract

The interest in the development of climbing robots is growing rapidly. Climbing robots are useful devices that can be adopted in a variety of applications like maintenance, building, inspection and safety in the process and construction industries. These systems are mainly adopted in places where direct access by a human operator is very expensive, because of the need for scaffolding, or very dangerous, due to the presence of an hostile environment. The main motivations are to increase the operation efficiency, by eliminating the costly assembly of scaffolding, or to protect human health and safety in hazardous tasks. Climbing robots have already been developed, and are being developed, for applications ranging from cleaning to inspection of difficult to reach constructions.

A wall climbing robot should not only be light but also have large payload, so that it may reduce excessive adhesion forces and carry instrumentations during navigation. These machines should be capable of travelling over different types of surfaces, with different inclinations, such as floors, walls, ceilings, and to walk between such surfaces. Furthermore, they should be able of adapting and reconfiguring for various environment conditions and to be self-contained.

Up to now, considerable research has been devoted to these machines and various types of experimental models have already been proposed. The major two issues in the design of wall climbing robots are their locomotion and adhesion methods.

With respect to the locomotion type, three types are often considered: the frame walking, the wheeled and the legged types. Regarding the adhesion to the surface, the robots should be able to produce a secure gripping force using a light-weight mechanism. According to the adhesion method, these robots are generally classified into four groups: vacuum or suction cups, magnetic, gripping to the surface and propulsion type. Recently, new methods for assuring the adhesion, based in biological findings, have been proposed.

This thesis presents a specific type of climbing robot, which has wheels for locomotion, and belongs to the magnetic climbers robots, based on the principle of adhesion adopted.

Its differentiation is associated with the mechanism used to control the magnetic adhesion system, whose main objective is to optimize the production of high and balanced forces on the surface and minimize friction, regardless of the irregularities that the areas to explore present. Its primary application will be to inspect different types of ferromagnetic structures to, for example, detect weakness due to corrosion, particularly in fuel tanks, ship hulls, etc. The robot will have a semi-autonomous behavior, allowing an inspection process controlled remotely by a technician, reducing the risks associated with direct inspections in height and other characteristics associated with sites where there are hazardous to humans.

Keywords

Robotics, Climbing, Locomotion, Adhesion, Magnetic.

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
ACRÓNIMOS	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	4
1.2. OBJECTIVOS.....	5
1.3. CALENDARIZAÇÃO	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	7
2. ARQUITECTURAS NA ÁREA DOS ROBÔS TREPADORES	9
2.1. APLICAÇÕES DE ROBÔS TREPADORES	9
2.2. PRINCÍPIOS DE LOCOMOÇÃO.....	13
2.3. PRINCÍPIOS DE ADESÃO	22
2.4. ARQUITECTURAS “NÃO CONVENCIONAIS”	46
3. ARQUITECTURA BASE DO ROBÔ	53
3.1. SENSORES E ACTUADORES.....	54
3.2. UNIDADE PROGRAMÁVEL DE CONTROLO	66
4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO TEDI 2010	83
4.1. ARQUITECTURA MECÂNICA.....	83
4.2. SISTEMA ELECTRÓNICO	90
4.3. PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA ROBOTIZADO	102
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	121
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	127
ANEXOS	137

ANEXO A. ESQUEMAS MECÂNICOS	139
ANEXO B. ESQUEMAS ELÉCTRICOS	141
ANEXO C. PROGRAMAS DO PLC E DO SCADA/HMI.....	143
ANEXO D. BIBLIOGRAFIA	145

Índice de Figuras

Figura 1	Robô trepador a efectuar a limpeza da pirâmide de vidro no Museu do Louvre, em Paris, (à esquerda) e robô trepador a efectuar a limpeza da cobertura de vidro do Grand Stade de France (à direita) (fonte: Robosoft, 2010).....	3
Figura 2	Dispositivo para aceder à parte inferior de pontes (à esquerda) (fonte: Berns e Hillenbrand, 2004) e trabalhador a efectuar a manutenção das paredes de um edifício (à direita) (fonte: Balaguer, <i>et al.</i> , 2005).....	10
Figura 3	Fotografia de um robô trepador a efectuar a inspecção dos cordões de soldadura em tanques de armazenamento de produtos petrolíferos (fonte: Fu, <i>et al.</i> , 2006).....	11
Figura 4	Fotografias do robô trepador Skycleaner a efectuar a limpeza das superfícies exteriores envidraçadas no edifício do Museu de Ciência e Tecnologia de Shanghai (fonte: Zhang, <i>et al.</i> , 2004).....	12
Figura 5	Representação em CAD do robô trepador ROBICEN III (à esquerda) e fotografia do robô (à direita) (fonte: Savall, <i>et al.</i> , 1999).....	13
Figura 6	Passos necessários para o robô ROBICEN III efectuar um movimento de translação para a frente (a) e um movimento de rotação (b) (fonte: Savall, <i>et al.</i> , 1999).....	14
Figura 7	Movimento de translação do robô MACS-I (as ventosas representadas a escuro encontram-se presas à superfície) (fonte: Backes, <i>et al.</i> , 1997).....	14
Figura 8	Combinação do movimento de translação e rotação do robô MACS-I (as ventosas representadas a escuro encontram-se presas à superfície) (fonte: Backes, <i>et al.</i> , 1997).....	15
Figura 9	Representação em CAD de um robô trepador com rodas (à esquerda) e o seu aspecto real (à direita) (fonte: Sánchez, <i>et al.</i> , 2006).....	16
Figura 10	Representação esquemática do robô Alicia3 (fonte: Longo e Muscato, 2004a).....	17
Figura 11	Representação esquemática do princípio de locomoção do robô Alicia3, quando necessita de transpor obstáculos (fonte: Cacopardo, <i>et al.</i> , 2003).....	18
Figura 12	Robô trepador bípede RAMR1 (fonte: Tummala, <i>et al.</i> , 2002).....	19
Figura 13	Robô trepador quadrúpede MRWALLSPECT III (fonte: Kang, <i>et al.</i> , 2003).....	20
Figura 14	Robô trepador quadrúpede Hyperion de actuação reduzida (fonte: Yoneda, <i>et al.</i> , 2001).....	20
Figura 15	Robô Hyperion a deslocar-se numa parede (à esquerda) e num tecto (à direita) (fonte: Yoneda, <i>et al.</i> , 2001).....	21
Figura 16	Padrão de locomoção do robô SSC ao deslocar-se em linha recta (à esquerda) e ao curvar (à direita) (fonte: Yano, <i>et al.</i> , 2001).....	21
Figura 17	Robô trepador bípede ROMA II, equipado com múltiplas ventosas em cada pé, a efectuar a transição do solo para uma superfície vertical (fonte: Resino, <i>et al.</i> , 2006).....	22

Figura 18	Estrutura do sistema de ventosas do tipo perscrutador (fonte: Yano, <i>et al.</i> , 2001)	23
Figura 19	Ventosa concêntrica (à esquerda) e ventosa auto-isolante (à direita) (fonte: Rachkov, <i>et al.</i> , 2002)..	24
Figura 20	Ventosas passivas com (à esquerda) e sem (à direita) uma fita para auxiliar a efectuar o desprendimento da superfície (fonte: Brockmann, 2006)	25
Figura 21	Diagrama da estrutura de um robô trepador que recorre à aspiração de ar numa câmara de deslizamento (fonte: Yan, <i>et al.</i> , 1999).....	26
Figura 22	Simulação do robô trepador com o sistema de sete câmaras quando se desloca numa parede vertical sobre uma fenda. As áreas a cinzento mostram as câmaras em que há fugas de pressão. Foi calculado que nas situações III, V e VI o robô se desprende da parede (fonte: Berns e Hillenbrand, 2004)	27
Figura 23	Módulo do rotor de vácuo para gerar a atracção aerodinâmica (à esquerda) e vista explodida do protótipo City-Climber II (à direita) (fonte: Elliot, <i>et al.</i> , 2006)	28
Figura 24	Dois módulos do robô trepador City-Climber II, ligados por uma junta, nas configurações +90° e -90°, capazes de efectuarem transições entre diferentes paredes (à esquerda) e entre uma parede e o tecto (à direita) (fonte: Elliot, <i>et al.</i> , 2006)	29
Figura 25	Robô trepador quadrúpede REST, que recorre a pés com electroímans para aderir a superfícies metálicas (fonte: Armada, <i>et al.</i> , 2005).....	30
Figura 26	Diagrama da estrutura de um robô que recorre a lagartas “magnéticas” para a adesão à superfície (à esquerda) e fotografia do robô a efectuar uma operação de pintura (à direita) (fonte: Yan, <i>et al.</i> , 1999)	31
Figura 27	Estrutura mecânica de um robô que recorre a lagartas “magnéticas” para a adesão à superfície (à esquerda) e detalhe da disposição dos ímanes permanentes nas lagartas (à direita) (fonte: Kalra e Gu, 2006)	32
Figura 28	Robô ROMA I a trepar por uma estrutura metálica (fonte: Balaguer, <i>et al.</i> , 2005).....	33
Figura 29	Princípio de locomoção do robô trepador ASIBOT (fonte: Balaguer, <i>et al.</i> , 2005).....	33
Figura 30	Robô LEMUR IIb trepando uma parede de testes (fonte: Kennedy, <i>et al.</i> , 2006)	34
Figura 31	Robô ASTERISK pendurado numa estrutura do tipo rede (fonte: Inoue, <i>et al.</i> , 2006)	34
Figura 32	Princípio de locomoção do robô ASTERISK (fonte: Inoue, <i>et al.</i> , 2006).....	35
Figura 33	O robô na parede de escalada (fonte: Bell e Balkcom, 2006)	35
Figura 34	Projecto conceptual do robô trepador e nadador FPSO (fonte: Sattar, <i>et al.</i> , 2006).....	36
Figura 35	Robô trepador subindo a parede de vidro de um tanque, sem qualquer reservatório de flutuação (fonte: Sattar, <i>et al.</i> , 2006).....	37
Figura 36	Pé de uma lagartixa quando esta se encontra a subir uma superfície de vidro (fonte: Tørrissen, 2009).....	38
Figura 37	Detalhe do pé de uma lagartixa (fonte: Wikipedia, 2009).....	39
Figura 38	Fotografia do protótipo Tri-Foot Waalbot subindo uma superfície vertical a 90° (fonte: Murphy, <i>et al.</i> , 2006).....	41

Figura 39	Fotografia do protótipo Geckobot (fonte: Unver, <i>et al.</i> , 2006)	42
Figura 40	Detalhe de uma <i>wheg</i> e dos pés do robô trepador Mini-Whegs™ 7, com pés “feitos” de fita-cola de escritório (fonte: Daltorio, <i>et al.</i> , 2006).....	43
Figura 41	Mini-Whegs™ 7 numa superfície vertical de vidro com pés “feitos” de fita-cola de escritório (fonte: Daltorio, <i>et al.</i> , 2006).....	44
Figura 42	Mini-Whegs™ 7 numa superfície vertical de vidro com pés “feitos” de um polímero micro estruturado e uma cauda de 25 cm (a cauda não é visível) (fonte: Daltorio, <i>et al.</i> , 2006).....	44
Figura 43	Vista da secção superior do Spinybot numa parede de betão (à esquerda) e vista detalhada de um dedo do pé (à direita) (fonte: Asbeck, <i>et al.</i> , 2006).....	46
Figura 44	Modelo conceptual de um robô trepador que recorre à propulsão para se deslocar (fonte: Nishi, 1991)	47
Figura 45	Princípio de funcionamento da tecnologia de electroadesão (fonte: SRI International, 2010).....	48
Figura 46	Robô trepador a subir uma parede de tijolo recorrendo à electroadesão (fonte: SRI International, 2010)	49
Figura 47	Robô trepador equipado com um balão a hélio, que consiste num mecanismo de locomoção e numa ferramenta de limpeza (fonte: Elkmann, <i>et al.</i> , 2002).....	50
Figura 48	Robô híbrido efectuando as transições entre trepar, andar e rolar (fonte: Shores e Minor, 2005).....	51
Figura 49	Dois movimentos típicos do robô trepador dinâmico (a trajectória do corpo principal, ao longo do tempo, encontra-se a tracejado) (a) puramente dinâmico (suporte único) e (b) suporte duplo (fonte: Degani, <i>et al.</i> , 2007)	51
Figura 50	Montagem de dois sensores ultra-sónicos, um frontal e outro traseiro, para a funcionalidade de sonar.....	56
Figura 51	Característica do feixe ultra-sónico obtido a partir do sonar	57
Figura 52	<i>Encoder</i> montado nos motores de locomoção.....	58
Figura 53	Quantificação dos impulsos gerados pelo conjunto motor (com caixa redutora) e <i>encoder</i>	58
Figura 54	Sensor do tipo <i>Photomicrosensor</i> , da marca Omron (referência EE-SX672A), montado no sistema de adesão	59
Figura 55	Sensores do tipo indutivo, da marca Efecter (referência IY5049), montados no sistema de adesão	60
Figura 56	Motor com caixa redutora utilizado no Sistema de Locomoção	61
Figura 57	Motor com caixa redutora utilizado no Sistema de Adesão	62
Figura 58	Base deslizante do Sistema de Adesão, com o íman permanente (à esquerda) e os sensores indutivos (à direita).....	63
Figura 59	Íman permanente utilizado em cada Unidade do Sistema de Adesão	63

Figura 60	Curva característica equiparada do íman utilizado para a adesão, numa relação força magnética vs. distância à superfície ferromagnética	64
Figura 61	Medição com um dinamómetro da intensidade da força aplicada pelo Sistema de Adesão.....	64
Figura 62	Íman circular como roda livre paralela à roda de locomoção em borracha.....	65
Figura 63	Características do íman circular R-10-04-05-N, utilizado como auxiliar na aderência do Sistema de Locomoção à superfície de deslocamento do robô	65
Figura 64	O PLC utilizado no robô trepador	68
Figura 65	Os módulos de expansão (à direita) conectados ao controlador base (à esquerda).....	70
Figura 66	O controlador base com um <i>keypad e display</i> (LCD)	70
Figura 67	A árvore da estrutura de menus no LCD <i>display e keypad</i>	71
Figura 68	Representação dos barramentos de E/S no controlador base	71
Figura 69	Configuração funcional dos barramentos de E/S no controlador base	72
Figura 70	Configuração funcional do barramento de entrada na expansão 1762-IQ8	72
Figura 71	Configuração funcional do barramento de saída na expansão 1762-OW8.....	73
Figura 72	Especificações técnicas das entradas analógicas directas do PLC utilizado no protótipo.....	75
Figura 73	Procedimento de ligação dos sonares.....	75
Figura 74	Ligações analógicas possíveis e a utilizada no protótipo (ao centro).....	76
Figura 75	Processo de controlo da velocidade do Sistema de Locomoção por PWM.....	77
Figura 76	Ligação de um PC ao PLC	79
Figura 77	Estrutura de interligação funcional entre as diversas aplicações informáticas.....	80
Figura 78	Supervisão (SCADA – RSVIEW32) do protótipo do robô trepador, a partir de um computador remoto.....	81
Figura 79	A unidade padrão, com o sistema de locomoção (à esquerda) e a estrutura de ajuste da distância do íman permanente à superfície (à direita)	84
Figura 80	Montagem das quatro unidades padrão na base do robô, com a identificação dessas unidades.....	84
Figura 81	Representação esquemática do sistema de ajuste dinâmico da adesão do robô	85
Figura 82	Fotografias da Unidade de Adesão Magnética, com os pormenores relevantes devidamente identificados.....	87
Figura 83	Sistema de locomoção auxiliado por um íman circular móvel.....	88
Figura 84	Sistema de auto-nivelamento do robô face às características da superfície	89
Figura 85	Estrutura base de suporte do robô	89
Figura 86	Arquitectura de controlo dos sistemas do robô trepador.....	90
Figura 87	Diagrama de blocos da distribuição das alimentações em DC presentes no robô trepador.....	91

Figura 88	A placa de circuito impressa utilizada nos circuitos de alimentação DC.....	92
Figura 89	Sistema eléctrico de controlo/protecção e distribuição da alimentação em +24 V DC recebida por conexão eléctrica ao exterior	93
Figura 90	A unidade de conversão DC-DC	94
Figura 91	Circuito lógico da Unidade de Adesão.....	95
Figura 92	Circuito lógico da Unidade de Locomoção	96
Figura 93	Configuração do processo de locomoção rectilínea nos dois sentidos.....	97
Figura 94	Configuração do processo de locomoção não rectilínea nas várias direcções e sentidos.....	98
Figura 95	Montagem do circuito de alimentação em DC sobre o circuito lógico e sua interligação eléctrica	99
Figura 96	Vista superior do robô	100
Figura 97	Vista inferior do robô	101
Figura 98	Os registos de dados do PLC MicroLogix 1100	102
Figura 99	Criação da estrutura de etiquetas associada ao registo de saída.....	104
Figura 100	Criação da estrutura de etiquetas associada ao registo de entradas.....	105
Figura 101	A árvore de projecto visualizada no <i>software</i> de programação RSLogix500	106
Figura 102	Estrutura de programação com uma rotina principal e subrotinas	107
Figura 103	Ciclo de processamento do PLC	108
Figura 104	A funcionalidade atribuída a cada rotina do programa no PLC	109
Figura 105	Processo por <i>token</i> de controlo automático do Sistema de Adesão.....	110
Figura 106	Processo do tipo paralelo de controlo automático do Sistema de Adesão.....	111
Figura 107	Exploração autónoma por temporização	111
Figura 108	Exploração autónoma por distância	112
Figura 109	A interface de comando manual local dos sistemas de adesão e de locomoção	112
Figura 110	Base de dados de etiquetas do SCADA/HMI.....	113
Figura 111	Estrutura de pastas e etiquetas criada na base de dados das etiquetas.....	114
Figura 112	Os gráficos HMI criados na pasta “Graphics/Display”	114
Figura 113	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Geral”	115
Figura 114	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Escolha”	115
Figura 115	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Registo Alarmes”	116
Figura 116	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Auto”	116
Figura 117	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “CFG Geral”	117
Figura 118	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Manual Adesão”	117
Figura 119	Pormenor do comando individual das unidades de adesão no Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Manual Adesão”	118

Figura 120	Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Manual Locomoção”	118
Figura 121	Pormenor das teclas de controlo da direcção da locomoção no Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Manual Locomoção”	119
Figura 122	Pormenor dos “equipamentos” auxiliares à condução manual do robô no Gráfico/ <i>Display</i> HMI “Manual Locomoção”	119

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização do projecto	6
Tabela 2	Conexão das entradas digitais ao PLC e à unidade de expansão.....	74
Tabela 3	Conexão das entradas analógicas ao PLC	75
Tabela 4	Conexão das saídas digitais ao PLC.....	77
Tabela 5	Conexão das saídas digitais à carta de expansão acoplada ao PLC.....	78
Tabela 6	Descrição de cada registo de dados do PLC MicroLogix 1100	103

Acrónimos

AP	–	<i>Access Point</i>
API	–	<i>Application Programming Interface</i>
ATEX	–	<i>ATmosphere EXplosibles</i>
CGR	–	<i>Compliant Gecko Robot</i>
CIP	–	<i>Control-Information-Protocol</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
DCS	–	<i>Distributed Control System</i>
E/S	–	<i>Entradas/Saídas</i>
FDB	–	<i>Function Diagram Blocks</i>
FET	–	<i>Field Effect Transistor</i>
FPSO	–	<i>Floating Production Storage Oil</i>
HMI	–	<i>Human Machine Interface</i>
I/O	–	<i>Inputs/Outputs</i>
JSR	–	<i>Jump to Subroutine</i>
LCD	–	<i>Liquid Crystal Display</i>
LD	–	<i>Ladder Diagram</i>
NEMA	–	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
OPC	–	<i>OLE for Process Control</i>

PC	–	<i>Personal Computer</i>
PCB	–	Printed Circuit Board
PDMS	–	Polydimethyl Siloxane
PLC	–	<i>Programmable Logic Controller</i>
PTO	–	<i>Pulse Train Outputs</i>
PWM	–	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RGR	–	<i>Rigid Gecko Robot</i>
RTD	–	<i>Resistive Thermal Device</i>
RTU	–	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	–	<i>Supervision Control And Data Acquisition</i>
SFC	–	<i>Sequential Function Chart</i>
SONAR	–	<i>Sound Navigation And Ranging</i>
ST	–	<i>Structured Text</i>
TEDI	–	Tese / Dissertação
VPN		<i>Virtual Private Network</i>
VRAM	–	<i>Vortex Regenerative Air Movement</i>

1. INTRODUÇÃO

O interesse no desenvolvimento de robôs trepadores tem crescido rapidamente nos últimos anos. Os robôs trepadores são dispositivos úteis que podem ser adoptados numa variedade de aplicações, tais como na manutenção e inspecção na indústria de processos e na construção civil. Estes sistemas são principalmente apropriados para utilização em locais nos quais o acesso directo por um operador humano seja muito caro, por causa da necessidade de montagem de andaimes, ou muito perigoso, devido à presença de um ambiente hostil. As principais motivações para a sua utilização são o aumento da eficiência nas operações a realizar, eliminando a montagem (dispendiosa) de andaimes, ou a protecção da saúde e segurança humanas na execução de tarefas consideradas perigosas. Diversos robôs trepadores foram já desenvolvidos, e outros estão em fase de desenvolvimento, para aplicações que vão desde a limpeza até à inspecção de construções de difícil acesso (Berns, *et al.*, 2003).

Na literatura encontram-se várias referências a diferentes tipos de máquinas trepadoras que foram desenvolvidas nos últimos anos. Um primeiro ponto a considerar passa pela definição do que é um robô trepador. Relativamente a este trabalho, define-se que um robô trepador é uma máquina, ou veículo, programável capaz de se deslocar em superfícies verticais ou invertido, isto é, “de pernas para o ar”. Tendo por base esta definição, uma

máquina programável com capacidade de locomoção muito flexível, capaz de se deslocar em terrenos muito irregulares e íngremes, não é considerada um robô trepador (tais como as máquinas desenvolvidas por Fujiki, *et al.* (2005) e Montes, *et al.* (2005), que para trepar necessitam de um cabo que as auxilie nessa tarefa).

Um robô trepador não deve ser apenas leve, de modo a que se possam reduzir as forças de adesão necessárias (Yoneda, *et al.*, 2001), mas deve também apresentar uma capacidade de carga elevada, de forma a possibilitar o transporte (durante a navegação) da instrumentação e equipamento auxiliar para a realização das tarefas a que se destina (Gimenez, *et al.*, 2001). Estas máquinas devem ser capazes de se deslocarem sobre diferentes tipos de superfícies, com inclinações diferentes, tais como pisos, paredes e tectos, e movimentarem-se entre estas superfícies (Armada e Gonzales de Santos, 2001; Weise, *et al.*, 2001; Sattar, *et al.*, 2002; Elliot, *et al.*, 2006). Para além disso, devem ser capazes de se adaptarem e reconfigurarem em função das diversas condições do ambiente em que se encontram e serem, na medida do possível, auto-suficientes.

Até à data, já foi dedicado um esforço de investigação considerável a este tipo de máquinas, e vários tipos de modelos experimentais foram já propostos. De acordo com Chen, *et al.* (2006), mais de 200 protótipos que visam tais aplicações foram desenvolvidas em todo o mundo até ao ano de 2006. No entanto, é de realçar que a aplicação prática de robôs trepadores, fora do ambiente laboratorial, ainda é muito limitada (Armada e Gonzales de Santos, 2001). Excluindo um reduzido número de produtos industrializados bem sucedidos (Fraunhofer IFF, 2010; Robosoft, 2010), dois dos quais se podem observar na Figura 1, a maioria são apenas protótipos, e poucos deles podem ser encontrados em uso corrente, devido ao seu desempenho algo insatisfatório em testes no ambiente local, relativamente a aspectos como a sua velocidade, o custo e a fiabilidade. Chen, *et al.* (2006) apresentam os principais problemas de projecto que afectam significativamente o desempenho dos sistemas de robôs trepadores e sugerem também possíveis soluções para os problemas identificados.

As duas principais questões envolvidas na concepção e projecto de robôs trepadores, são os seus métodos de locomoção e de adesão às superfícies.



Figura 1 Robô trepador a efectuar a limpeza da pirâmide de vidro no Museu do Louvre, em Paris, (à esquerda) e robô trepador a efectuar a limpeza da cobertura de vidro do Grand Stade de France (à direita) (fonte: Robosoft, 2010)

No que diz respeito ao tipo de locomoção, são geralmente considerados três tipos: os robôs que recorrem a segmentos deslizantes, os que se movem recorrendo a rodas e os que utilizam pernas para a locomoção. Embora os robôs de segmentos deslizantes sejam capazes de se moverem de forma relativamente rápida, não são adequados para serem aplicados em ambientes/superfícies muito irregulares. Os robôs com rodas conseguem unicamente deslocar-se em superfícies com pequenas irregularidades, deslocando-se a velocidades relativamente elevadas. Por outro lado, os robôs com pernas lidam facilmente com os obstáculos encontrados no meio ambiente, ao passo que sua velocidade é geralmente menor e exigem sistemas de controlo muito complexos.

Em relação à adesão à superfície, os robôs devem ser capazes de produzir uma força de preensão suficiente e necessária para garantir que o veículo se move em segurança, recorrendo a um mecanismo de peso relativamente reduzido. No que concerne ao método de adesão, os robôs trepadores são geralmente classificados em quatro grupos: os que recorrem à força de sucção, aspiração ou ao vácuo, os que fazem uso das forças magnéticas, os que utilizam a preensão à superfície e os que baseiam a sua adesão na força de propulsão. No entanto, recentemente foram propostos novos métodos, de inspiração biológica, para garantir a adesão, baseados em investigação que tem vindo a ser desenvolvida na área da biologia.

O princípio de adesão baseado na criação de uma depressão ou vácuo, apresenta como principais características o facto dos mecanismos envolvidos serem leves e fáceis de controlar, embora possa apresentar o problema do fornecimento de ar comprimido, além do

ruído gerado. Uma alternativa, com custos em termos de peso, é a adopção de uma bomba de vácuo. A adesão baseada nos princípios do magnetismo, implica actuadores pesados e só pode ser usada em superfícies com características ferromagnéticas. A utilização da prensão à superfície para efeitos de adesão implica que as superfícies nas quais estes robôs se movimentam apresentem características muito próprias que facilitem a sua prensão. Os robôs que recorrem à força de propulsão fazem uso das forças desenvolvidas por propulsores para poderem aderir às superfícies, mas são utilizados em aplicações muito restritas e específicas, principalmente em aplicações submersas.

A organização dos robôs trepadores apresentada neste trabalho, de acordo com os seus métodos de locomoção e adesão às superfícies, não é consensual. Há autores que classificam os métodos de locomoção e adesão às superfícies destas máquinas de acordo com outras categorias e especificações (Berns, *et al.*, 2003; Schraft, *et al.*, 2003; Degani, *et al.*, 2007; Longo e Muscato, 2008).

É de realçar, que existem ainda diversos robôs que têm sido desenvolvidos para a inspecção interna de tubos e tubagens, e que, em certas situações em que estes tubos se apresentam na vertical, são também capazes de trepar pelo interior destas tubagens (Hertzberg, *et al.*, 1998; Gradetsky, *et al.*, 2002; Sun, *et al.*, 2003; Gradetsky, *et al.*, 2003; Ferreira e Fontaine, 2002; Zagler e Pfeiffer, 2003). Estes robôs são considerados como sendo uma classe autónoma e com requisitos e características muito próprias (Myers, 2001).

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este trabalho surge na sequência da avaliação do candidato, António Luís da Costa Oliveira, à disciplina de Tese/Dissertação (TEDI), do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, ramo de Automação e Sistemas, no Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, associada ao seu interesse e motivação para desenvolver projectos na área da robótica. Assim, surge integrado no referido curso de Mestrado e ramo, cumprindo os requisitos que constam da proposta de trabalho para a referida disciplina, e cujo título é: “Construção de um Robô Trepador com Locomoção através de Rodas e Adesão através de Meios Magnéticos”, além de pertencer a uma área de pesquisa e desenvolvimento de elevada importância, e interesse futuro, em várias vertentes com espaço para a aplicação dos robôs do tipo trepador.

1.2. OBJECTIVOS

Este trabalho tinha como objectivo principal estudar e implementar um protótipo de um robô trepador com locomoção através de rodas, e recorrendo a ímanes permanentes para a adesão às superfícies. Este robô trepador do tipo magnético possui como aspecto técnico diferenciador em relação a outros, um sistema dinâmico de ajuste posicional dos ímanes em relação às superfícies, para compensar as irregularidades destas, otimizando a produção de forças elevadas e atritos baixos.

Os objectivos parciais, a atingir com este trabalho, passavam por desenvolver e completar com sucesso as seguintes acções:

1. Efectuar um levantamento do estado da arte na área dos robôs trepadores para tarefas de inspecção, identificando os principais projectos em decurso, ou recentemente terminados, nesta área;
2. Analisar os protótipos desenvolvidos nestes projectos em termos de arquitectura mecânica, técnicas de construção, sensores e actuadores utilizados e arquitecturas de controlo implementadas;
3. Efectuar um esboço da arquitectura que o protótipo a desenvolver deveria apresentar;
4. Desenvolver o protótipo de robô trepador;
5. Efectuar testes de locomoção em estruturas metálicas verticais, analisando a capacidade de locomoção e adesão à superfície do robô, tendo em consideração as suas capacidades de detecção e desvio de obstáculos.

O importante era identificar os objectivos que foram atingidos e quais não foram, sem esquecer o porquê, de forma a eliminar ou reduzir as causas para o incumprimento.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

O plano do trabalho previa o desenvolvimento e teste de um protótipo de robô trepador que obedecesse aos requisitos presentes na proposta de Tese/Dissertação, a elaboração de um relatório que satisfizesse, parcialmente, os requisitos da Ficha da Disciplina e a posterior

apresentação pública de todo o trabalho realizado. A sua prossecução implicou a elaboração de uma tabela (Tabela 1) com uma calendarização exaustiva de todo o projecto.

Tabela 1 Calendarização do projecto

Identificação		Duração em Semanas	Planificação em Semanas													
ID	Nome das Etapas		(1-4)	(5-8)	(9-12)	(13-16)	(17-20)	(21-24)	(25-28)	(29-32)	(33-36)	(37-40)	(41-44)	(45-48)	(49-52)	(53-56)
1	Estudo dos requisitos definidos na proposta de trabalho para TEDI e definição dos objectivos necessários para a realização desse trabalho.	1	←													
2	Levantamento do estado da arte na área dos robôs trepadores, em geral, e dos robôs com locomoção por rodas e adesão magnética, em particular.	12	←	→												
3	Análise e selecção do <i>hardware</i> , sensores/actuadores e controlador, a utilizar para a construção do protótipo de robô trepador.	6			←	→										
4	Desenvolvimento e construção de uma unidade de adesão normalizada, permitindo posteriormente a sua duplicação em número necessário às necessidades do protótipo.	4				←	→									
5	Ensaio com a unidade de adesão normalizada, em superfícies magnéticas dispostas verticalmente, com o objectivo de corrigir e melhorar o modelo elaborado.	2					←	→								
6	Trabalhos de maquinação e montagem de uma estrutura resistente e leve, que sirva de base para montagem do protótipo, já com as 4 unidades de adesão aplicadas e posicionadas.	8						←	→							
7	Estudo da melhor disposição para a montagem dos circuitos eléctricos e electrónicos sobre e sob a base de montagem do protótipo. Construção de todas as Placas de Circuito Impresso (PCI).	6								←	→					
8	Finalização dos trabalhos mecânicos e preparação do protótipo para receber todo o hardware eléctrico necessário.	1											←	→		
9	Instalação de todo o <i>hardware</i> necessário, sensores/actuadores, PCI, controlador PLC, etc., e execução dos trabalhos de electrificação necessários.	6										←	→			
10	Execução de alguns ensaios dinâmicos. Analisar o comportamento do protótipo para identificar algumas modificações que sejam necessárias e efectuar as correcções necessárias.	2												←	→	
11	Definir todas as funcionalidades disponibilizadas pelo protótipo, face às possibilidades inerentes ao hardware instalado. Programar o PLC e o HMI para permitir a utilização dessas funcionalidades.	8													←	→
12	Executar os teste finais, em condições reais, identificando possíveis erros na programação e efectuar as correcções necessárias.	3														←
13	Redigir a Tese de Dissertação.	56	←	→												

1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Tendo em consideração os factos referidos nas secções anteriores, este trabalho apresenta um levantamento de diferentes aplicações de robôs trepadores e das tecnologias adoptadas para a implementação da sua locomoção e adesão às superfícies, abordando também as tecnologias não convencionais, que têm vindo a ser desenvolvidas recentemente para cumprir estes objectivos. São também apresentados todos os passos necessários para a construção de um protótipo, que obedecerá aos requisitos estabelecidos na proposta de Tese/Dissertação.

Tendo estas ideias em mente, a presente Tese de Dissertação de Mestrado encontra-se organizada da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução relativamente ao âmbito de todo o trabalho a executar e ao contexto em que este se encontra inserido.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte na área dos robôs trepadores, identificando várias arquitecturas, convencionais ou não, e aplicações de robôs trepadores, evidenciando os principais meios de locomoção e adesão às superfícies utilizados.

Os dois capítulos seguintes são inteiramente dedicados à descrição exhaustiva do protótipo desenvolvido. O terceiro capítulo foca-se na arquitectura planeada para o protótipo, nomeadamente o tipo de componentes base considerados, incluindo os sensores, os actuadores e a unidade programável de controlo lógico do robô trepador. O quarto capítulo está orientado para a descrição dos pormenores construtivos do protótipo, ao nível da arquitectura e sistemas utilizados.

Finalmente, o Capítulo 5 é um exercício conclusivo associado a todo o trabalho desenvolvido nesta Tese/Dissertação, e um olhar para o futuro deste protótipo, nomeadamente na capacidade que este terá para evoluir em direcção a um melhor comportamento dinâmico face às suas possíveis aplicações.

2. ARQUITECTURAS NA ÁREA DOS ROBÔS TREPADORES

A necessidade de realização de tarefas periódicas de inspecção em estruturas de grande dimensão, construídas pelo homem, tem vindo a criar a necessidade de se desenvolverem meios automatizados para a realização dessas tarefas, eliminando dessa forma a montagem de andaimes (tarefa cara) ou a utilização de trabalhadores humanos, geralmente trabalhando suspensos (tarefa perigosa).

Uma das formas de se implementarem estas tarefas de inspecção é recorrendo a robôs do tipo trepador, capazes de subirem por estas estruturas, graças ao seu meio de locomoção e adesão à superfície. Estas máquinas trepadoras, quer sejam autónomas ou operadas remotamente, encontram-se muitas vezes equipadas com dispositivos do tipo não-destrutivo para inspecção de diversos defeitos e irregularidades que podem ocorrer nas referidas estruturas.

2.1. APLICAÇÕES DE ROBÔS TREPADORES

A aplicação de robôs trepadores é indicada especialmente para locais onde o acesso directo por um operador humano é muito dispendioso, por causa da necessidade de instalação de

andaimas ou estruturas especiais, ou muito perigoso, devido à presença de um ambiente hostil e de elevado risco em possíveis acidentes de trabalho (Figura 2).

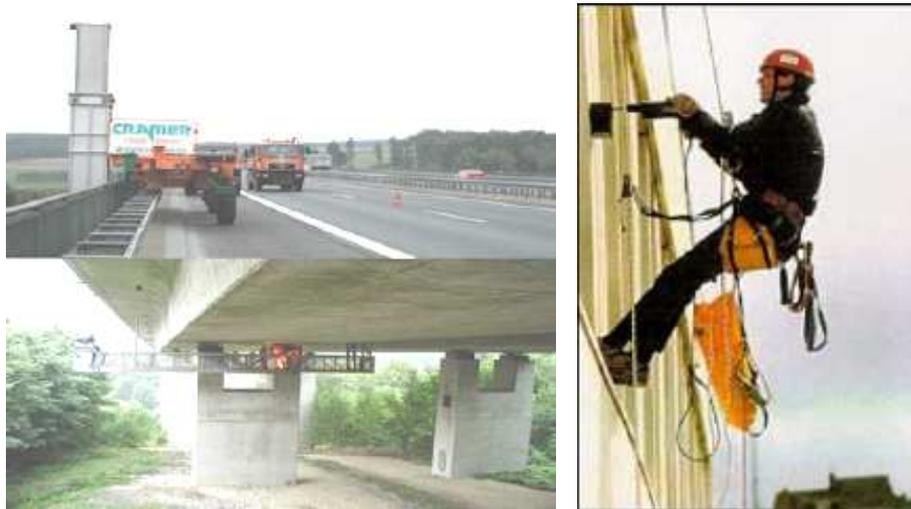


Figura 2 Dispositivo para aceder à parte inferior de pontes (à esquerda) (fonte: Berns e Hillenbrand, 2004) e trabalhador a efectuar a manutenção das paredes de um edifício (à direita) (fonte: Balaguer, *et al.*, 2005)

Nas últimas décadas, têm sido vislumbradas diversas aplicações para estes robôs, principalmente nas áreas da limpeza, inspeção técnica, manutenção ou detecção de avarias em ambientes perigosos, ou no exterior de edifícios altos e outras construções humanas (Armada e Gonzales de Santos, 2001; Sattar, *et al.*, 2003; Berns, *et al.*, 2003).

Vários protótipos de robôs trepadores foram já desenvolvidos, ou a sua utilização foi proposta, para as seguintes áreas de aplicação:

- **Construção e Reparação:** manutenção e reparação de edifícios (Armada e Gonzales de Santos, 2001; Balaguer, *et al.*, 2005; Dobroczynski, *et al.*, 2001), construção e reparação de cascos de navios (Armada e Gonzales de Santos, 2001; Armada, *et al.*, 2002; Vincze, *et al.*, 2001) e construção aeroespacial (Alexander, *et al.*, 2003);
- **Inspeção:** pontes (Pack, *et al.*, 1997; Weise, *et al.*, 2001; Berns e Hillenbrand, 2004; Balaguer, *et al.*, 2005), estruturas metálicas complexas (Gimenez, *et al.*, 2001), paredes de edifícios/estruturas de altura elevada (Nishi, 1991; Yano, *et al.*, 2001; Dobroczynski, *et al.*, 2001; Kozłowski, *et al.*, 2002; Berns e Hillenbrand, 2004; Elliot, *et al.*, 2006), barragens (Weise, *et al.*, 2001; Berns e Hillenbrand, 2004; Longo e Muscato, 2004b), tanques de armazenamento em centrais nucleares (Yan, *et al.*, 1999;

Savall, *et al.*, 1999; Sattar, *et al.*, 2003), fornalhas e câmaras de vapor em centrais termoeléctricas (Bozzetti, *et al.*, 2003), oleodutos (Hosokai e Hara, 2001; Armada, *et al.*, 2002; Park, *et al.*, 2003), geradores eólicos (Rodríguez, *et al.*, 2008), centrais solares de produção de energia (Azaiz, 2008), reservatórios ou tanques de gás ou de petróleo (Yan, *et al.*, 1999; Armada, *et al.*, 2002; Sattar, *et al.*, 2002; Longo e Muscato, 2002; Sattar, *et al.*, 2003; Park, *et al.*, 2003; Longo e Muscato, 2004b), plataformas no mar alto (Balaguer, *et al.*, 2005), cordões de soldadura em cascos de navios (Mondal, *et al.*, 2002) e em asas e fuselagem de aviões (Sattar, *et al.*, 2003; Alexander, *et al.*, 2003; Sheng, *et al.*, 2005);

- **Teste:** posicionamento de sensores em barragens e estruturas de betão de grandes dimensões (Weise, *et al.*, 2001), realização de ensaios não destrutivos em estruturas industriais (Choi, *et al.*, 2000; Kang, *et al.*, 2003), reservatórios ou tanques de gás ou de petróleo (Rosa e Sinatra, 2003; Kalra e Gu, 2006; Fu, *et al.*, 2006) (Figura 3), tanques flutuantes de armazenamento da produção de petróleo (Sattar, *et al.*, 2006; Sattar, *et al.*, 2008), aviões (Backes, *et al.*, 1997; Pack, *et al.*, 1997; Chen, *et al.*, 2005) e navios (Pack, *et al.*, 1997; Armada, *et al.*, 2005; Sánchez, *et al.*, 2006);



Figura 3 Fotografia de um robô trepador a efectuar a inspecção dos cordões de soldadura em tanques de armazenamento de produtos petrolíferos (fonte: Fu, *et al.*, 2006)

- **Limpeza:** operações de limpeza em arranha-céus (Yan, *et al.*, 1999; Armada e Gonzales de Santos, 2001; Zhu, *et al.*, 2003; Gao e Kikuchi, 2004), em edifícios com grandes superfícies em vidro (Derriche e Kouiss, 2002; Elkmann, *et al.*, 2002; Liu, *et*

al., 2003; Zhang, *et al.*, 2004) (Figura 4), em janelas (Schraft, *et al.*, 2003), para a limpeza das paredes e tectos de restaurantes, cozinhas, cantinas comunitárias e ambientes industriais de preparação de alimentos (Cepolina, *et al.*, 2004) e limpeza de cascos de navios (Akinfiev e Armada, 2001; Armada e Gonzales de Santos, 2001; Armada, *et al.*, 2002; Fernandez, *et al.*, 2002);



Figura 4 Fotografias do robô trepador Skycleaner a efectuar a limpeza das superfícies exteriores envidraçadas no edifício do Museu de Ciência e Tecnologia de Shanghai (fonte: Zhang, *et al.*, 2004)

- **Manutenção:** operações de decapagem por projecção de areia e pintura à pistola em reservatórios de petróleo (Yan, *et al.*, 1999);
- **Transporte:** para o transporte de cargas no interior de edifícios (Minor, *et al.*, 2000);
- **Segurança:** para reconhecimento em áreas urbanas (Tummala, *et al.*, 2002; Elliot, *et al.*, 2006) e em actividades anti-terroristas (Li, *et al.*, 2007) e militares (SRI International, 2010);
- **Educação:** realização de competições de robôs trepadores, como forma de encorajar o ensino e aprendizagem em Engenharia (Longo e Muscato, 2003; Armada, 2003; Berns, *et al.*, 2005; Bell e Balkcom, 2006).

Por último, a sua aplicação também foi proposta em áreas relacionadas com a assistência a humanos (Balaguer, *et al.*, 2005) e em acções de prevenção e combate a incêndios (Nishi, 1991; Chen, *et al.*, 2006).

Para cada aplicação específica prevista para estes robôs, das mencionadas acima ou outras, eles são normalmente equipados com ferramentas, isto é sensores e actuadores finais,

dedicadas, de forma a ser possível realizarem os diferentes tipos de tarefas para as quais são desenvolvidos.

Tendo em mente estas possíveis aplicações, nas secções seguintes apresentam-se as principais estratégias para o desenvolvimento deste tipo de máquinas, com um enfoque particular nas tecnologias adoptadas para a sua locomoção e adesão às superfícies que os robôs devem trepar.

2.2. PRINCÍPIOS DE LOCOMOÇÃO

Nesta secção são analisadas as características das três principais tecnologias de locomoção aplicadas a robôs trepadores, nomeadamente os segmentos deslizantes, as rodas e as pernas.

2.2.1. LOCOMOÇÃO RECORRENDO A SEGMENTOS DESLIZANTES

Relativamente ao tipo de locomoção, as alternativas mais simples fazem muitas vezes uso de chassis ou segmentos deslizantes, com ventosas ou electroímãs que se agarram às superfícies, a fim de efectuar o deslocamento (Figura 5 e Figura 6). Estes robôs são, por vezes, também denominados por estruturas que andam (da terminologia Anglo-Saxónica *frame walking*) e podem ser encarados como uma versão simplificada da locomoção através de pernas.

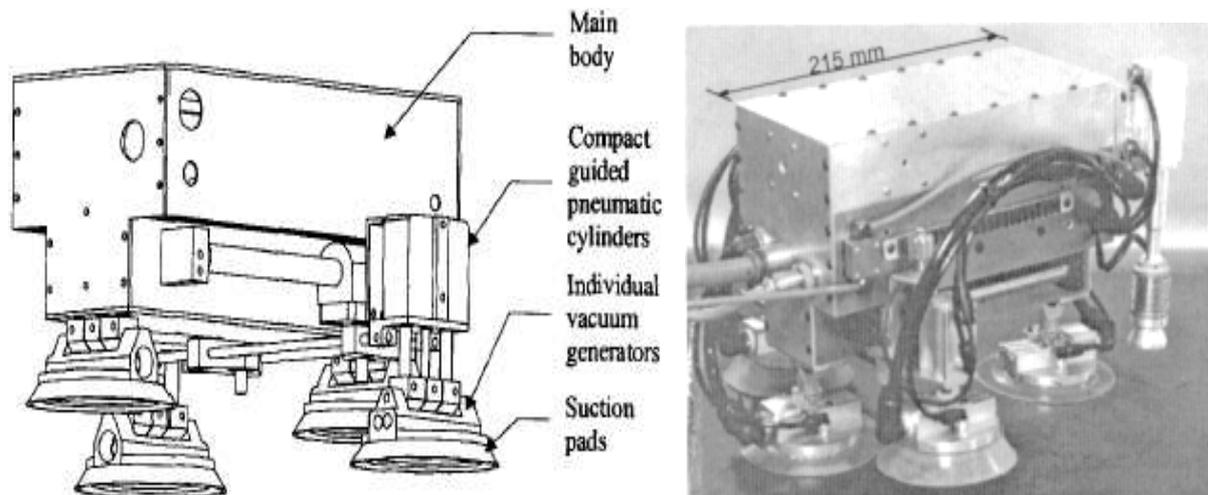


Figura 5 Representação em CAD do robô trepador ROBICEN III (à esquerda) e fotografia do robô (à direita) (fonte: Savall, *et al.*, 1999)

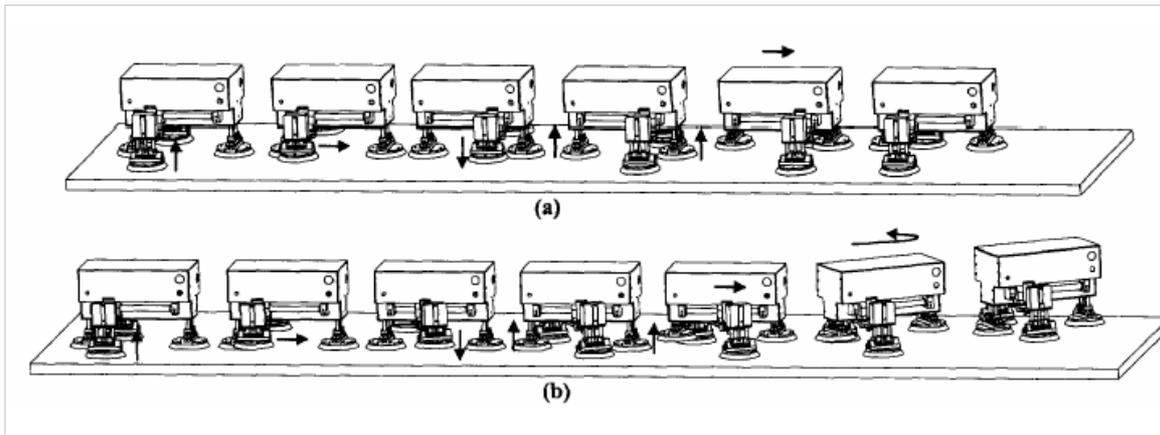


Figura 6 Passos necessários para o robô ROBICEN III efectuar um movimento de translação para a frente (a) e um movimento de rotação (b) (fonte: Savall, *et al.*, 1999)

Tipicamente estas máquinas apresentam um chassis baseado em duas estruturas que apresentam a possibilidade de deslizamento entre elas. Quando uma delas se encontra fixa à superfície, através de ventosas (Backes, *et al.*, 1997; Savall, *et al.*, 1999; Choi, *et al.*, 2000; Dobroczyński, *et al.*, 2001; Elkmann, *et al.*, 2002; Jatsun, *et al.*, 2002; Derriche e Kouiss, 2002; Kozlowski, *et al.*, 2002; Rachkov, *et al.*, 2002; Rosa e Sinatra, 2003; Jatsun, *et al.*, 2003; Zhu, *et al.*, 2003; Zhang, *et al.*, 2004; Cepolina, *et al.*, 2004), ou meios magnéticos, a outra estrutura pode ser recolhida (ou seja afastada da superfície em que o robô se move), e deslizar relativamente à que se encontra fixa, na direcção pretendida para o movimento. Após terminar o movimento relativo entre as duas estruturas, a que esteve em movimento aproxima-se da superfície, estabelecendo o contacto com esta e gerando as forças de adesão que permitam manter o robô seguro/fixo. Neste momento, o ciclo de locomoção repete-se com a inversão dos papéis das duas estruturas (ver Figura 7).

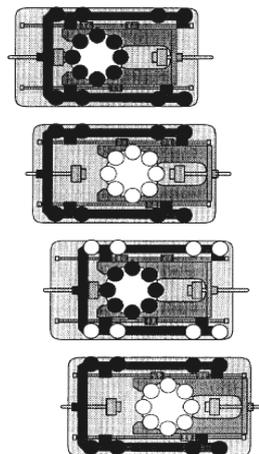


Figura 7 Movimento de translação do robô MACS-I (as ventosas representadas a escuro encontram-se presas à superfície) (fonte: Backes, *et al.*, 1997)

Nestes veículos é também frequente a utilização de um grau de liberdade actuado adicional, de forma a permitir a rotação entre as duas estruturas, possibilitando a mudança de direcção do robô (ver Figura 8).

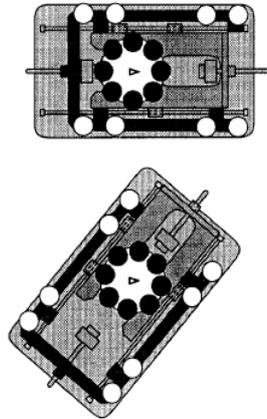


Figura 8 Combinação do movimento de translação e rotação do robô MACS-I (as ventosas representadas a escuro encontram-se presas à superfície) (fonte: Backes, *et al.*, 1997)

A principal desvantagem desta solução é a dificuldade em atravessar as eventuais fendas, rachaduras e obstáculos de grandes dimensões que possam surgir no percurso do veículo.

Por último, é importante referir um robô trepador desenvolvido por Liu, *et al.* (2003), que implementa a locomoção através de uma estrutura deste tipo, mas que para avançar recorre a rodas que se fixam a ambos os lados de calhas para assegurar, simultaneamente, a prensão à superfície e o deslocamento das estruturas.

2.2.2. LOCOMOÇÃO RECORRENDO A RODAS

Outra forma de locomoção para estas máquinas passa pela utilização de rodas (Yan, *et al.*, 1999; Akinfiiev e Armada, 2001; Weise, *et al.*, 2001; Sattar, *et al.*, 2002; Mondal, *et al.*, 2002; Longo e Muscato, 2002; Bozzetti, *et al.*, 2003; Alexander, *et al.*, 2003; Schraft, *et al.*, 2003; Park, *et al.*, 2003; Gao e Kikuchi, 2004; Longo e Muscato, 2004b; Elliot, *et al.*, 2006; Sánchez, *et al.*, 2006), sendo frequente, neste caso, a adopção de ímanes do tipo permanentes (Figura 9) ou da força de sucção para assegurar a adesão do veículo à superfície.

No caso da utilização de rodas para implementar a locomoção, é frequente que o veículo apresente só duas rodas motrizes e uma roda passiva livre, numa estrutura em triciclo (Figura 9) (Akinfiiev e Armada, 2001; Longo e Muscato, 2002; Berns, *et al.*, 2003; Berns, *et al.*, 2005; Sánchez, *et al.*, 2006), uma vez que a utilização de veículos com quatro ou mais rodas implica

a adoção de um sistema de nivelamento que garanta que todas as rodas se encontram sempre em contacto com a superfície, mesmo que esta apresente grandes irregularidades (Berns, *et al.*, 2003).

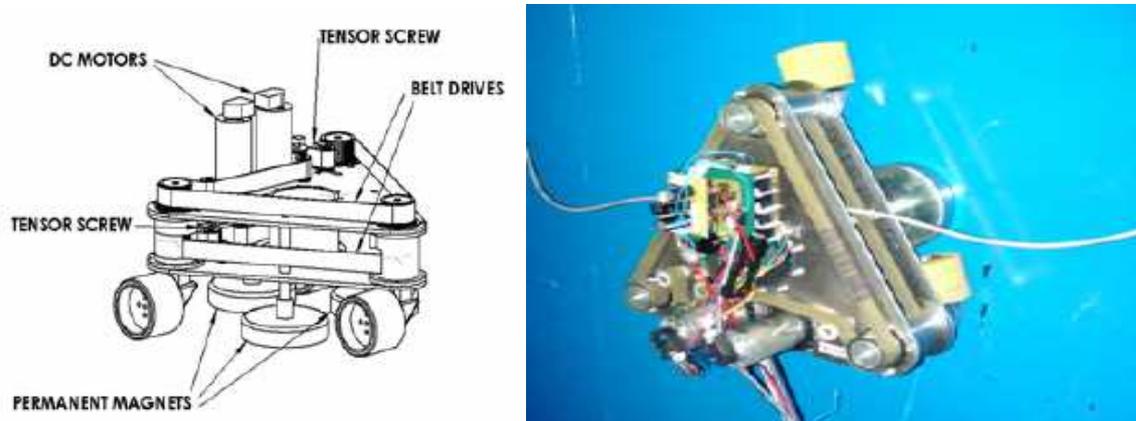


Figura 9 Representação em CAD de um robô trepador com rodas (à esquerda) e o seu aspecto real (à direita) (fonte: Sánchez, *et al.*, 2006)

Em casos mais raros, existem robôs que se deslocam com rodas mas que se agarram à superfície em que se deslocam para garantir uma adesão melhorada (Hosokai e Hara, 2001).

Estes robôs podem atingir com facilidade velocidades relativamente elevadas, quando comparados com os veículos que recorrem a outras estratégias para implementar a locomoção, mas apresentam limitações na transposição de obstáculos que surjam na superfície.

Assim, alguns dos robôs com rodas que utilizam ímanes permanentes para a adesão à superfície, apresentam problemas na locomoção e dificuldades de controlo da adesão à superfície. Caso esta não seja plana ou apresente várias irregularidades, a variação da distância dos ímanes permanentes à superfície de adesão leva a uma variação da força de adesão magnética, segundo a curva característica: força magnética *vs.* distância à superfície, associada aos ímanes permanentes utilizados. Esta variação pode, no limite, ser insuficiente para garantir uma adesão perfeita e contínua do robô à superfície, fazendo com que este se desprenda, ou, no limite oposto, provocar o contacto dos ímanes com a superfície, aumentando drasticamente a força de atrito e dificultando, ou impedindo por completo, o movimento e a locomoção do veículo (Akinfiiev e Armada, 2001; Bozzetti, *et al.*, 2003). Este também pode apresentar problemas de locomoção associados ao ausente, ou deficiente, contacto com a superfície de uma ou mais rodas, resultante do desnivelamento e/ou irregularidade desta.

Também no caso dos robôs com rodas que utilizam a força de sucção para a adesão à superfície, surgem dificuldades de controlo. Estes veículos necessitam de manter e garantir um determinado espaçamento entre a superfície onde se estão a mover e a base do robô. Esta técnica pode criar problemas, quer com a perda de pressão, ou com o atrito na superfície, nomeadamente se o espaçamento for muito pequeno, ou se for utilizado algum tipo de material para minimizar as fugas de pressão (Hirose, *et al.*, 1991).

Como forma de ultrapassar a limitação que estes veículos apresentam na transposição de obstáculos, Longo e Muscato (2002) propõem o desenvolvimento de um robô modular, que denominaram Alicia3, baseado no robô com locomoção por rodas Alicia II (na Figura 10 é possível ver uma representação esquemática do robô Alicia3, constituído por três módulos Alicia II).

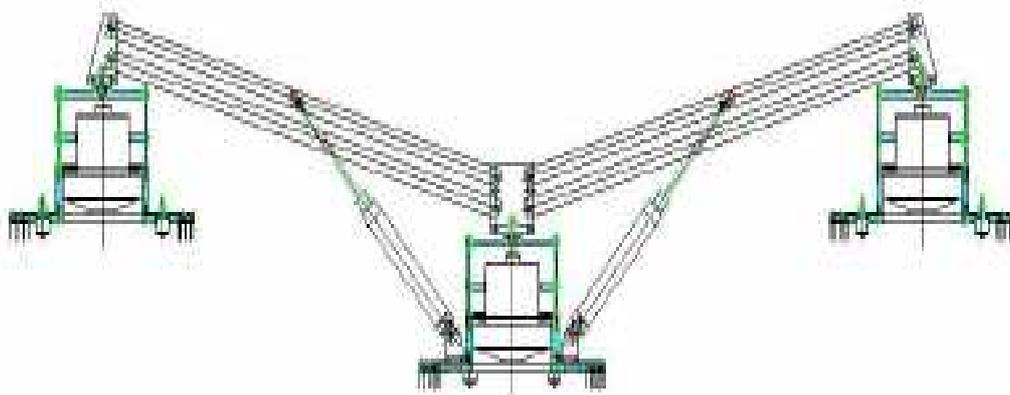


Figura 10 Representação esquemática do robô Alicia3 (fonte: Longo e Muscato, 2004a)

É possível constatar que este sistema resulta da junção de três módulos Alicia II, através de duas ligações com articulações nas extremidades, que são actuadas por dois cilindros pneumáticos.

Na ausência de obstáculos o sistema move-se fazendo uso de todas as rodas, ou seja, com todos os módulos Alicia II em contacto com a superfície (Figura 11, representação mais à esquerda). Quando é detectado no trajecto do veículo um obstáculo com uma altura superior a 1 cm, o sistema afasta os módulos Alicia II da superfície, um a um, de forma a transpor o obstáculo movendo a correspondente ligação de cada um dos módulos extremos, como se pode observar na Figura 11. Para separar o módulo central, o sistema move as duas ligações simultaneamente.

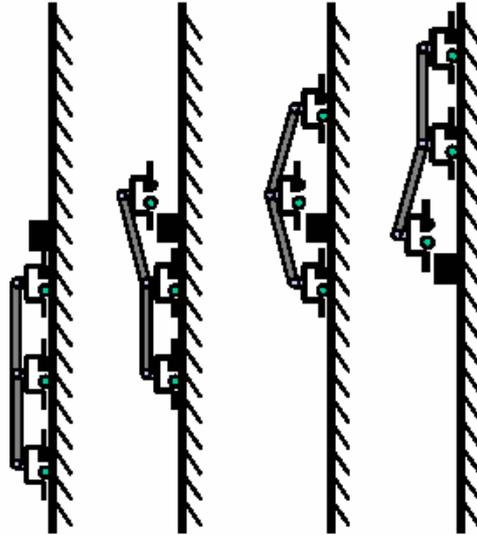


Figura 11 Representação esquemática do princípio de locomoção do robô Alicia3, quando necessita de transpor obstáculos (fonte: Cacopardo, *et al.*, 2003)

Adicionalmente, cada um dos módulos pode efectuar uma rotação em relação às ligações entre eles, de forma a possibilitar o movimento em qualquer direcção.

2.2.3. LOCOMOÇÃO RECORRENDO A PERNAS

Uma terceira forma de locomoção consiste na adopção de pernas. Os robôs trepadores com pernas, equipados com ventosas (Yano, *et al.*, 2001; Sattar, *et al.*, 2003), ou dispositivos magnéticos nos pés (Prieto, *et al.*, 2001; Armada, *et al.*, 2005), têm a desvantagem de apresentarem baixa velocidade e requererem sistemas de controlo muito complexos (Schraft, *et al.*, 2003), mas permitem a criação de uma força de adesão à superfície forte e estável. Estas máquinas também têm a vantagem de lidar facilmente com os obstáculos (ou fendas) encontrados no ambiente, através da capacidade de selecção dos locais apropriados para posicionar os pés (Hirose, *et al.*, 1991).

Estruturas com duas até oito pernas são predominantes para o desenvolvimento destes equipamentos. A adopção de um número maior de membros fornece pontos de suporte redundantes e, muitas vezes, aumenta a capacidade de carga e a segurança associada ao equipamento. Estas vantagens são conseguidas à custa de uma maior complexidade de controlo (no que diz respeito à coordenação das pernas), tamanho e peso. Portanto, quando o tamanho e a eficiência são críticos, uma estrutura com peso e complexidade mínimas é mais adequada.

Pelas razões indicadas, a estrutura bípede é uma excelente candidata à implementação de robôs trepadores (a título de exemplo, é apresentado na Figura 12 o robô RAMR1). Actualmente há muitos robôs bípedes com a capacidade de subir aos mais diversos tipos de superfícies com diferentes inclinações (Pack, *et al.*, 1997; Yano, *et al.*, 2001; Gimenez, *et al.*, 2001; Tummala, *et al.*, 2002; Krosuri e Minor, 2003; Xiao, *et al.*, 2003; Xiao, *et al.*, 2004; Shores e Minor, 2005; Armada, *et al.*, 2005; Balaguer, *et al.*, 2005; Brockmann, 2006; Resino, *et al.*, 2006).

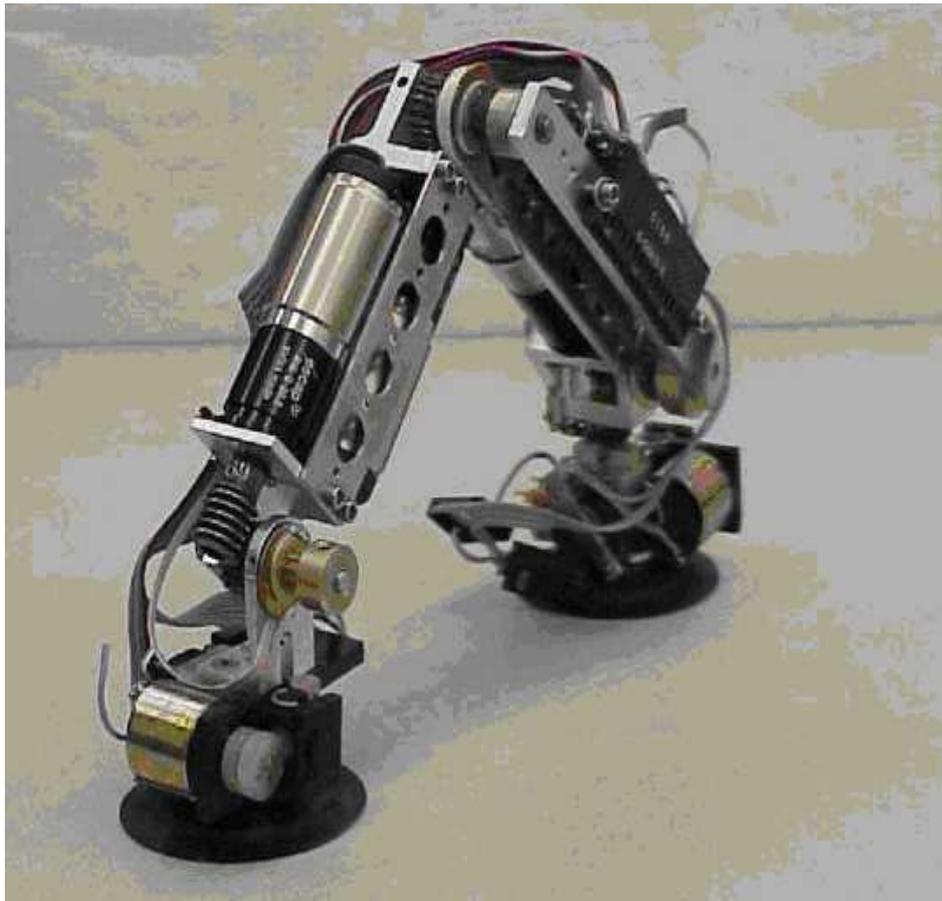


Figura 12 Robô trepador bípede RAMR1 (fonte: Tummala, *et al.*, 2002)

Quando é necessária maior segurança e/ou capacidade de carga, são adoptadas estruturas quadrúpedes (Hirose, *et al.*, 1991; Hirose e Arikawa, 2000; Yoneda, *et al.*, 2001; Dabrowski, *et al.*, 2001; Prieto, *et al.*, 2001; Kang, *et al.*, 2003; Armada, *et al.*, 2005; Daltorio, *et al.*, 2005; Kennedy, *et al.*, 2006) (como o robô MRWALLSPECT III, apresentado na Figura 13), ou robôs com um maior número de pernas (Armada, *et al.*, 2005; Inoue, *et al.*, 2006; Li, *et al.*, 2007). O controlo e a coordenação das pernas destes robôs maiores é, no entanto, mais complicada, pois é necessária uma maior coordenação e um controlo mais preciso.

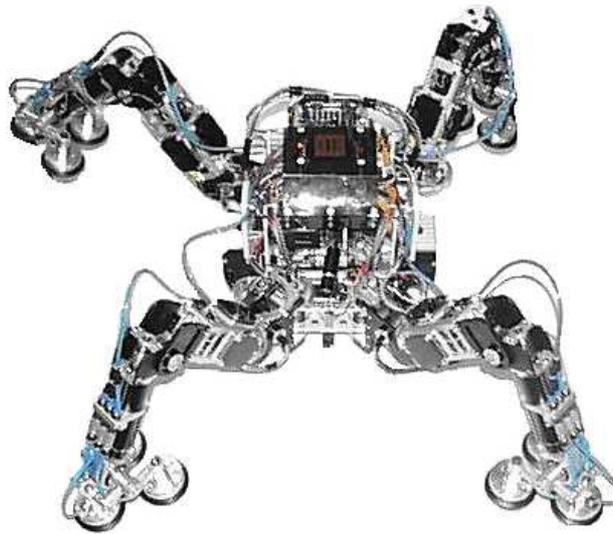


Figura 13 Robô trepador quadrúpede MRWALLSPECT III (fonte: Kang, *et al.*, 2003)

Tendo em vista ultrapassar a questão da complexidade e do peso de robôs com maior número de pernas, Yoneda, *et al.* (2001) desenvolveram um robô trepador quadrúpede de actuação reduzida (denominado Hyperion), com unicamente três graus de liberdade, mas sem comprometer a sua função de locomoção (Figura 14). Apesar da sua simplicidade construtiva, este robô consegue deslocar-se em paredes e tectos, com qualquer forma e tipo de superfície (Figura 15).

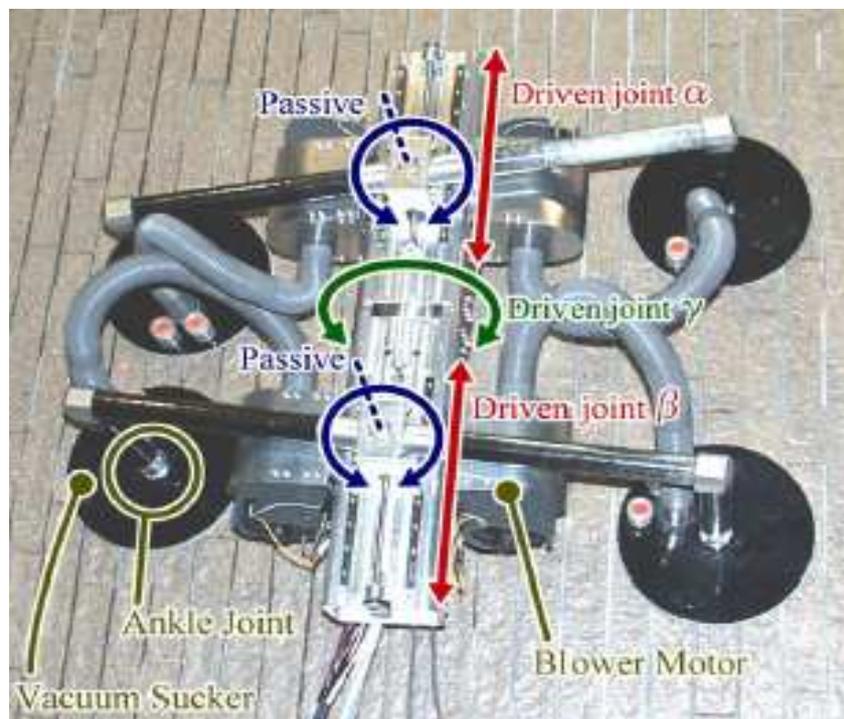


Figura 14 Robô trepador quadrúpede Hyperion de actuação reduzida (fonte: Yoneda, *et al.*, 2001)



Figura 15 Robô Hyperion a deslocar-se numa parede (à esquerda) e num tecto (à direita) (fonte: Yoneda, *et al.*, 2001)

Da mesma forma, tendo por base as experiências efectuadas com o robô ROMA I e as dificuldades funcionais que foram detectadas neste robô, Gimenez, *et al.* (2001) propuseram o desenvolvimento de uma versão evoluída desta máquina, que denominaram ROMA II, com quatro graus de liberdade, em vez dos oito que possuía o protótipo ROMA I. Esta máquina veio a ser posteriormente construída por Nardelli, *et al.* (2003).

Quanto à locomoção destes robôs, eles podem apresentar diversos padrões de locomoção que, em casos mais simples, apresentam semelhanças com os movimentos dos robôs trepadores que recorrem a segmentos deslizantes, como se pode ver na Figura 16 (Yano, *et al.*, 2001).

Em casos mais raros, existem robôs que se deslocam utilizando pernas mas que se agarram (“abraçam”) ao terreno em que se deslocam, caso se desloquem, por exemplo, sobre a superfície exterior de tubos, de forma aumentar a sua capacidade de equilíbrio (Kaneko, *et al.*, 2002).

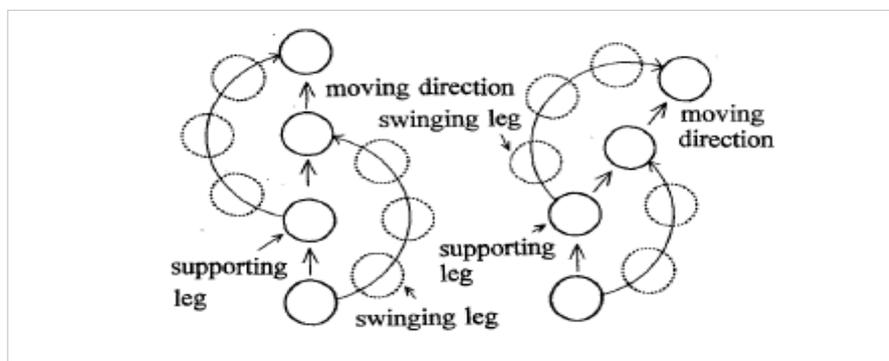


Figura 16 Padrão de locomoção do robô SSC ao deslocar-se em linha recta (à esquerda) e ao curvar (à direita) (fonte: Yano, *et al.*, 2001)

2.3. PRINCÍPIOS DE ADESÃO

A tarefa mais importante no projecto e desenvolvimento de um robô trepador passa por desenvolver um mecanismo de adesão adequado, para garantir que o robô adira a diferentes tipos de paredes e/ou superfícies de forma fiável, sem sacrificar a sua mobilidade (Elliot, *et al.*, 2006).

Nesta secção são analisados os principais aspectos relacionados com os quatro métodos de adesão usualmente adoptados em robôs trepadores, nomeadamente adesão através do recurso a força de sucção, força magnética, prensão à superfície e força de propulsão. Também serão abordados os novos métodos para assegurar a adesão, baseados em investigação que tem vindo a ser desenvolvida na área da biologia.

2.3.1. ADESÃO RECORRENDO À FORÇA DE SUCÇÃO

Uma das abordagens mais frequentes para garantir a adesão de um robô a uma superfície é usar a força de sucção. Este princípio de operação exige mecanismos leves e de fácil controlo, permite subir sobre superfícies arbitrárias, feitas de tipos distintos de materiais, e pode ser implementado usando estratégias diferentes.

No caso de robôs trepadores que usam pernas para a locomoção, é normalmente utilizada mais do que uma ventosa em cada pé, a fim de evitar a perda de pressão (e força de adesão) devida à curvatura da superfície ou às suas irregularidades (Hirose, *et al.*, 1991; Gimenez, *et al.*, 2001; Nardelli, *et al.*, 2003; Chen, *et al.*, 2006; Resino, *et al.*, 2006) (Figura 17).

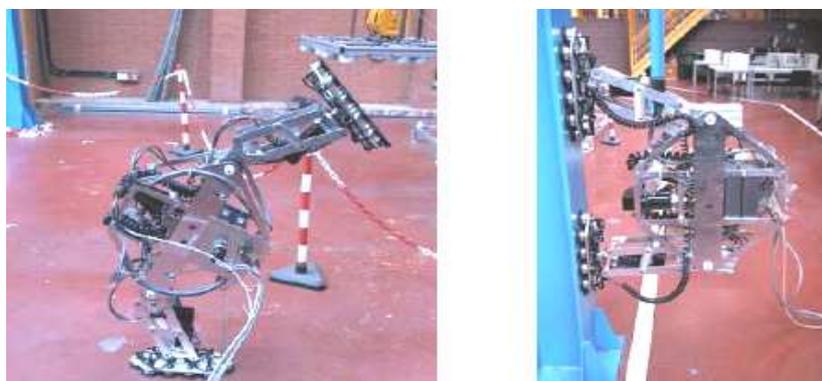


Figura 17 Robô trepador bípede ROMA II, equipado com múltiplas ventosas em cada pé, a efectuar a transição do solo para uma superfície vertical (fonte: Resino, *et al.*, 2006)

No entanto, este tipo de ligação apresenta alguns inconvenientes associados. O mecanismo de adesão por sucção ou aspiração requer tempo para desenvolver vácuo suficiente e gerar uma força de adesão adequada. Este atraso pode reduzir a velocidade à qual o robô se pode deslocar. Outro problema associado à adesão através de sucção, é que qualquer falha na vedação da ventosa pode fazer com que o robô se solte da superfície em que se encontra. Este inconveniente limita a utilização do mecanismo de adesão através de ventosas, a superfícies relativamente lisas, não podendo estas serem porosas e com fendas. Por último, o mecanismo de adesão através de sucção depende da pressão ambiente para se fixar a uma parede e, portanto, não é útil em aplicações espaciais, pois a pressão atmosférica no espaço é essencialmente zero (Menon, *et al.*, 2004).

Para ultrapassar a limitação da locomoção a superfícies relativamente lisas, não porosas e sem rachadelas, têm sido apresentadas algumas soluções que passam, geralmente, por utilizar mais do que uma ventosa em cada pé (Yano, *et al.*, 2001; Kang, *et al.*, 2003).

Mas outras soluções alternativas têm também sido propostas. Yano, *et al.* (2001) propõem a utilização de um sistema que desenvolveram e que denominam por sistema de ventosas do tipo perscrutador (*scanning type suction cup system*). Este sistema consiste num tubo de distribuição, cinco ou seis pequenas ventosas e um veio excêntrico que se encontra em rotação sobre o tubo de distribuição de forma a alternar sequencialmente as ligações entre o tubo de distribuição e as ventosas (Figura 18). Com a utilização deste mecanismo, quando uma ou duas ventosas estão impossibilitadas de efectuar a adesão à superfície devido a fugas de pressão, tenta-se criar o vácuo numa das outras ventosas até que seja possível estabelecer a adesão. Estes autores desenvolveram alguns sistemas deste tipo, que aplicaram a robôs trepadores, e verificaram que estes eram capazes de manter a adesão em superfícies com rachadelas.

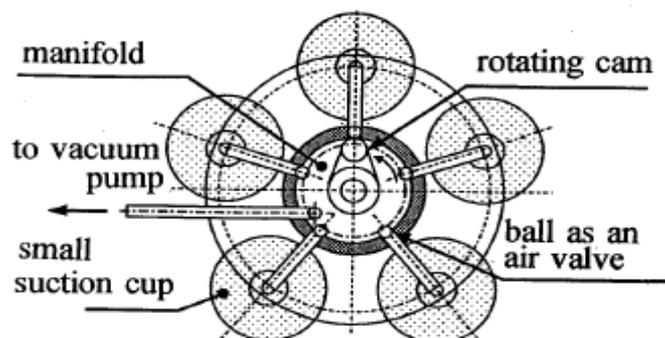


Figura 18 Estrutura do sistema de ventosas do tipo perscrutador (fonte: Yano, *et al.*, 2001)

Rachkov, *et al.* (2002) propõem a utilização, em cada pé do robô que desenvolveram, de uma ventosa concêntrica (Figura 19, à esquerda), capaz de gerar forças de adesão em superfícies porosas, e uma ventosa auto-isolante (Figura 19, à direita), com a propriedade de gerar forças de adesão em superfícies rugosas.

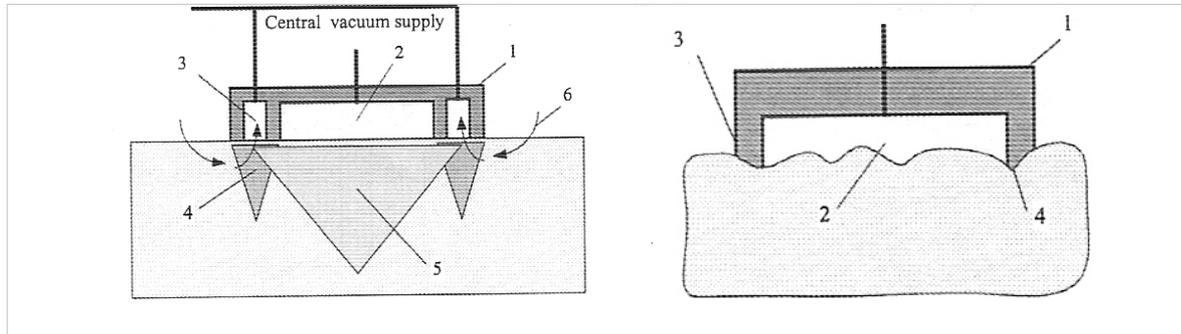


Figura 19 Ventosa concêntrica (à esquerda) e ventosa auto-isolante (à direita) (fonte: Rachkov, *et al.*, 2002)

Outro problema é o fornecimento de ar comprimido. O vácuo pode ser gerado através do Princípio de Venturi (Savall, *et al.*, 1999; Choi, *et al.*, 2000; Dabrowski, *et al.*, 2001; Yoneda, *et al.*, 2001; Jatsun, *et al.*, 2002; Elkmann, *et al.*, 2002; Derriche e Kouiss, 2002; Kozłowski, *et al.*, 2002; Rachkov, *et al.*, 2002; Zhang, *et al.*, 2004; Balaguer, *et al.*, 2005), ou através de uma bomba de vácuo, quer a bordo do robô (Yan, *et al.*, 1999; Yano, *et al.*, 2001; Tummala, *et al.*, 2002; Kang, *et al.*, 2003; Gao e Kikuchi, 2004; Cepolina, *et al.*, 2004; Berns e Hillenbrand, 2004; Li, *et al.*, 2007), quer externa a ele (Weise, *et al.*, 2001; Zhu, *et al.*, 2003). Quando o vácuo é gerado através do Princípio de Venturi, ou através de bombas de vácuo, torna os robôs trepadores ruidosos. Uma solução para este problema do ruído foi proposta por Li, *et al.* (2007).

O RAMR1 é um exemplo de um robô trepador bípede, adoptando ventosas para a adesão à superfície, sendo o vácuo gerado através de uma bomba de vácuo a bordo do robô (Figura 12).

A utilização do Princípio de Venturi para gerar o vácuo torna a força de adesão inferior à que é conseguida com uma bomba de vácuo (em particular se a ventosa se encontrar hermeticamente fechada), mas consegue lidar melhor com as eventuais fugas de ar, devido ao maior fluxo de ar (Yoneda, *et al.*, 2001; Kozłowski, *et al.*, 2002).

A inclusão de bombas de vácuo a bordo do robô aumenta o seu peso e custo, devido também à necessidade de tubos adicionais para “condução do vácuo”, válvulas e outros equipamentos

necessários. Esta solução provoca um nível de consumo de energia permanente não negligenciável.

A utilização de bombas de vácuo ou compressores externos ao robô implicam a necessidade de um cabo “umbilical”, com o inerente problema da interferência deste com a mobilidade e dinâmica do robô (Yano, *et al.*, 2001; Weise, *et al.*, 2001; Chen, *et al.*, 2006). Nomeadamente, o comprimento máximo dos tubos e cabos limita o espaço de trabalho, torna difícil ao robô percorrer trajectos complexos e, mesmo que ele o consiga fazer, tem sempre que retornar pelos mesmos trajectos. Adicionalmente aos problemas descritos anteriormente, verificam-se ainda as seguintes limitações decorrentes do robô se encontrar ligado a equipamento que se encontra no chão: à medida que os tubos e cabos se tornam mais compridos, aumenta o seu peso, diminuindo a capacidade de carga útil do robô e o nível de vácuo nas ventosas diminui, devido à queda de pressão ao longo dos tubos, degradando as características de adesão. Estes problemas são bastante severos em robôs trepadores de pequenas dimensões. Daí, ser desejável evitar a geração activa de vácuo e uma instalação separada para o transporte de vácuo.

Tendo presente estas ideias, Brockmann (2006) propôs o uso de ventosas passivas (ver Figura 20) uma vez que são baratas, robustas e simples de operar, e permitem a construção de robôs trepadores de peso reduzido. No entanto, apesar de ser uma abordagem promissora, de forma a construir um sistema adequado, têm que ser melhor compreendidos vários aspectos relacionados com o comportamento das ventosas passivas (Brockmann, 2006).



Figura 20 Ventosas passivas com (à esquerda) e sem (à direita) uma fita para auxiliar a efectuar o desprendimento da superfície (fonte: Brockmann, 2006)

Uma forma alternativa para criar a adesão, devido à sua simplicidade construtiva e possibilidade de garantir elevada velocidade de deslocamento, é a adopção de aspiração de ar numa câmara deslizante (o equivalente à existência de uma única ventosa) e, em seguida,

movimentar o robô através de rodas (Yan, *et al.*, 1999; Longo e Muscato, 2002; Schraft, *et al.*, 2003; Longo e Muscato, 2004a; Longo e Muscato, 2004b). No caso do veículo desenvolvido por Yan, *et al.* (1999), e apresentado na Figura 21, as quatro rodas são orientáveis, sendo o veículo omnidireccional. Esta técnica de adesão é também por vezes denominada de *hovercraft* invertido (Alexander, *et al.*, 2003). Também há autores que propõem a aspiração de ar em múltiplas câmaras para garantir redundância na adesão no caso de o robô se deparar com rachadelas ou irregularidades na superfície (Berns, *et al.*, 2003; Alexander, *et al.*, 2003) (Figura 22).

Para que este sistema funcione correctamente, é necessário manter uma pequena folga ou espaçamento entre a câmara na qual é criado o vácuo, ou a depressão, e a superfície sobre a qual o robô se move. Quando a quantidade de ar que entra por este espaçamento é igual ao volume de ar que é extraído da câmara pelo sistema de sucção ou aspiração, a pressão dentro da câmara torna-se inferior à pressão atmosférica e cria-se a força de adesão à superfície.

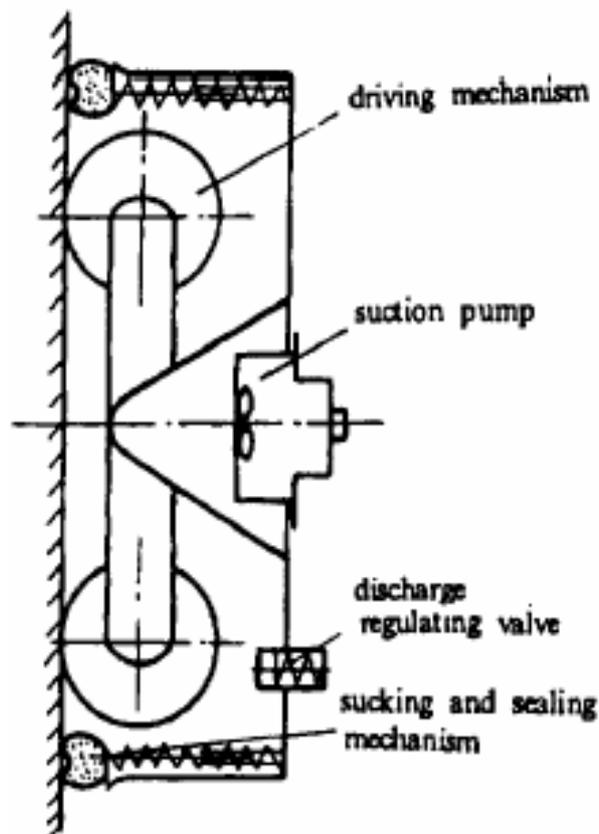


Figura 21 Diagrama da estrutura de um robô trepador que recorre à aspiração de ar numa câmara de deslizamento (fonte: Yan, *et al.*, 1999)

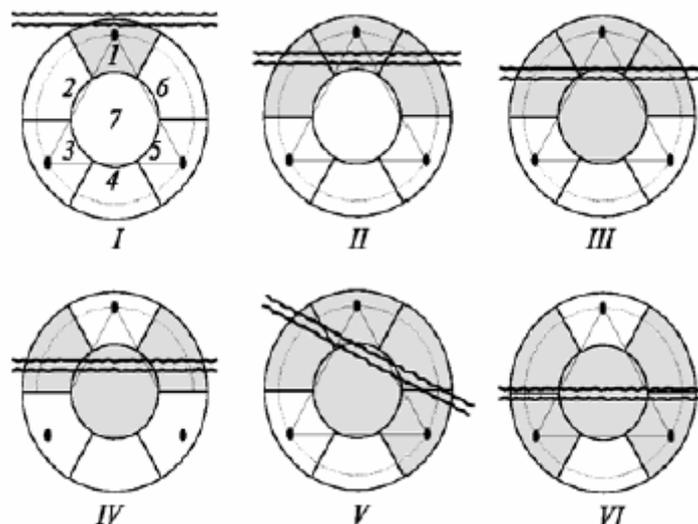


Figura 22 Simulação do robô trepador com o sistema de sete câmaras quando se desloca numa parede vertical sobre uma fenda. As áreas a cinzento mostram as câmaras em que há fugas de pressão. Foi calculado que nas situações III, V e VI o robô se desprende da parede (fonte: Berns e Hillenbrand, 2004)

A existência deste espaçamento é, no entanto, um dos principais problemas que estes robôs apresentam. Caso este espaçamento seja muito grande, o sistema de sucção não consegue retirar uma quantidade de ar do interior da câmara superior à que entra pelo espaçamento, e não se cria uma depressão suficiente para a adesão à superfície. Caso este espaçamento seja muito reduzido, o atrito com a superfície, em particular no caso de esta ser rugosa ou irregular, dificulta o movimento do robô e pode mesmo, em casos extremos, levar a que este se desprenda da superfície em que se deslocava (Longo e Muscato, 2002; Schraft, *et al.*, 2003; Cacopardo, *et al.*, 2003). A necessidade deste espaçamento limita também a locomoção dos veículos com esta tecnologia em superfícies côncavas e convexas (Yan, *et al.*, 1999; Berns, *et al.*, 2003).

Yan, *et al.* (1999) adoptam um tipo de mangas pneumáticas, na zona de contacto entre a câmara de vácuo e a superfície, que podem ser insufladas de ar a diferentes pressões (ver Figura 21). Desta forma conseguem, de certa maneira, ajustar o espaçamento entre a câmara de vácuo e a superfície em função das características da superfície em que o robô se desloca. Por sua vez, Schraft, *et al.* (2003) propõem a injeção de um fluído na zona de contacto entre a câmara de vácuo e a superfície, de forma a minimizar o espaçamento entre as duas superfícies e, simultaneamente, aumentar a lubrificação entre elas, minimizando as fugas de ar e o atrito gerado. Esta solução apresenta um problema: quando as rodas entram em contacto

com o fluido perdem aderência à superfície e a locomoção do robô é dificultada. Já Cacopardo, *et al.* (2003) introduzem um anel de controlo adicional no robô Alicia II, para efectuar a regulação da pressão dentro da câmara de sucção deste veículo, de forma a mantê-la num valor que garanta a sua sustentação.

Uma variação deste método de adesão, que permite ultrapassar algumas das dificuldades descritas anteriormente, é apresentado por Elliot, *et al.* (2006) e implementado no robô City-Climber. Estes investigadores desenvolveram um dispositivo baseado na atracção aerodinâmica que permite alcançar um bom compromisso entre uma força de adesão forte e uma boa mobilidade.

O dispositivo de adesão desenvolvido por estes investigadores é baseado na atracção aerodinâmica produzida por um conjunto de rotor de vácuo que gera uma zona de baixa pressão confinada a uma câmara. O conjunto de rotor de vácuo consiste num motor com uma turbina, que impulsiona o ar e provoca o seu escape através de uma cobertura para dirigir o fluxo de ar, como se mostra no esquema da Figura 23, do lado esquerdo. É essencialmente um dispositivo de fluxo radial, que combina dois tipos de fluxo de ar. A elevada velocidade de rotação da turbina faz com que o ar seja acelerado em direcção ao perímetro exterior do rotor, afastando-o radialmente do centro. O ar é então puxado ao longo do eixo de rotação, em direcção ao dispositivo, levando à criação de uma região de baixa pressão, ou uma região de vácuo parcial em frente do aparelho se isolada adequadamente. O escape de ar resultante é direccionado, através da cobertura de escape, para a retaguarda do dispositivo, ajudando a aumentar a força de adesão ao empurrar o dispositivo para a frente.

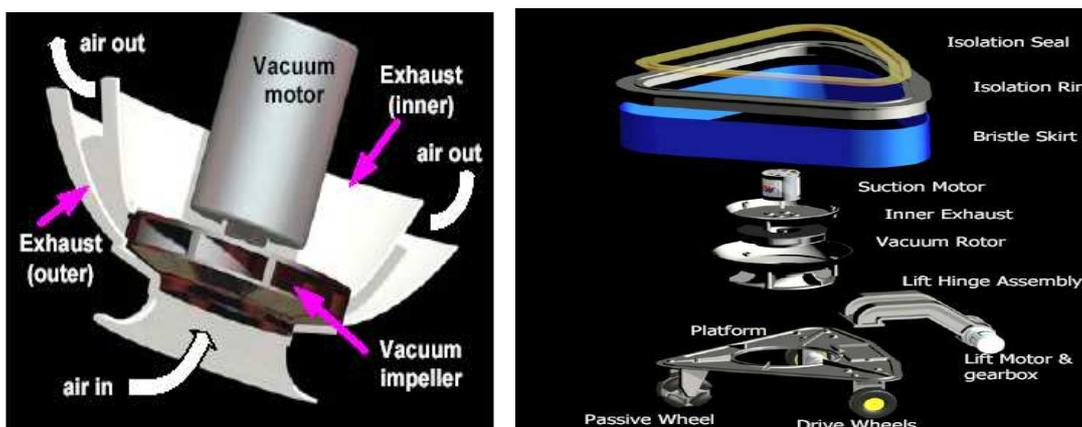


Figura 23 Módulo do rotor de vácuo para gerar a atracção aerodinâmica (à esquerda) e vista explodida do protótipo City-Climber II (à direita) (fonte: Elliot, *et al.*, 2006)

Para melhorar o isolamento da zona de baixa pressão foi adoptada uma “saia” de cerdas que envolve todo o dispositivo, como se pode ver no esquema da Figura 23, do lado direito.

Uma vez que esta tecnologia não exige um isolamento tão eficaz na zona de contacto entre a câmara de vácuo e a superfície em que o robô se desloca, como no caso dos equipamentos que recorrem às técnicas de criação de vácuo por sucção ou aspiração, o robô City-Climber pode-se deslocar em praticamente todos os tipos de superfícies, mesmo que sejam rugosas ou irregulares.

Os testes experimentais demonstraram que o City-Climber, com o peso de 1,0 kg por módulo (Figura 23, direita), consegue gerar uma força de adesão suficiente para transportar 4,2 kg de carga útil adicional, quando se desloca em paredes de tijolo. Juntando dois módulos (Figura 24), torna-se também possível efectuar transições entre diferentes superfícies.



Figura 24 Dois módulos do robô trepador City-Climber II, ligados por uma junta, nas configurações $+90^\circ$ e -90° , capazes de efectuarem transições entre diferentes paredes (à esquerda) e entre uma parede e o tecto (à direita) (fonte: Elliot, *et al.*, 2006)

Recentemente, foi patenteada uma nova tecnologia denominada *Vortex Regenerative Air Movement* (VRAM) (Reinfeld e Illingworth, 2002). De acordo com os autores, este sistema de adesão adopta um vórtice para gerar elevadas forças de adesão com um baixo consumo de energia, e permite que o robô possa atravessar superfícies ásperas. No entanto, de acordo com Elliot, *et al.* (2006) a força de adesão gerada pela tecnologia de vórtice não é suficiente para suportar grandes cargas e é difícil para o robô efectuar transições entre paredes, e entre uma parede e o tecto.

2.3.2. ADESÃO RECORRENDO À FORÇA MAGNÉTICA

A adesão magnética é um princípio alternativo adoptado para a criação da força de adesão, em casos específicos onde a superfície o permita. A adesão magnética pode ser altamente desejável, devido à sua fiabilidade inerente. Este método é rápido, mas implica a utilização de actuadores pesados. Apesar disso, a adesão magnética só é útil em ambientes específicos onde a superfície é ferromagnética e, portanto, representa uma opção inadequada para a maioria das aplicações (Menon, *et al.*, 2004).

Uma das possibilidades é o uso de electroímans (Prieto, *et al.*, 2001; Shores e Minor, 2005; Armada, *et al.*, 2005) (Figura 25). A outra possibilidade é o uso de ímanes permanentes, para o robô aderir à superfície ferromagnética, combinado com rodas ou lagartas para se mover ao longo dessa superfície (Yan, *et al.*, 1999; Akinfiiev e Armada, 2001; Mondal, *et al.*, 2002; Sánchez, *et al.*, 2006). As principais vantagens desta última possibilidade são o facto de não haver a necessidade de gastar energia para o processo de adesão, não ocorrer qualquer perda de aderência no caso de uma falha de energia e o facto de os ímanes permanentes serem adequados para aplicação em ambientes perigosos, isto é, zonas ATEX (Mondal, *et al.*, 2002; Berns, *et al.*, 2005).

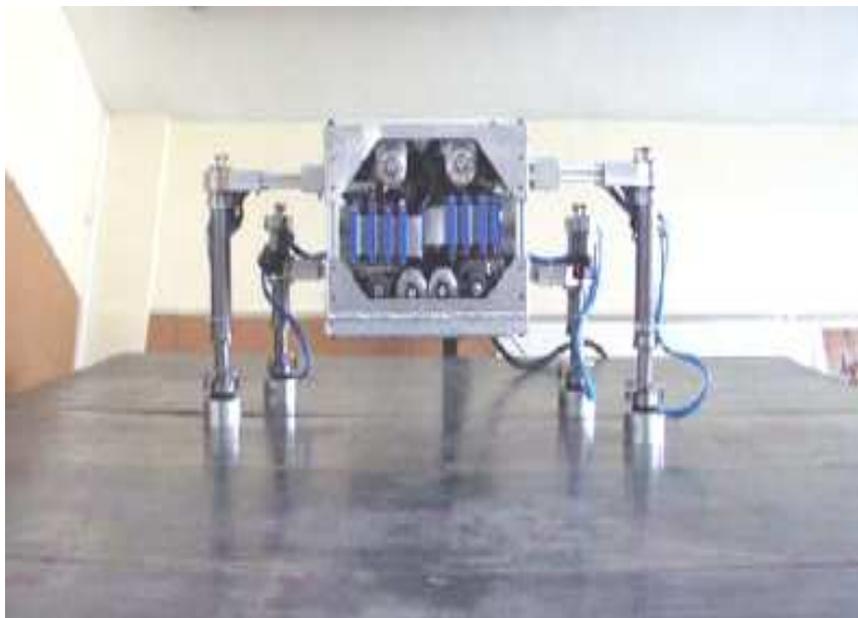


Figura 25 Robô trepador quadrúpede REST, que recorre a pés com electroímans para aderir a superfícies metálicas (fonte: Armada, *et al.*, 2005)

O principal problema que pode surgir com esta tecnologia, prende-se com a espessura mínima da superfície em que o robô se desloca. Se a espessura da superfície for muito pequena, pode

dar-se o caso de ocorrer a sua deformação, entrando esta em contacto com os ímanes. Isto leva a um grande aumento da força de atrito entre o veículo e a superfície de deslocamento, impedindo, no limite, o movimento do próprio robô (Akinfiiev e Armada, 2001). Para ultrapassar este problema, Akinfiiev e Armada (2001) sugerem a utilização de um dispositivo que permita variar a distância (e também a inclinação relativa, caso seja necessário) entre os ímanes e a superfície de deslocamento, em função das irregularidades detectadas pelo robô, de forma a manter esta distância constante.

Uma terceira solução é usar rodas ou lagartas (Figura 26 e Figura 27) equipadas com dispositivos magnéticos (tipicamente ímanes permanentes), espaçados a intervalos regulares sobre a superfície das rodas ou das lagartas, que permitem implementar a locomoção e a adesão ao mesmo tempo (Bozzetti, *et al.*, 2003; Park, *et al.*, 2003; Kalra e Gu, 2006; Fischer, *et al.*, 2007).

Os ímanes permanentes são frágeis e podem partir, causar marcas nas superfícies e como a sua superfície é lisa podem potenciar o escorregamento dos veículos durante a sua locomoção. Para prevenir estas situações, Yan, *et al.* (1999) recobrem os ímanes permanentes com uma fina camada de borracha vulcanizada para eliminar estes potenciais problemas, sem grande perda de força de adesão.

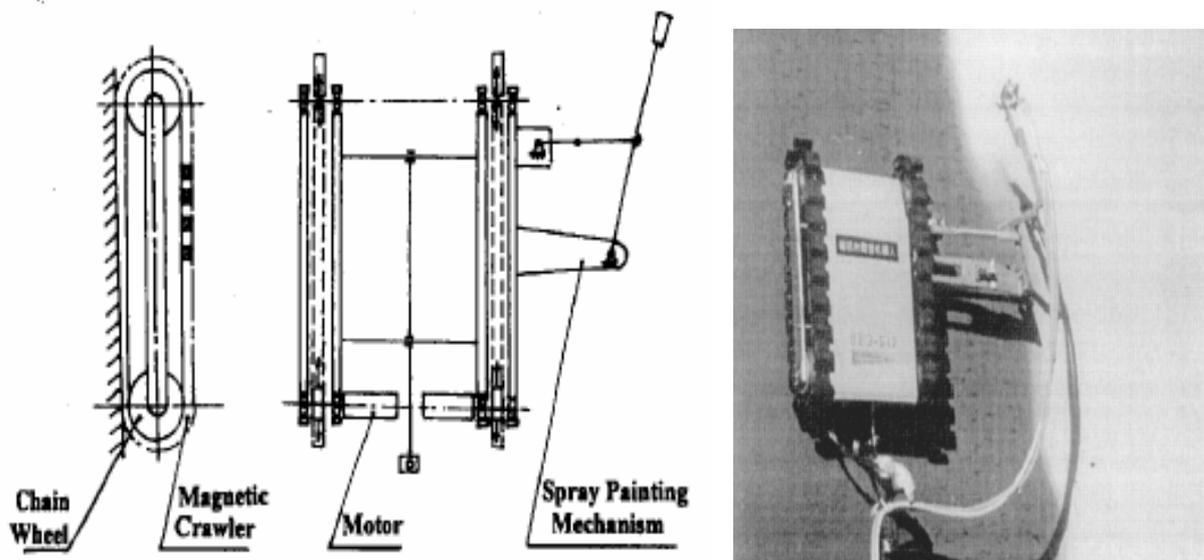


Figura 26 Diagrama da estrutura de um robô que recorre a lagartas “magnéticas” para a adesão à superfície (à esquerda) e fotografia do robô a efectuar uma operação de pintura (à direita) (fonte:

Yan, *et al.*, 1999)

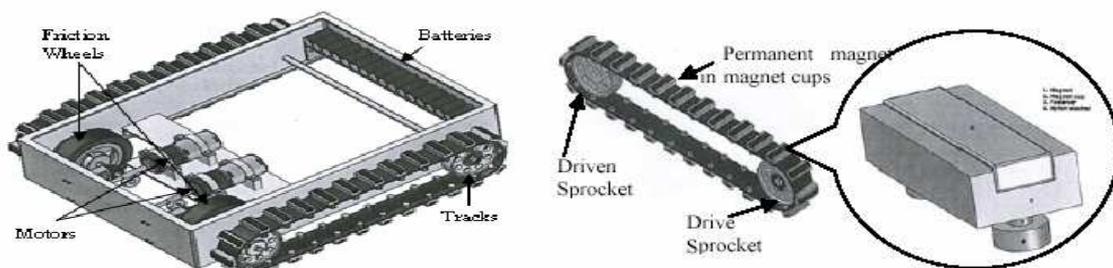


Figura 27 Estrutura mecânica de um robô que recorre a lagartas “magnéticas” para a adesão à superfície (à esquerda) e detalhe da disposição dos ímanes permanentes nas lagartas (à direita) (fonte: Kalra e Gu, 2006)

A adoção de ímanes permanentes torna o robô mais fiável e seguro, mas há uma grande desvantagem: é mais difícil controlar a adesão e, em particular, a libertação do robô das superfícies em que este deve trabalhar. Para minimizar este problema, por vezes estão previstos equipamentos dedicados para facilitar a sua remoção das superfícies em que se movem (Yan, *et al.*, 1999).

2.3.3. ADESÃO RECORRENDO À PREENSÃO À SUPERFÍCIE

As técnicas de adesão anteriormente descritas tornam os robôs móveis adequados para a locomoção em paredes e tectos relativamente planos e lisos. No entanto, é difícil para eles deslocarem-se em superfícies irregulares ou superfícies como grelhas ou redes metálicas.

A fim de superar esta dificuldade, alguns robôs são concebidos para treparem através de estruturas feitas pelo homem ou em ambientes naturais, agarrando-se à própria superfície onde se estão a deslocar. Estes robôs exibem normalmente garras (Gimenez, *et al.*, 2001; Balaguer, *et al.*, 2005) (Figura 28), ou outros sistemas implementados na extremidade dos seus membros, projectados especialmente para a preensão à superfície em que se movem (Linder, *et al.*, 2005; Balaguer, *et al.*, 2005; Kennedy, *et al.*, 2006; Bell e Balkcom, 2006; Inoue, *et al.*, 2006). Liu, *et al.* (2003) descrevem um robô trepador para limpar as superfícies envidraçadas do Grande Teatro Nacional da China que é capaz de subir ao telhado deste edifício, aproveitando umas calhas que foram montadas aquando da sua construção para efeitos de montagem e manutenção. Neste caso, este veículo dispõe de rodas que se prendem a ambos os lados desta calhas de forma a manter a preensão à superfície. No entanto, o controlo da locomoção destas máquinas é especialmente complexo (Berns, *et al.*, 2003).

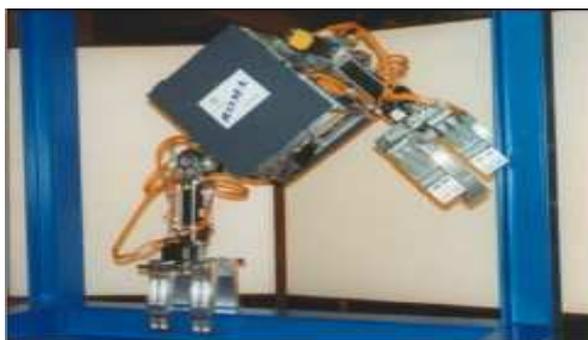


Figura 28 Robô ROMA I a trepar por uma estrutura metálica (fonte: Balaguer, *et al.*, 2005)

Um exemplo deste tipo de equipamentos é o robô ROMA I (Figura 28), que tem duas pernas com garras nas suas extremidades, para se deslocar em ambientes constituídos por estruturas metálicas complexas (Gimenez, *et al.*, 2001; Balaguer, *et al.*, 2005). As experiências efectuadas com o robô ROMA I confirmaram as suas vantagens e utilidade na execução de acções de inspecção em ambientes complexos. Ficaram também indicações claras de que este tipo de robô pode substituir os operadores humanos na realização de tarefas perigosas, isto é, num futuro próximo. No entanto, foram também apontadas diversas dificuldades construtivas, relacionadas com aspectos como: o peso reduzido, a elevada mobilidade, a adequação do método de preensão a diferentes tipos de superfícies e a autonomia energética associada (Gimenez, *et al.*, 2001).

Outro exemplo é o robô ASIBOT (Figura 29), capaz de se mover entre os diferentes pontos, designados por estações de ancoragem, de salas ou compartimentos através de um método inovador de preensão baseado em conectores especiais e de um encaixe/montagem em baioneta (Balaguer, *et al.*, 2005).

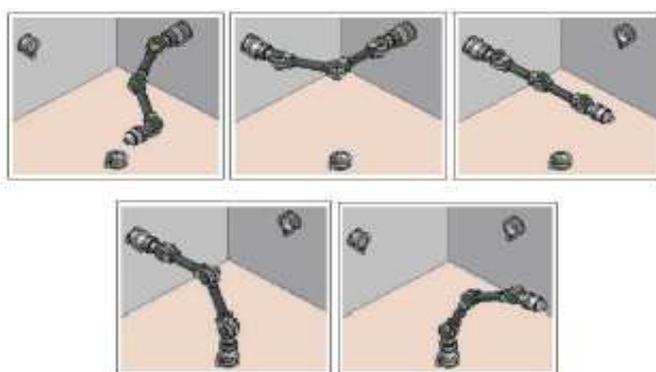


Figura 29 Princípio de locomoção do robô trepador ASIBOT (fonte: Balaguer, *et al.*, 2005)

O quadrúpede Lemur Iib (Figura 30), destinado à escalada livre em terreno íngreme, como o encontrado na exploração espacial (Kennedy, *et al.*, 2006), sobe superfícies irregulares como se estivesse a escalar uma parede de pedra.



Figura 30 Robô LEMUR Iib trepando uma parede de testes (fonte: Kennedy, *et al.*, 2006)

Finalmente, o robô ASTERISK (Inoue, *et al.*, 2006) (Figura 31) encontra-se equipado com um mecanismo especial nas extremidades dos seus membros, de forma a agarrar-se e mover-se sobre superfícies como grelhas metálicas ou de arame (Figura 32).

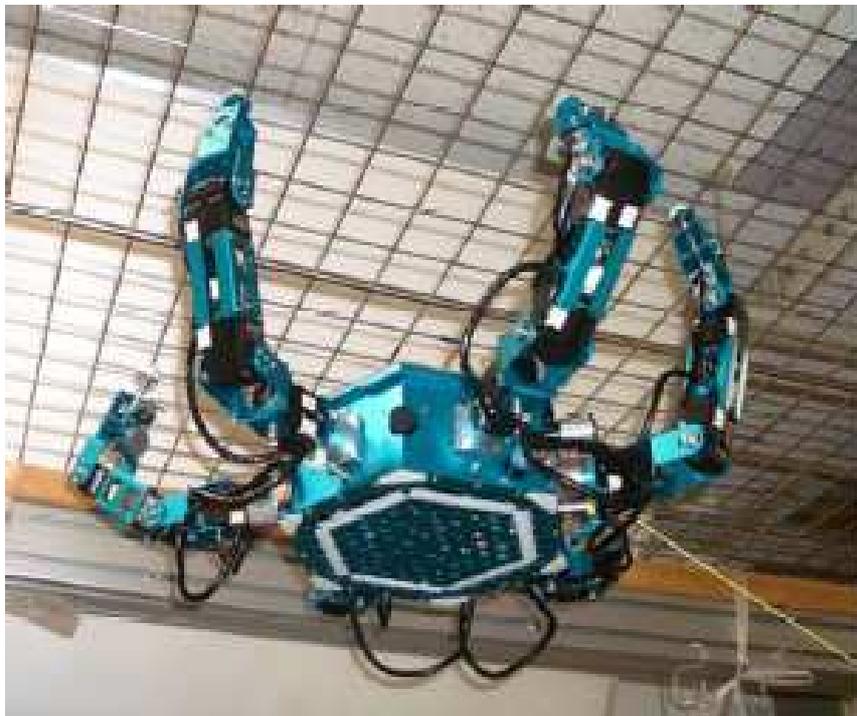


Figura 31 Robô ASTERISK pendurado numa estrutura do tipo rede (fonte: Inoue, *et al.*, 2006)

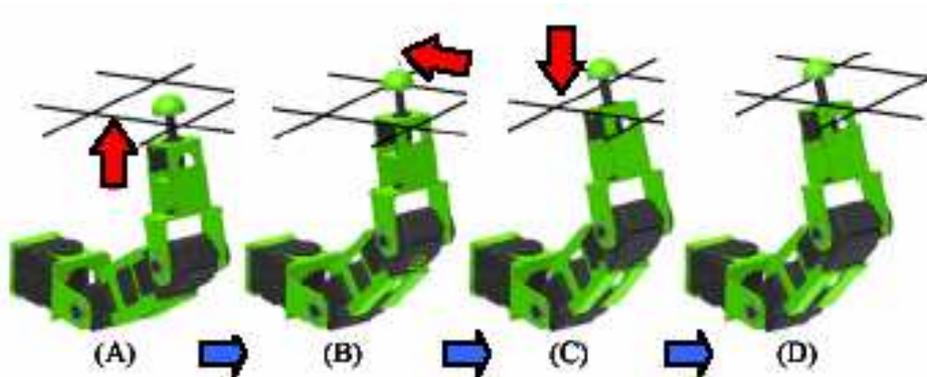


Figura 32 Princípio de locomoção do robô ASTERISK (fonte: Inoue, *et al.*, 2006)

Vale também a pena mencionar o robô trepador “brinquedo” desenvolvido no Dartmouth College (Figura 33). O principal objectivo do projecto foi manter o protótipo o mais simples possível, tornando viável para o público em geral comprar um kit relativamente barato que permitisse a construção de um robô do tipo trepador. Com base nestas ideias, o robô foi construído a partir de servo-motores utilizados na construção de veículos e brinquedos rádio-comandados e peças de LEGO®, e é capaz de escalar uma parede de pinos (Linder, *et al.*, 2005; Bell e Balkcom, 2006).

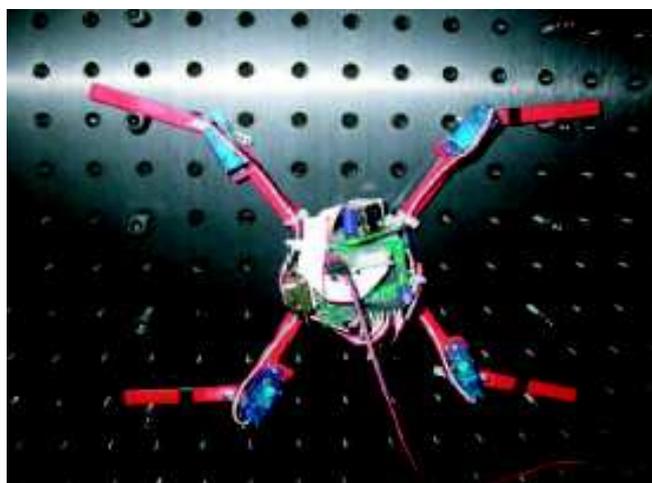


Figura 33 O robô na parede de escalada (fonte: Bell e Balkcom, 2006)

Existem ainda diversos robôs que se deslocam “abraçando” o terreno em que se movem, caso se desloquem, por exemplo, sobre a superfície exterior de tubos (Hosokai e Hara, 2001; Kaneko, *et al.*, 2002). Nesta situação, apesar de tipicamente estes serem classificados como robôs trepadores com pernas, o mais correcto será afirmar-se que a locomoção se efectua através da preensão dos “braços” à superfície.

2.3.4. ADESÃO RECORRENDO À FORÇA DE PROPULSÃO

Os protótipos que fazem uso deste princípio de adesão têm sido desenvolvidos para trabalhar em aplicações do tipo submerso. Estas máquinas permitem, essencialmente, realizar a inspecção das paredes e do pavimento de fundo, em tanques de armazenamento de produtos petrolíferos e produtos químicos, enquanto submersos nestes produtos líquidos, economizando assim o custo do esvaziamento, limpeza e inspecção manual dos tanques (Sattar, *et al.*, 2002).

O robô trepador RobTank, desenvolvido por Sattar, *et al.* (2002), pode entrar em tanques de armazenamento de petróleo e de produtos químicos através de aberturas situadas na sua cobertura, com um diâmetro igual ou superior a 300 mm, deslocar-se no chão, efectuar rotações de qualquer ângulo dentro da gama de 360°, e mudar de superfícies (do chão para a parede e de volta para o chão). Quanto à locomoção, dois servomotores fornecem a tracção para as rodas do veículo, enquanto uma hélice, montada na parte superior do robô, fornece a força de propulsão para a adesão à parede. Desta forma, este veículo é capaz de subir diferentes tipos de superfícies.

Para que esta máquina possa ser utilizada na inspecção, em serviço, de tanques de armazenamento de produtos petrolíferos, toda a electrónica de controlo do robô, os motores que garantem a sua locomoção e adesão às superfícies e os sensores e equipamentos auxiliares para realizarem as tarefas de inspecção, encontram-se dentro de uma caixa isolada e pressurizada.

Posteriormente, Sattar, *et al.* (2006) desenvolveram um robô trepador para a realização de testes não destrutivos das superfícies das paredes internas e do chão de tanques flutuantes de armazenamento da produção de petróleo (*Floating Production Storage Oil – FPSO*) (ver Figura 34).

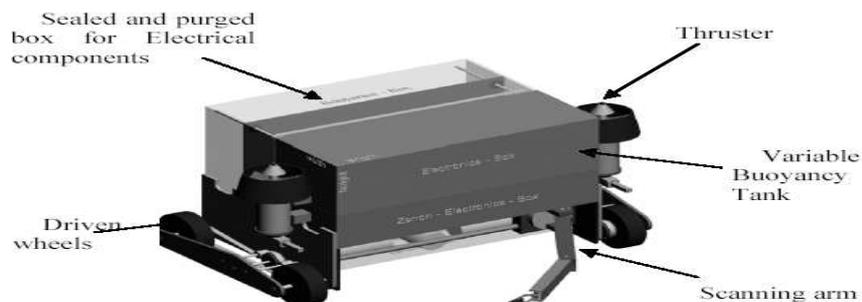


Figura 34 Projecto conceptual do robô trepador e nadador FPSO (fonte: Sattar, *et al.*, 2006)

Este robô encontra-se equipado com dois propulsores independentes, com velocidade controlada, que movimentam o robô nos dois sentidos dum plano horizontal (para a frente ou para trás), e permitem rodá-lo em qualquer direcção. Depois do contacto com uma parede, as forças de propulsão geradas por estes dois propulsores garantem a aderência à parede, enquanto rodas actuadas movem o robô na parede. O robô manobra-se livremente na parede e pode ser dirigido para baixo, passando da parede para o piso do tanque, e regressar à parede (ver Figura 35).



Figura 35 Robô trepador subindo a parede de vidro de um tanque, sem qualquer reservatório de flutuação (fonte: Sattar, *et al.*, 2006)

Foi posteriormente desenvolvido para esta máquina um reservatório de flutuação variável, equivalente aos tanques de lastro nos submarinos, para alterar a flutuação em redor do “ponto neutro”, através da mudança de volume de ar (Sattar, *et al.*, 2008). O reservatório permite ao robô submergir até uma determinada profundidade e ser parqueado no chão, com flutuação negativa, ao inspeccionar o respectivo chão.

2.3.5. ADESÃO BASEADA EM PRINCÍPIOS DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

Nos últimos anos foi recolhida uma inspiração considerável com base em animais trepadores (Menon, *et al.*, 2004; Daltorio, *et al.*, 2005). Insectos, besouros, lagartos, rãs, salamandras e lagartixas¹, têm sido estudados pelas suas capacidades de aderirem a diferentes superfícies. Os

¹ Neste documento utiliza-se o termo lagartixa, como tradução do termo Anglo-Saxónico *gecko*. Os *geckos* são lagartos de tamanho pequeno e médio, pertencentes à família *Gekkonidae* (família de répteis escamados da classe dos lagartos, que inclui os animais vulgarmente designados por lagartixas), encontrados em climas quentes de todo o mundo. Estima-se que existam em todo o mundo 2000 espécies diferentes de *geckos*.

besouros e as lagartixas de Tokay (*Gekko gecko*) aderem às superfícies através de conjuntos de pêlos microscópicos que fornecem um mecanismo de adesão seca através das forças de Van der Waals (Figura 36).



Figura 36 Pé de uma lagartixa quando esta se encontra a subir uma superfície de vidro (fonte: Tørrissen, 2009)

As baratas escalam uma grande variedade de substratos, utilizando as suas garras activas, espinhos passivos e almofadas adesivas macias (Alexander, 2005). Tendo como inspiração estes mecanismos presentes nos animais, têm vindo a ser propostos novos métodos para garantir a adesão, baseados em descobertas nas áreas da biologia e da zoologia.

No entanto, ainda é um desafio sintetizar equipamentos e materiais, como por exemplo os pêlos dos pés da lagartixa, que sejam capazes de produzir forças de adesão suficientemente fortes para serem de utilidade prática, especialmente quando é desejada uma capacidade de carga elevada. Pelos motivos expostos, estas técnicas de adesão ainda são unicamente utilizadas em robôs de pequenas dimensões e relativamente leves (Berns, *et al.*, 2003).

Usando as tecnologias de adesivos de inspiração biológica, potencialmente podem ser desenvolvidos robôs para atravessar uma grande variedade de superfícies, independentemente da presença de pressão de ar ou das propriedades específicas dos materiais do substrato. Robôs usando estes adesivos poderão, um dia, ser capazes de subir qualquer superfície irregular, inclusive molhada.

Assim, existem robôs trepadores recorrendo a adesivos sintéticos secos inspirados nos pés das lagartixas. A capacidade das lagartixas para escalar superfícies, quer molhadas ou secas, lisas ou ásperas, tem atraído a atenção das pessoas ao longo de décadas. Segundo Menon, *et al.* (2004), por meio de estruturas complacentes de beta-queratina à micro/nano-escala nos seus pés, as lagartixas conseguem aderir a quase qualquer superfície com uma área de contacto controlada. Foi demonstrado que a adesão é principalmente devida a forças moleculares, tais como as forças de Van der Waals. A capacidade das lagartixas em aderir às superfícies encontra-se nos seus pés, especificamente nos pêlos muito finos dos seus dedos, como pode ser visto na Figura 37. Estes pêlos têm cerca de 5 microns de diâmetro e, no cimo de cada uma destas micro-fibras, encontram-se centenas de nano-fibras (*spatulae*), que têm 200 nanômetros de diâmetro. Há bilhões destas pequenas fibras que estabelecem contacto com a superfície e criam uma área colectiva de contacto significativa. Os pêlos têm propriedades físicas que lhes permitem curvar e adaptar-se a uma ampla variedade de rugosidades das superfícies, o que significa que a adesão surge a partir da estrutura destes próprios pêlos. Além disso, devido à sua natureza hidrófoba, estas fibras dos pés da lagartixa auto limpam-se.

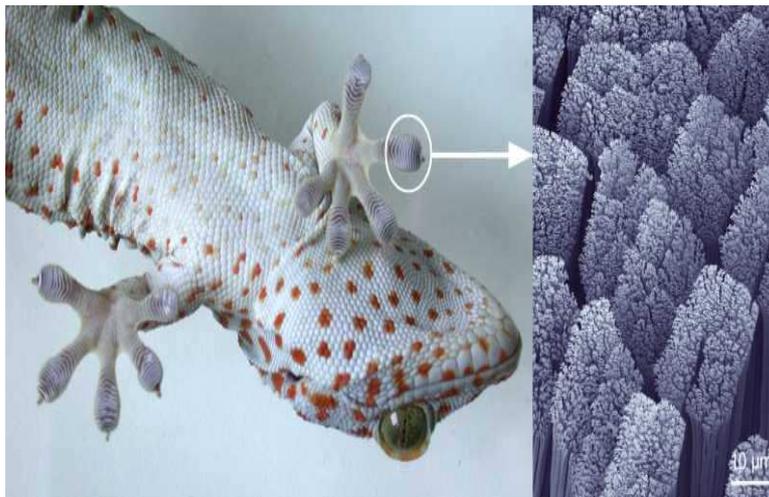


Figura 37 Detalhe do pé de uma lagartixa (fonte: Wikipedia, 2009)

Uma vez que a adesão seca é causada por forças de Van der Waals, as especificidades químicas das superfícies não são de grande importância. Isto significa que a adesão seca funciona em praticamente qualquer superfície.

A adesão seca é mais robusta do que o mecanismo de adesão através de sucção. Se o bloco de adesão seca encontra uma fenda ou brecha, haverá ainda adesão nas partes desta “almofada” que estabeleceram contacto. Este comportamento permite que um robô, utilizando adesão

seca, possa subir uma maior variedade de superfícies. Além disso, uma vez que a adesão seca não depende fortemente do material da superfície ou do ambiente, é apropriada para uso no vácuo do espaço, bem como dentro de ambientes líquidos.

Outro benefício associado à adesão seca, é a velocidade com que é possível estabelecer a ligação e a separação. A ligação é quase instantânea, tal como a separação, e ambas dependem apenas da força aplicada. Isto leva a que quase não haja atrasos na locomoção, permitindo assim velocidades de locomoção muito rápidas. Além disso, não é necessário controlar o instante da ligação de forma tão crítica como quando se utilizam meios de adesão electromagnéticos. Existe apenas a necessidade de exercer uma pressão contra a superfície, de modo que a ligação é completamente passiva por natureza e, portanto, de fácil controlo.

Inspirado por estes conhecimentos, Menon, *et al.* (2004) apresentaram dois métodos alternativos para replicar a estrutura dos micro-pêlos presentes nos pés das lagartixas.

O primeiro é baseado no desenvolvimento de um adesivo sintético. Da mesma forma que o material real das lagartixas espera-se que, no futuro, este adesivo sintético venha a ser super-hidrófobo e, portanto, será capaz de auto-limpeza permitindo assim uma vida útil longa aos robôs. A natureza da força de adesão é tal que não é necessário aplicar qualquer energia para manter a ligação depois de esta ter sido estabelecida. Portanto, um robô usando adesão seca poderia ficar pendurado numa parede indefinidamente, sem consumo de energia.

De forma a testar estes adesivos sintéticos fibrilares secos e inspirados nos pés das lagartixas, Menon, *et al.* (2004) desenvolveram dois veículos diferentes para mostrar a viabilidade dos mecanismos trepadores assim concebidos: o primeiro usando *whegs*² e o segundo robô consistindo num veículo com lagartas revestidas com substâncias adesivas. A máquina com *whegs* foi melhorada por Murphy, *et al.* (2006), dando origem a um robô trepador ágil e de pequenas dimensões, denominado Waalbot. O Waalbot é capaz de se deslocar sobre superfícies lisas com qualquer inclinação, inclusive superfícies verticais e invertidas, tirando vantagem de materiais elastómeros adesivos para estabelecer a adesão (Figura 38). Este robô pode subir e virar em qualquer direcção com duas pernas actuadas com movimento de rotação e duas juntas de revolução passivas em cada pé. O protótipo apresentado pode subir

² Termo resultante da contracção das palavras *wheel* e *legs*.

superfícies com uma inclinação de 90°, a uma velocidade de 6 cm/s, e rodar em qualquer ângulo.

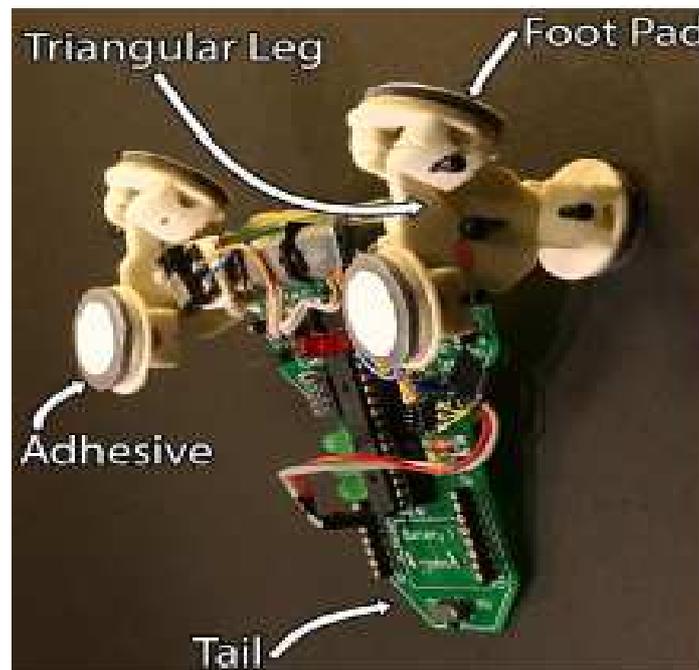


Figura 38 Fotografia do protótipo Tri-Foot Waalbot subindo uma superfície vertical a 90° (fonte: Murphy, *et al.*, 2006)

Mais recentemente, Menon e Sitti (2005) desenvolveram outros dois robôs trepadores com conceitos diferentes. O primeiro robô, chamado Rigid Gecko Robot (RGR), foi projectado para operar tanto na Terra como em ambientes espaciais. Os requisitos mais importantes para o desenvolvimento do RGR foram a fiabilidade e robustez. É um robô relativamente grande, accionado por motores eléctricos. O segundo robô, chamado Compliant Gecko Robot (CGR), foi desenvolvido usando tecnologias não convencionais, permitindo a sua miniaturização até alguns centímetros, e foi projectado para aplicações terrestres. O protótipo CGR tem uma estrutura composta e sua locomoção, imitando a lagartixa, depende de actuadores de memória de forma (*shape memory alloys*) sob a forma de fios. Unver, *et al.* (2006) desenvolveram o robô trepador Geckobot (Figura 39) baseado nos dois anteriores. O robô tem um peso total de 100 gramas (incluindo a placa electrónica) e um mecanismo de descolagem³ dos pés do robô, uma vez que este aspecto é muito importante para a separação eficiente de robôs trepadores (como foi visto na lagartixa). O Geckobot pode subir de forma estável superfícies de

³ Do termo original Anglo-Saxónico *peeling*.

Plexiglas, um acrílico, com inclinações até 85°. No entanto, verificou-se que acima deste ângulo a estabilidade diminui abruptamente.

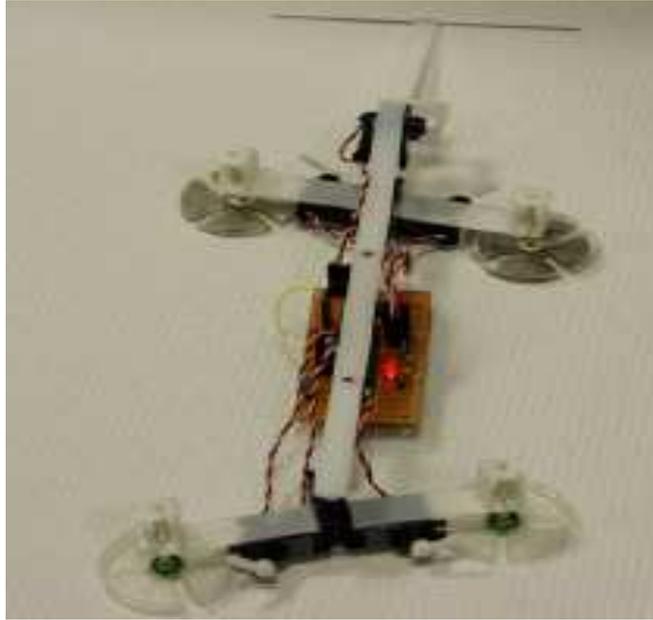


Figura 39 Fotografia do protótipo Geckobot (fonte: Unver, *et al.*, 2006)

O adesivo fibrilar apresentado por Menon, *et al.* (2004) encontra-se ainda em desenvolvimento e não consegue atingir desempenhos tão elevados como outros adesivos macios e secos. O adesivo sintético baseado na lagartixa foi testado e comparado com adesivos moles, como o Silly Putty® e o Polidimetilssiloxano (Polydimethyl Siloxane – PDMS) plano. Verificou-se, experimentalmente, que o Silly Putty® exerce uma força adesiva normal mais elevada e, portanto, foi escolhido para se testar a sua aplicação na robótica (Menon e Sitti, 2005). Para testar o Geckobot foi utilizado o adesivo PDMS (Unver, *et al.*, 2006). Embora o PDMS seja um material estável, é degradado e contaminado pelo pó e poeira. Portanto, após algum tempo perde as suas características adesivas. Este problema seria melhorado usando PDMS micro-padronizado, de forma a apresentar características de auto-limpeza como acontece com as lagartixas (Unver, *et al.*, 2006). Para testar o Waalbot, Murphy, *et al.* (2006) equiparam os pés do robô com material adesivo polímero (Smooth-On Vytaflex 10), que partilha muitas características de desempenho com o material adesivo seco imaginado. Como os adesivos usados nos pés do robô acumulam poeira e outros contaminantes, o seu desempenho degrada-se rapidamente. Portanto, estes adesivos não são adequados para ambientes exteriores sujos, para a locomoção no chão de interiores, ou para tarefas de longa duração.

Daltorio, *et al.* (2005) converteram o Mini-WhegsTM, um pequeno robô (5,4 cm por 8,9 cm, 87 gramas) que utiliza quatro *whegs* para a locomoção, num robô trepador com pés complacentes e equipados com adesivos convencionais. Os pés estão ligados a áreas de contacto que se situam na extremidade das *whegs* e a flexibilidade dos pés actua como uma articulação entre os pés e as *whegs* (Figura 40).

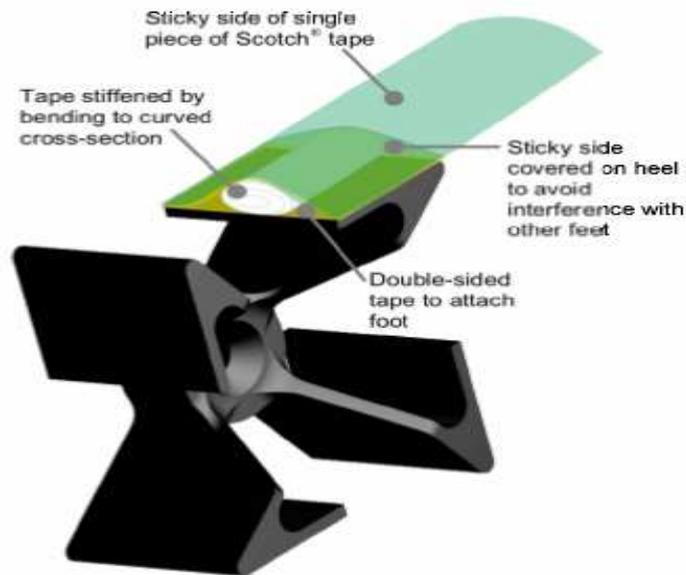


Figura 40 Detalhe de uma *wveg* e dos pés do robô trepador Mini-WhegsTM 7, com pés “feitos” de fita-cola de escritório (fonte: Daltorio, *et al.*, 2006)

Os pés entram em contacto com o substrato, dobram-se à medida que o eixo das *whegs* roda, descolam-se do substrato de forma gradual, e retornam à sua posição inicial prontos para o próximo contacto.

Esses investigadores relatam que o Mini-WhegsTM 7 pode escalar paredes de vidro, andar em tectos e realizar transições entre superfícies ortogonais, usando adesivos padrão sensíveis à pressão (Figura 41). O principal problema com esta abordagem (embora alguns testes tenham sido realizados para encontrar o melhor projecto para o pé e para a área de contacto da fita adesiva (Daltorio, *et al.*, 2007)) é que depois de alguns ensaios, o robô cai com uma frequência crescente à medida que a fita adesiva se torna suja ou danificada.

Novos desenvolvimentos deste robô, descritos por Daltorio, *et al.* (2006), levaram à substituição dos pés por um novo adesivo reutilizável e inspirado nos insectos (Figura 42). Foram testadas duas amostras de polímeros: uma lisa e uma com uma superfície micro estruturada, inspirada nos insectos. O polímero adesivo estruturado reutilizável apresenta

menos tenacidade que o adesivo anterior, resultando numa capacidade de escalada inferior. No entanto, após acrescentar uma cauda, mudando a alimentação energética do robô para *off-board*, e alargando os pés, o robô foi capaz de ascender a superfícies verticais usando o novo adesivo. Comparando com a abordagem anterior, os pés equipados com este polímero adesivo mantiveram as suas propriedades de tracção/adesivas ao longo de várias horas de ensaios, e as suas características são “renováveis” simplesmente lavando-os com água e sabão.

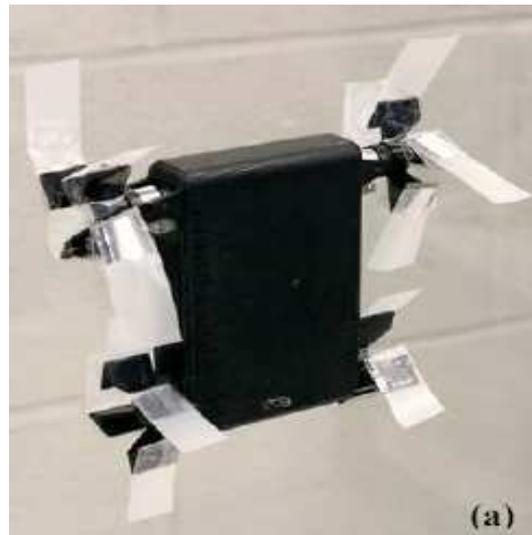


Figura 41 Mini-WhegsTM 7 numa superfície vertical de vidro com pés “feitos” de fita-cola de escritório (fonte: Daltorio, *et al.*, 2006)

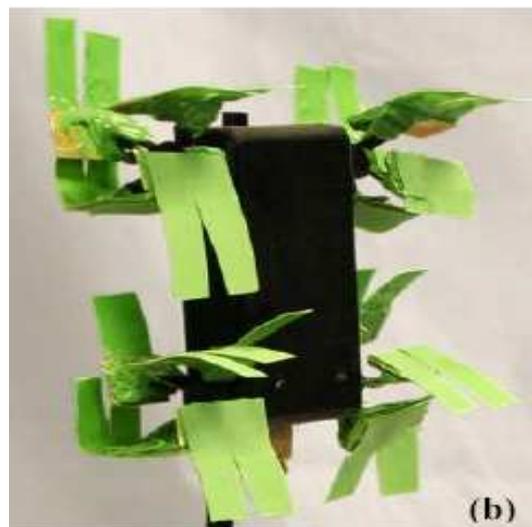


Figura 42 Mini-WhegsTM 7 numa superfície vertical de vidro com pés “feitos” de um polímero micro estruturado e uma cauda de 25 cm (a cauda não é visível) (fonte: Daltorio, *et al.*, 2006)

De acordo com o que foi descrito anteriormente, nenhuma das abordagens apresentada acima é adequada para superfícies porosas e normalmente poeirentas, típicas de edifícios, tais como

superfícies de tijolo, cimento, reboco ou pedra. O robô Mini-WhegsTM 7, introduzido anteriormente, só anda sobre superfícies de vidro lisas e limpas. No entanto, um robô trepador, para ser de aplicação prática, deve ser também capaz de percorrer superfícies mais ásperas e sujas. Isto requer adesivos que sejam resistentes a poeiras e óleos. Além disso, podem (e devem) ser adicionados mecanismos alternativos de adesão, tais como as garras ou os espinhos dos insectos, para aproveitar a rugosidade das superfícies. Assim, para responder a esta lacuna, surgiram robôs trepadores usando micro espinhos.

Com base nestas ideias, Wei, *et al.* (2006) acrescentaram garras, espinhos e tornozelos complacentes ao Mini-WhegsTM, o que permite a esta máquina escalar superfícies lisas ou porosas. As novas *whegs* dianteiras apresentam três raios cada, com um pé (tarso) ligado à extremidade de cada raio.

Inspirado pelos mesmos mecanismos observados em alguns insectos trepadores e nas aranhas, Asbeck, *et al.* (2006) desenvolveram uma tecnologia que permite que os robôs trepem superfícies verticais duras e planas, incluindo betão, tijolo, estuque e alvenaria, sem o uso de sucção, aspiração ou adesivos. Esta tecnologia emprega matrizes de espinhos em miniatura que se agarram às asperezas da superfície. Ao contrário das garras de um gato, os pequenos espinhos não necessitam de penetrar nas superfícies. Em vez disso, eles exploram pequenas rugosidades (saliências, covas ou fendas) presentes nas superfícies.

Segundo estes autores, à medida que os espinhos se tornam menores, é possível subir superfícies mais lisas, porque a densidade de contactos espinhos/asperezas utilizáveis aumenta rapidamente. No entanto, é necessário um grande número de espinhos, porque cada contacto sustenta apenas uma força limitada. Portanto, os princípios chave de projecto por detrás da escalada com micro espinhos são garantir que:

- Tantos espinhos quanto possível se vão ligar de forma independente às asperezas;
- A carga total ser distribuída entre os espinhos tão uniformemente quanto possível.

Os princípios acima foram demonstrados num robô trepador com um peso de 0,4 kg, chamado Spinybot, que sobe superfícies duras, como paredes de betão, tijolo, estuque e grés (Asbeck, *et al.*, 2006). O robô tem seis pernas, sendo que cada uma é um mecanismo sub-actuado, accionado através de um único actuador em conjunto com complacência passiva, que é responsável por engatar e desengatar os espinhos. Um sétimo actuador produz um movimento que avança alternadamente as pernas de cada um dos dois tripés pela parede acima. Cada um

dos pés do Spinybot é composto por dez mecanismos planares que simulam dedos dos pés, com dois espinhos por dedo. Os mecanismos são criados usando um processo de prototipagem rápida, o que permite combinar materiais duros e moles numa única estrutura. Conforme mostrado na Figura 43, cada dedo do pé inclui vários membros rígidos, conectados por ligações flexíveis, com os espinhos embutidos no plástico rígido. Cada mecanismo do dedo pode deflectir e esticar, de forma independente da dos seus vizinhos. Isto maximiza a probabilidade de que vários espinhos, em cada pé, encontrem asperezas onde se possam “agarrar” e partilhar parte do peso do robô.

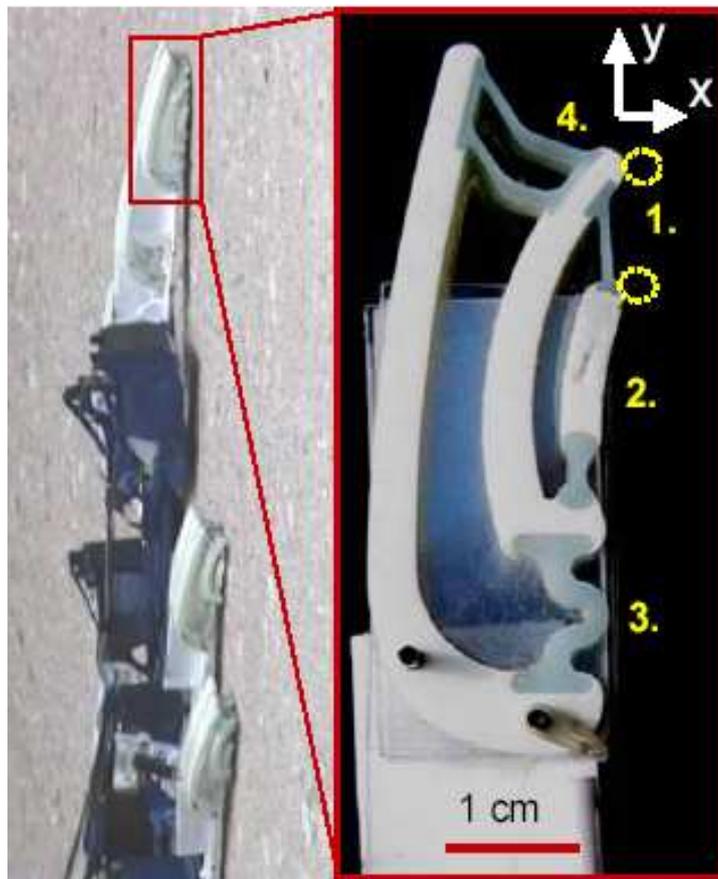


Figura 43 Vista da secção superior do Spinybot numa parede de betão (à esquerda) e vista detalhada de um dedo do pé (à direita) (fonte: Asbeck, *et al.*, 2006)

2.4. ARQUITECTURAS “NÃO CONVENCIONAIS”

Várias outras arquitecturas, que neste capítulo se designam por “não convencionais”, dadas as suas características próprias, têm sido propostas para robôs trepadores com a finalidade de lhes permitir ultrapassar problemas específicos e satisfazer aplicações particulares.

2.4.1. LOCOMOÇÃO / ADESÃO SIMULTÂNEA ATRAVÉS DE PROPULSÃO

Os robôs que se deslocam recorrendo à propulsão, fazem uso das forças desenvolvidas por hélices para aderir às superfícies e para se deslocarem (Nishi, 1991), mas são usados em aplicações específicas e muito restritas.

Nishi (1991) desenvolveu um robô trepador que utiliza a força de propulsão gerada por hélices, actuadas por motores, para se deslocar (Figura 44). Estas hélices apresentam um diâmetro relativamente pequeno, de forma a aumentar a insensibilidade às rajadas de vento. O contacto entre o robô e a superfície é mantido através de um grande número de rodas não actuadas para que, mesmo que a superfície seja irregular, seja sempre mantido o contacto entre o veículo e a parede. Uma vez que as rodas não são actuadas, o veículo encontra-se equipado com um sistema de travagem das rodas, caso se pretenda que ele permaneça imóvel num determinado local.

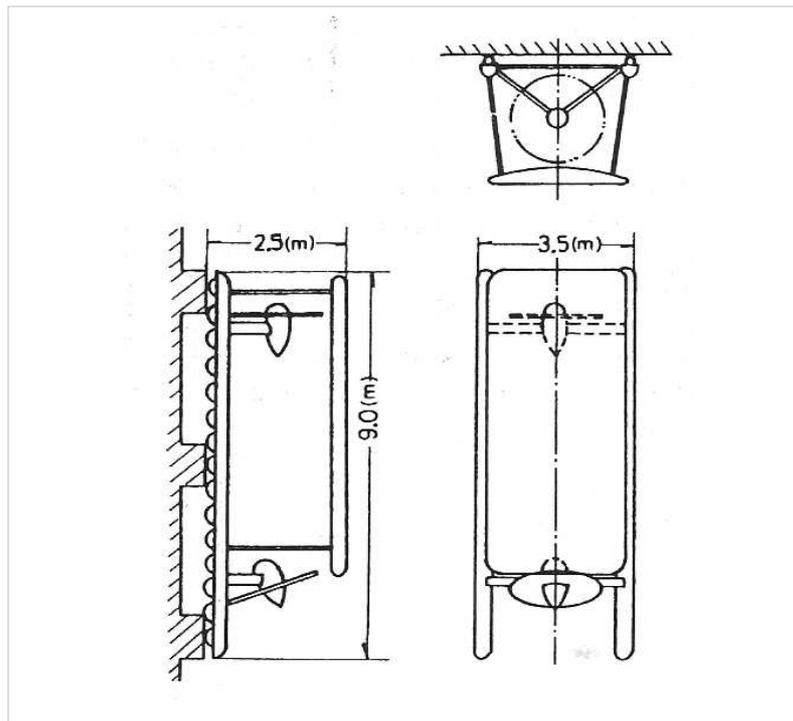


Figura 44 Modelo conceptual de um robô trepador que recorre à propulsão para se deslocar (fonte: Nishi, 1991)

A força de propulsão é inclinada para o lado da superfície de forma a produzir a força de atrito necessária entre as rodas e a parede do edifício. Uma vez que se prevê a ocorrência de vento forte nas paredes de edifícios altos, a direcção da força de propulsão pode ser controlada, de forma a compensar a força do vento que actua sobre o robô. A força de propulsão é controlada tanto na sua amplitude (variando a velocidade de rotação das hélices)

como na sua direcção (variando a inclinação das hélices). Foi também incluído nesta máquina um dispositivo para aumentar a força de atrito entre o veículo e a superfície em que este se desloca. O dispositivo em questão é um tipo de *spoiler*, que aproveita o vento cruzado para originar uma força de sustentação direccionada para o lado da parede. O ângulo de ataque deste *spoiler* é ajustado antes de o robô começar a sua deslocação, em função da velocidade e direcção previstas do vento cruzado. Por último, foi implementado um amortecedor entre o corpo do robô e as suas rodas, de forma a reduzir a vibração de alta-frequência devida às rajadas de vento.

No entanto, está demonstrado que ocorre escorregamento deste robô quando se verificam mudanças abruptas na direcção do vento ou da sua velocidade.

2.4.2. ADESÃO RECORRENDO À ELECTROADESÃO

A electroadesão é uma tecnologia de adesão electricamente controlável, cujo pedido de patente se encontra pendente (SRI International, 2010). Esta tecnologia envolve a indução de cargas electrostáticas num substrato da parede usando uma fonte de alimentação ligada a “almofadas” complacentes situadas na base de contacto do robô móvel com a superfície (Figura 45).

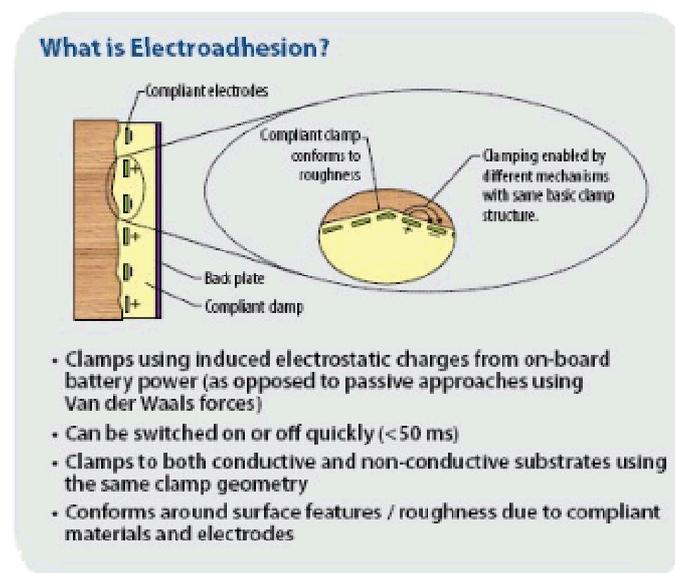


Figura 45 Princípio de funcionamento da tecnologia de electroadesão (fonte: SRI International, 2010)

A electroadesão oferece vantagens sobre outros tipos de tecnologias para implementar a adesão em robôs trepadores. A SRI verificou a ocorrência de preensão segura em materiais de

construção comuns, incluindo vidro, madeira, metal, betão, tijolo, estuque, aço e paredes secas, etc., com pressões de adesão na gama de 0,5 a 1,5 N/cm² de área de contacto. A tecnologia funciona em substratos condutores e não-condutores, materiais lisos ou ásperos, e através de poeira e detritos. Ao contrário dos adesivos convencionais ou secos, a electroadesão pode ser modulada ou desligada para implementar a mobilidade ou para limpeza. Esta tecnologia usa uma quantidade muito pequena de energia (da ordem de 20 μW/N de peso suportado) e mostra a capacidade de prensão repetida a superfícies fortemente cobertas de poeira ou outros detritos.

Dadas estas características, a electroadesão presta-se a ser utilizada numa variedade de robôs trepadores. Esta tecnologia tem sido demonstrada com sucesso em robôs trepadores com lagartas, com velocidades de escalada de até 1 comprimento do corpo (25 centímetros, no caso do protótipo desenvolvido pela SRI) por segundo (Figura 46).



Figura 46 Robô trepador a subir uma parede de tijolo recorrendo à electroadesão (fonte: SRI International, 2010)

Outras vantagens da electroadesão incluem a sua natureza não danificadora das superfícies e o facto de ser leve, o que é crucial em aplicações de robôs trepadores.

2.4.3. ROBÔ TREPADOR EQUIPADO COM UM BALÃO

Para limpar as superfícies envidraçadas internas de átrios e telhados de vidro são necessários, na maioria dos casos, pórticos de grandes dimensões para permitir o acesso do pessoal de limpeza, ou são contratados alpinistas a um custo elevado. Portanto, esta é uma aplicação adequada para a utilização de robôs trepadores. No entanto, o principal problema é encontrar um meio de salvar o robô e o local de acção contra eventuais quedas. Além disso, é extremamente difícil ao pessoal técnico alcançar o robô e repará-lo, em caso de avaria.

Tendo estas ideias em mente, Elkmann, *et al.* (2002) propuseram um robô equipado com um balão para limpar a superfície interna de átrios e telhados de vidro (Figura 47). A solução proposta por estes investigadores para automatizar esta tarefa particular consiste num balão cheio de hélio, com o formato de um charuto, e num mecanismo de locomoção equipado com duas pernas. O balão serve para levantar o mecanismo de locomoção e a ferramenta de limpeza até à superfície de vidro. Quando os pés do robô entram em contacto com a superfície envidraçada, aderem a esta através das ventosas com que os pés do robô se encontram equipados, sendo depois o balão guiado pelo mecanismo à medida que se desloca no telhado.



Figura 47 Robô trepador equipado com um balão a hélio, que consiste num mecanismo de locomoção e numa ferramenta de limpeza (fonte: Elkmann, *et al.*, 2002)

O mecanismo de locomoção situa-se na parte frontal do balão, e este, por sua vez, está equipado com uma ferramenta de limpeza. Na outra ponta do balão encontram-se outros módulos, tais como a caixa de controlo, um tanque de água, e outros sistemas de compensação de peso. O posicionamento do balão efectua-se através de um cabo ao qual este se encontra preso.

Devido à utilização do balão cheio de hélio, o robô não cai e, se ocorrer alguma avaria ou for necessária alguma manutenção ao equipamento, o robô pode ser recuperado pelo pessoal simplesmente puxando o balão para baixo por intermédio do cabo que lhe está ligado.

2.4.4. ROBÔ TREPADOR COM LOCOMOÇÃO HÍBRIDA

Shores e Minor (2005) apresentam um robô bípede, que tem a particularidade de se poder transformar de forma a implementar uma locomoção híbrida, combinando os benefícios da locomoção combinada, por escalada, marcha e rolamento, como se apresenta na Figura 48.

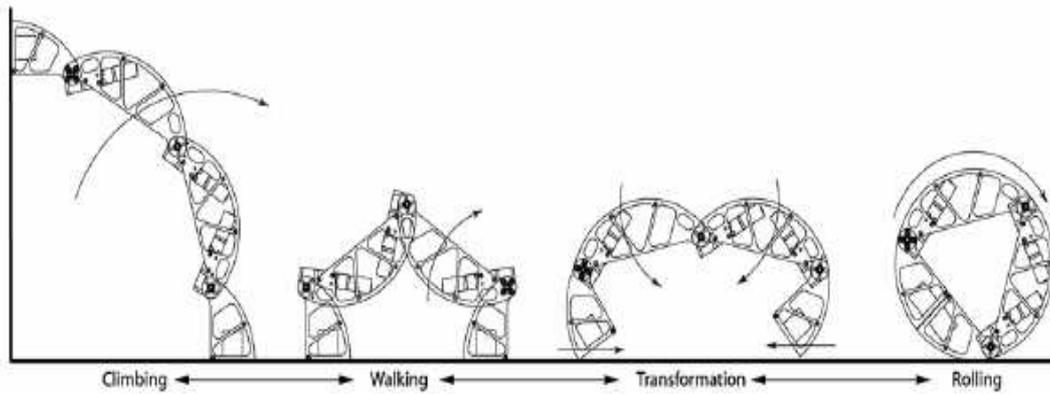


Figura 48 Robô híbrido efectuando as transições entre trepar, andar e rolar (fonte: Shores e Minor, 2005)

Este projecto fornece todas estas primitivas de locomoção sem a necessidade de adição de actuadores extra, para além daqueles necessários para a escalada. Isto é conseguido através do uso de um exoesqueleto, com a forma de um disco, que fornece uma superfície de rolamento. Os pés encontram-se equipados com electroímãs que permitem ao robô fixar cada um dos pés numa superfície ferromagnética, de forma a poder subir por ela.

2.4.5. ROBÔ TREPADOR DINÂMICO

Degani, *et al.* (2007) introduziram um mecanismo para um robô trepador, que usa movimentos dinâmicos de forma a subir entre duas paredes verticais paralelas (Figura 49). Este robô conta com os seus próprios movimentos dinâmicos internos para ganhar altura.

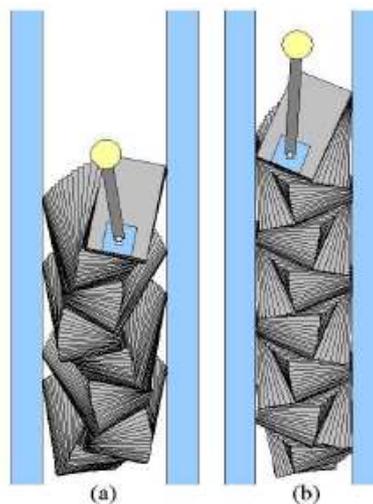


Figura 49 Dois movimentos típicos do robô trepador dinâmico (a trajetória do corpo principal, ao longo do tempo, encontra-se a tracejado) (a) puramente dinâmico (suporte único) e (b) suporte duplo (fonte: Degani, *et al.*, 2007)

Uma vantagem deste mecanismo é que ele permite escalar com apenas um único grau de liberdade accionado. No entanto, encontra-se limitado a trepar entre duas superfícies verticais paralelas.

Apesar de todos os desenvolvimentos efectuados até este momento, todas as arquitecturas propostas, convencionais e não convencionais, ainda precisam de ser melhoradas, e até este momento ainda não foi encontrada nenhuma solução definitiva e estável. Portanto, a evolução e o desenvolvimento continuam nesta área de investigação associada à robótica.

3. ARQUITECTURA BASE DO ROBÔ

Neste capítulo descreve-se a arquitectura planeada para a implementação do robô trepador que utiliza um sistema magnético do tipo permanente como forma de adesão em superfícies verticais ou invertidas. Este robô trepador foi baptizado de TEDI 2010.

Como referido anteriormente, a adesão magnética só pode ser utilizada em casos específicos onde a superfície o permita, isto é, em superfícies do tipo ferromagnéticas. Este método é rápido, mas poderá implicar a utilização de actuadores algo pesados para se obter a força de adesão necessária, que será sempre em função do peso final do robô. Uma das possibilidades para o robô aderir à superfície de locomoção, é através do uso de electroímans, e a outra é através do uso de ímanes permanentes, combinados com a utilização de rodas (como é o caso deste protótipo) ou de lagartas para se mover. As principais vantagens da utilização de ímanes permanentes são o facto de haver uma maior economia no consumo de energia associado ao processo de adesão, não ocorrer qualquer perda de aderência no caso de uma falha de energia e os ímanes permanentes serem seguros para a aplicação em ambientes perigosos, como são as zonas ATEX. O seu maior problema está associado à espessura mínima da superfície em que o robô se pode deslocar. Se a espessura da superfície for muito reduzida, pode dar-se o

caso de ocorrer a sua deformação, entrando esta em contacto com os ímanes do robô. Isto leva a um grande aumento da força de atrito gerada entre o veículo robotizado e a superfície de deslocamento, podendo impedir o movimento correcto do robô sobre a superfície. Outro problema inerente a esta tecnologia tem a ver com o facto da superfície puder apresentar várias deformações, que poderiam aproximar exageradamente os ímanes da superfície (inclusive provocar o seu contacto), levando à manifestação de atritos, ou o oposto, isto é, um afastamento exagerado, que poderia por em causa a capacidade de adesão do robô à superfície de deslocamento vertical, ou mesmo provocar a sua queda. Para tentar ultrapassar, ou minimizar, a manifestação destes problemas, propõe-se a implementação de um dispositivo que permita variar a distância entre os ímanes e a superfície de deslocamento, em função das irregularidades detectadas pelo próprio robô, de forma a manter esta distância controlada. Assim, é proposto um robô com ímanes permanentes, que são dinamicamente ajustados em relação à superfície de deslocamento (com o recurso a um sistema de detecção da sua distância à superfície) através de uma estrutura de suporte acoplada a um veio sem-fim motorizado e um par de sensores indutivos. Este robô vai então assumir um comportamento dinâmico em relação à superfície de deslocamento, com o objectivo de minimizar, relativamente à adesão, o problema que representam as irregularidades. O sistema de controlo do posicionamento vertical dos ímanes permanentes vai executar um ajuste programado, com base na informação fornecida pelos sensores que monitorizam as características da superfície de apoio.

Posto isto, decidiu-se optar pela construção de um robô com uma estrutura modular, constituído por quatro módulos de locomoção/adesão, cada um com um motor de tracção, estruturalmente associado a uma roda e a um íman permanente circular, e um motor para a adesão, associado a uma estrutura com mobilidade vertical e constituída, entre outros componentes, por um íman permanente. Também existirá um sistema de controlo baseado num PLC.

3.1. SENSORES E ACTUADORES

Os robôs, em função da sua especificidade (que está associada à aplicação prática pretendida), têm necessidade de reconhecer o meio por onde se deslocam, de forma a ser possível realizarem os diferentes tipos de tarefas para as quais são desenvolvidos e implementados. São os sensores que permitem o reconhecimento do meio envolvente, ou garantem a execução de uma determinada tarefa com sucesso, pois é por intermédio deles que o robô obtém a

percepção sensorial das suas acções. Estas acções são executadas com o recurso a actuadores, pois são estes que permitem ao robô actuar e interagir com o meio envolvente. Assim, é da relação Sensor – Actuador que é possível ao robô dominar e controlar as tarefas para as quais está programado. No caso particular deste protótipo, um robô trepador com adesão por ímanes permanentes, foram adoptados vários sensores e actuadores que têm como objectivo permitir que este robô tenha um comportamento adequado à finalidade pretendida, isto é, deslocar-se em superfícies verticais e/ou invertidas.

3.1.1. SISTEMA DE SENSORES

A escolha dos sensores está relacionada com os principais factores físicos/variáveis que terão de ser percebidas e dominadas pelo robô durante a execução do comportamento pretendido e programado. Assim, inicialmente há que identificar e quantificar esses factores. Estes são:

1. A existência de objectos, mais ou menos pronunciados, no espaço de acção e deslocação do robô;
2. A medição das características do movimento adoptado pelo robô. Este terá que, por exemplo, efectuar um movimento rectilíneo quando tal comando for seleccionado, identificando possíveis assimetrias rotacionais dos actuadores associados a esta tarefa, para posterior correcção automática e/ou manual;
3. O alcance na acção de controlo vertical do sistema de adesão terá que ser devidamente monitorizado e tabelado, para impedir que o sistema mecânico fique inoperativo perante uma acção descontrolada face às características do meio, pois este pode ter características ferromagnéticas mais ou menos ideais para o processo de adesão;
4. O robô necessita de um *feedback* permanente das características da superfície de contacto com o robô, para que seja possível otimizar as forças de adesão magnéticas necessárias a um comportamento equilibrado.

Após a identificação e compreensão da influência destes factores no sucesso do comportamento do robô, é possível seleccionar os sensores mais adequados. Para controlar o primeiro factor identificado é necessário utilizar o *Sound Navigation and Ranging* (SONAR).

Assim, foram escolhidos sensores do tipo ultra-sónico, pois estes permitem obter um bom alcance em largura e também em profundidade, para permitir a detecção da presença de objectos numa área facilmente quantificada e localizada, em posição frontal ou na retaguarda, face à posição do robô.

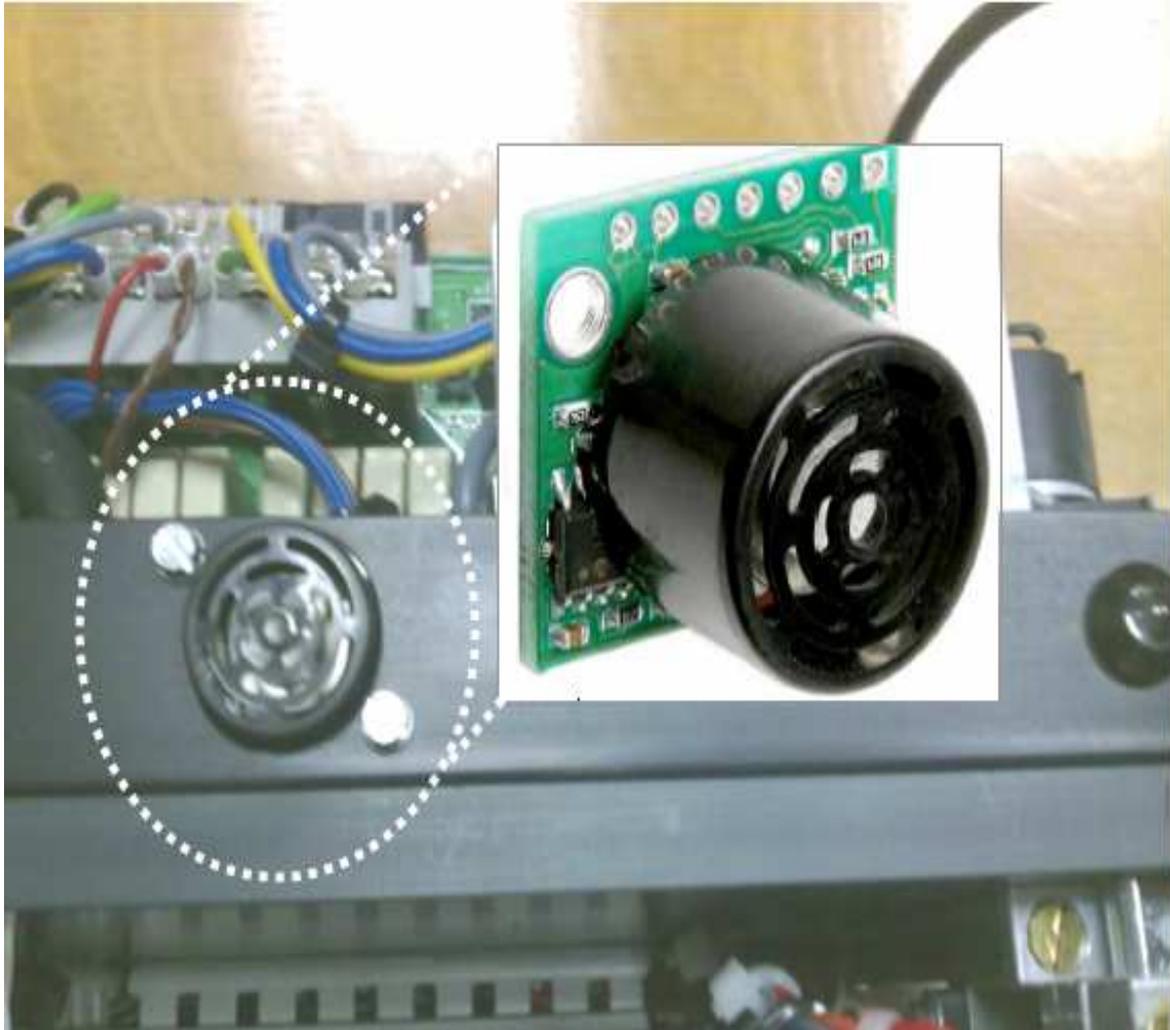


Figura 50 Montagem de dois sensores ultra-sónicos, um frontal e outro traseiro, para a funcionalidade de sonar

Estes sensores terão que possuir características específicas, para ser possível quantificar a distância e o posicionamento dos obstáculos no espaço de acção e deslocamento do robô. Com este objectivo em mente, foi escolhido o modelo LV-MaxSonar EZ3, que permite uma alimentação V_{cc} entre 2,5 V DC e 5,5 V DC, um alcance de detecção entre o *short-range* e o *long-range* bastante flexível, em função do tipo de montagem implementada. Este sensor permite detectar objectos a uma distância entre 15,24 cm e 6,45 m, com uma resolução de 2,54 cm. O interface de saída utilizado, entre outros disponíveis, é em tensão, isto é, do tipo

análogo com um valor de $V_{cc}/512$ por cada 2,54 cm de distância ao obstáculo no campo de detecção do sensor.

Nas Figuras 50 e 51 podem-se observar os sensores ultra-sónicos adoptados e as suas características funcionais.

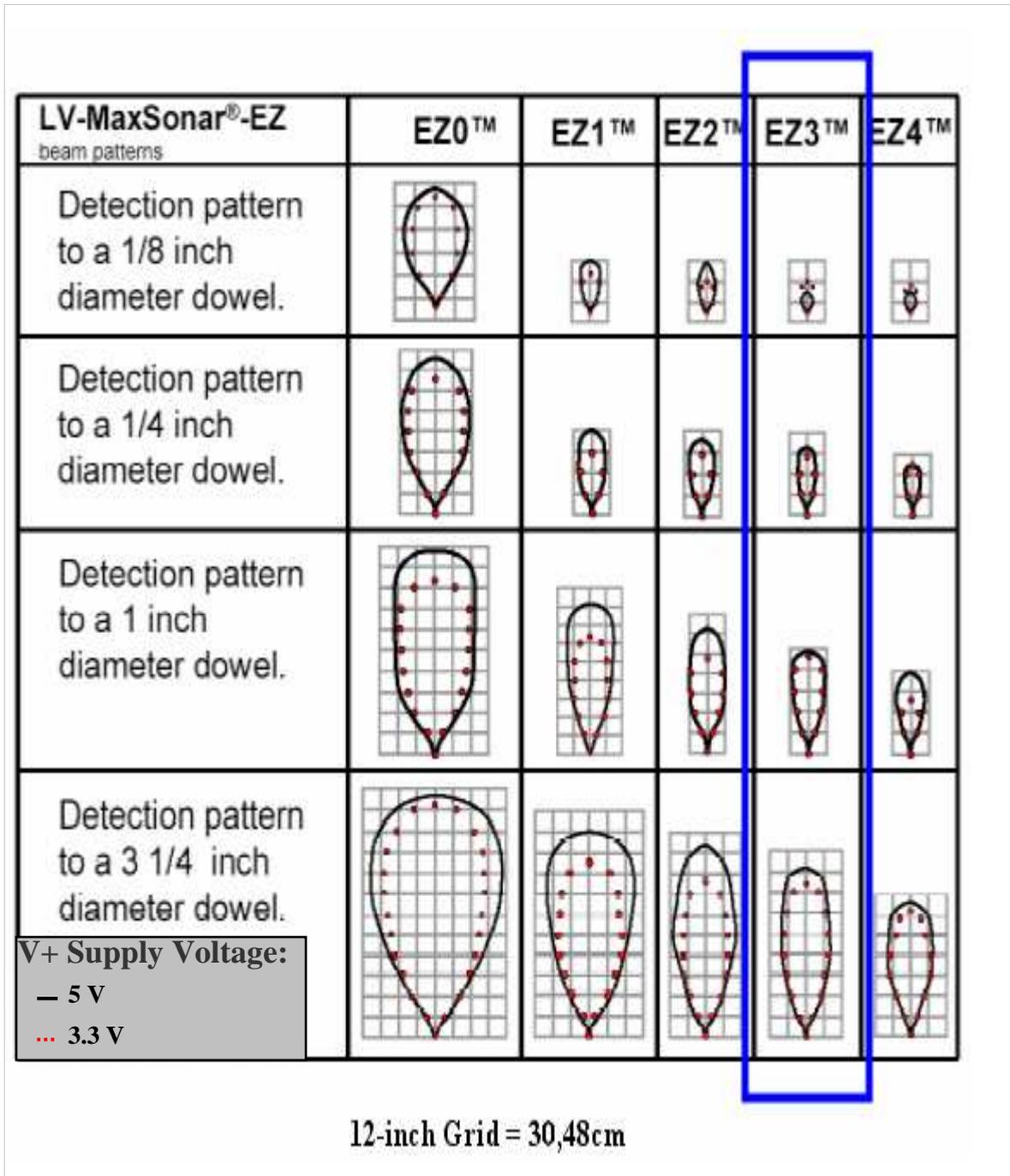


Figura 51 Característica do feixe ultra-sónico obtido a partir do sonar

Estes sonares são ligados electricamente aos dois terminais de entrada analógica presentes no PLC, utilizado para controlar o funcionamento do robô trepador.

Para controlar o segundo factor identificado é necessário utilizar *encoders* acoplados aos motores de locomoção do robô. Com este objectivo, foram escolhidos motores compactos, já com a caixa redutora e o *encoder* acoplado ao veio. O *encoder* é de um tipo que utiliza interruptores de efeito de Hall, mais precisamente três interruptores, o que permite obter três impulsos por rotação do motor. Na Figura 52, pode-se observar um desenho deste motor e o pormenor do esquema eléctrico do *encoder*.

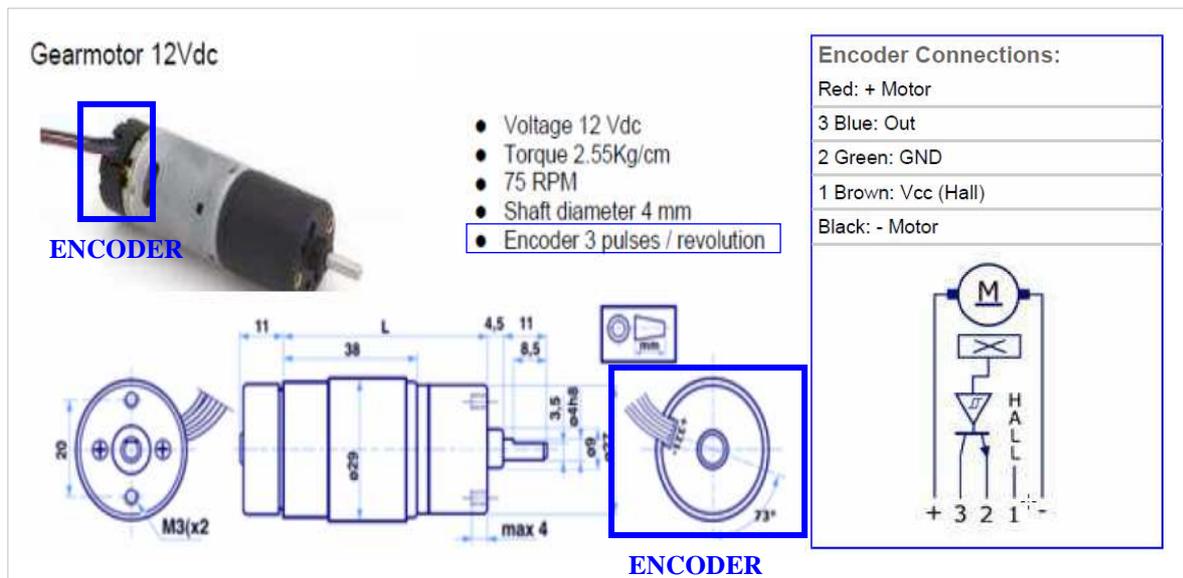


Figura 52 *Encoder* montado nos motores de locomoção

Como este factor se manifesta a uma frequência relativamente elevada, isto é, os impulsos provenientes dos *encoders* surgem a um ritmo elevado, tem-se na Figura 53 a quantificação do número máximo de impulsos gerados pelo conjunto motor (com caixa redutora) e *encoder*.

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Gearmotor de 75 RPM (máx.)} \\ \text{Motor (relação com a caixa de 90.3:1)} \Rightarrow \\ \Rightarrow 90.3 \times 75 = 6772,5 \text{ RPM (máx.)} \end{array} \right.$	\Rightarrow	$3 \times 6772,5 = 20317,5 \text{ impulsos/min}$
+		
$\text{Encoder de 3 impulsos/rotação (motor)}$		$\frac{20317,5}{60} \approx 338,6 \text{ impulsos/seg (Hz)}$

Figura 53 Quantificação dos impulsos gerados pelo conjunto motor (com caixa redutora) e *encoder*

Visto isto, conclui-se que é necessário utilizar entradas rápidas no PLC, para possibilitar a captura correcta de todos os impulsos gerados e fornecidos por parte dos *encoders* que estão montados nos quatro motores de locomoção do robô trepador.

Para controlar o terceiro factor identificado, é necessário utilizar sensores do tipo fotoeléctrico, com uma configuração física adequada à sua aplicação mecânica na estrutura de controlo do processo de adesão por meios magnéticos. Assim, para atingir este objectivo foram escolhidos *Photomicrosensors* da marca Omron com a referência EE-SX672A. Estes são facilmente integrados na estrutura mecânica e permitem um controlo preciso da zona vertical de segurança para o funcionamento do sistema de adesão. A Figura 54 permite ter uma melhor percepção da montagem proposta e utilizada no protótipo.

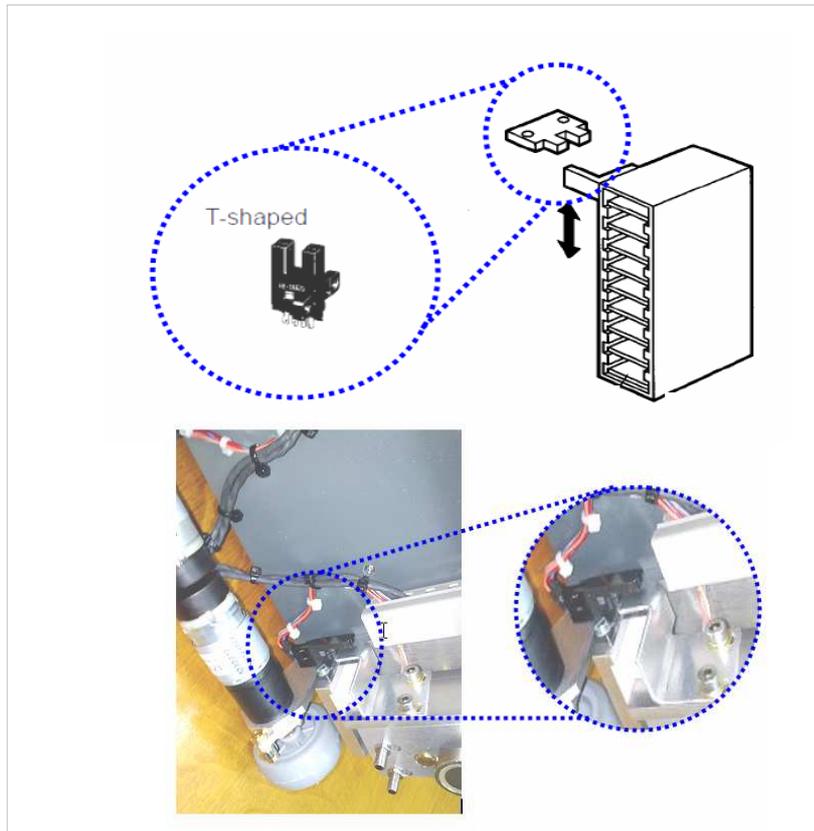


Figura 54 Sensor do tipo *Photomicrosensor*, da marca Omron (referência EE-SX672A), montado no sistema de adesão

Estes sensores permitem garantir que cada uma das unidades de adesão irá unicamente posicionar-se verticalmente numa zona de segurança definida por eles. Fora desta zona não é possível deslocar para cima ou para baixo a unidade de adesão, independentemente da informação recebida dos sensores que analisam as características da superfície por onde o robô se desloca. Estes sensores encontram-se electricamente ligados a terminais conectados a entradas do tipo digital, presentes no PLC.

Finalmente, para ser possível controlar o quarto e último factor identificado, é necessário implementar um sistema sensorial adequado ao tipo de superfície encontrado na zona de

acção do robô, pois é fundamental obter um *feedback* permanente das características dessa superfície. Este processo resulta da necessidade de otimizar as forças de adesão magnéticas necessárias a um comportamento equilibrado do robô, isto é, obter uma força de adesão suficiente para um deslocamento seguro nas superfícies ferromagnéticas verticais ou invertidas, evitando ao máximo o contacto físico com essas mesmas superfícies, para não existirem forças de atritos contrárias a esse equilíbrio. Com esta finalidade, foram escolhidos sensores/detectores do tipo indutivo, que são montados aos pares. A Figura 55 ilustra os sensores indutivos, da marca Efecter com a referência IY5049, utilizados no protótipo.

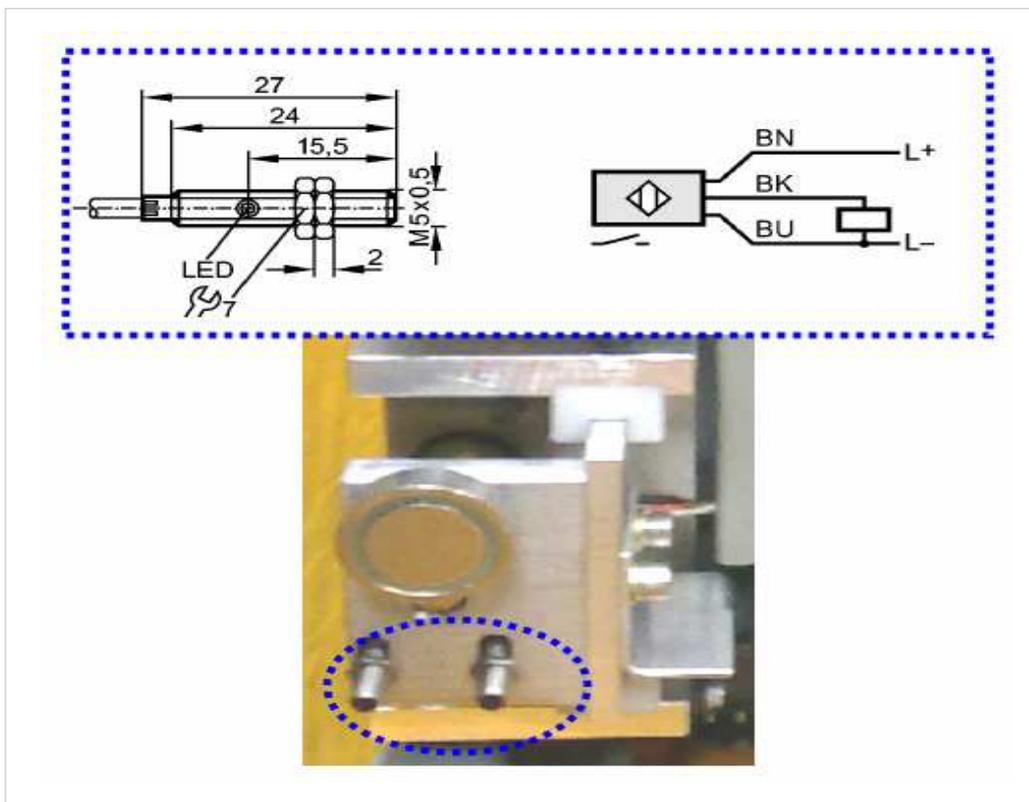


Figura 55 Sensores do tipo indutivo, da marca Efecter (referência IY5049), montados no sistema de adesão

Estes sensores encontram-se ligados electricamente a terminais de entrada do tipo digital, presentes numa das cartas de expansão que está ligada por um barramento de comunicação ao PLC.

Assim, após a análise dos sensores necessários, é possível concluir que estão reunidas as condições para ser (minimamente) possível ao robô trepador ter uma percepção dos factores associados às variáveis internas ou externas, com o objectivo de possuir um comportamento dinâmico e funcional próximo do pretendido e programado.

3.1.2. SISTEMA DE ACTUADORES

A escolha dos actuadores está relacionada com as funções que terão de ser dominadas pelo robô, durante a execução do comportamento pretendido e programado. Este é um robô trepador que possui rodas para a locomoção e que, relativamente ao princípio de adesão às superfícies, pertence ao grupo dos robôs trepadores magnéticos. Assim, é necessário a utilização de actuadores adequados à especificidade dos sistemas de locomoção e de adesão magnética.

Para o Sistema de Locomoção foram utilizados quatro motores com caixa redutora acoplada de uma forma intrínseca ao motor (*Gearmotor*), com um valor de binário conjugado suficiente para garantir o deslocamento de todo o conjunto, face ao peso associado e à força de gravidade que se manifesta numa estrutura em movimento vertical. Na Figura 56 representa-se o *Gearmotor* adoptado e a sua tabela de características, com especial enfoque no binário que este possui.



Figura 56 Motor com caixa redutora utilizado no Sistema de Locomoção

No Sistema de Adesão também foram utilizados quatro motores com caixa redutora acoplada de uma forma intrínseca ao motor, formando um conjunto (*Gearmotor*) (ver Figura 57) com

um valor de binário individual maior que o utilizado na locomoção. Este é suficiente para garantir o deslocamento da estrutura deslizante do sistema de adesão, onde estão aplicados o íman permanente e os sensores indutivos (ver Figura 58), mesmo que esta fique em contacto com a superfície ferromagnética, caso em que se manifesta fisicamente a máxima intensidade das forças magnéticas geradas.

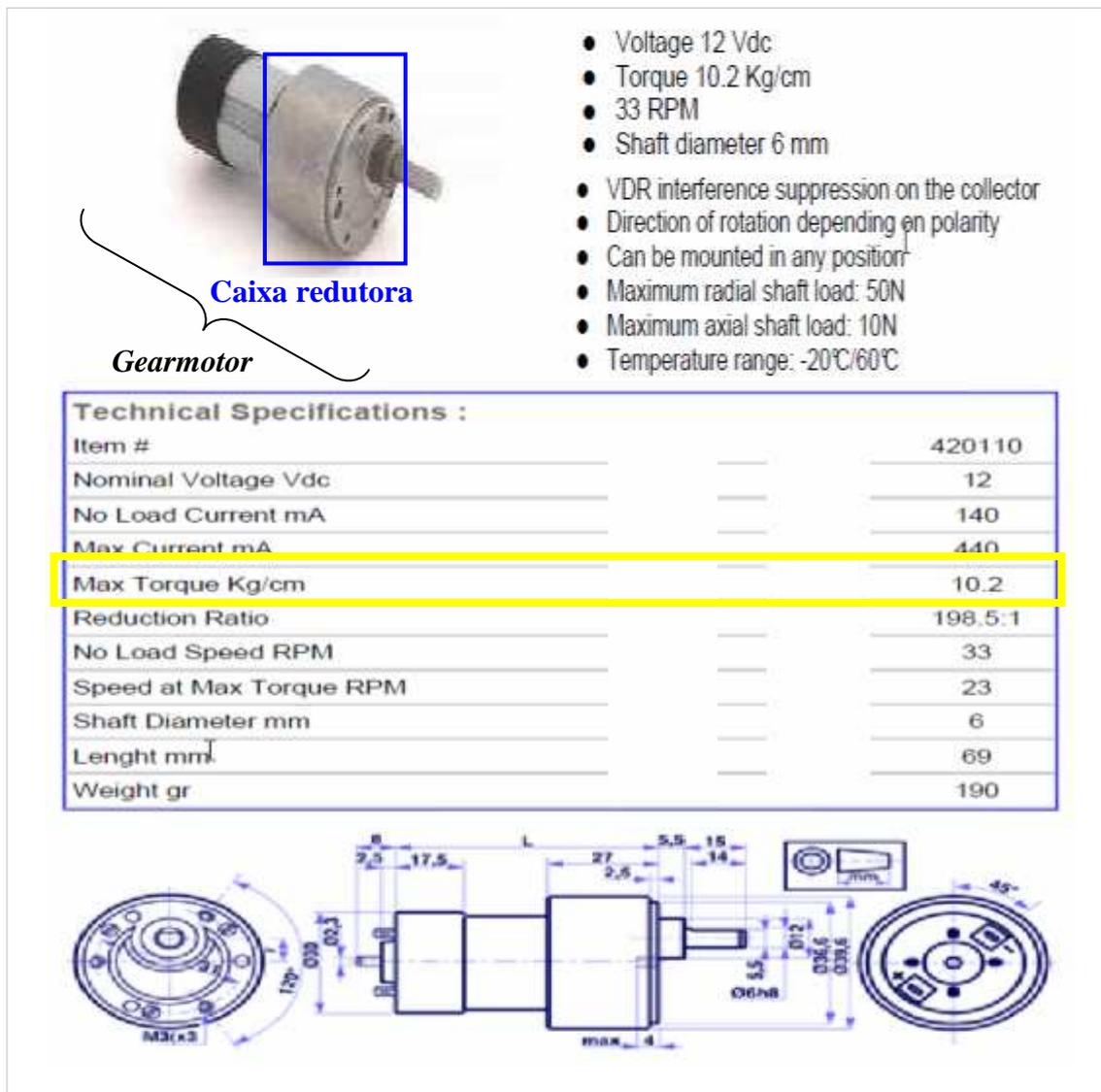


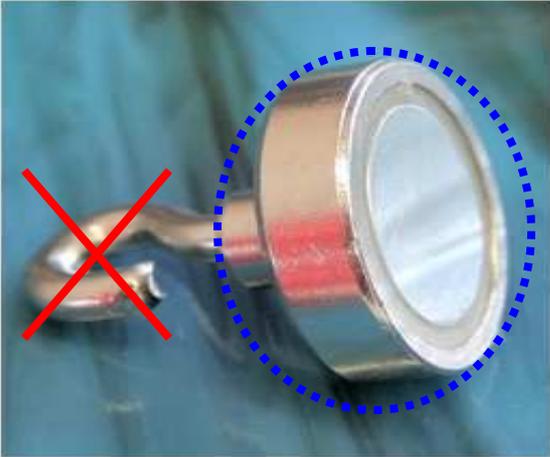
Figura 57 Motor com caixa redutora utilizado no Sistema de Adesão

As propriedades e curva característica das forças magnéticas inerentes ao íman permanente utilizado podem ser observadas nas Figuras 59 e 60, respectivamente. Considerando a situação dinâmica mais desfavorável, que consiste numa aproximação máxima sem que haja uma adesão completa (logo um atrito máximo), cada íman permanente desenvolve uma força magnética de aproximadamente 16 kgf. Este valor, que é por unidade de adesão, é superior ao peso total do protótipo do robô trepador.



Figura 58 Base deslizante do Sistema de Adesão, com o ímã permanente (à esquerda) e os sensores indutivos (à direita)

FTN-25: Gancho magnético 16 kg Força magnética



Nº de artigo:	FTN-25
Diâmetro da panela D:	25 mm
Diâmetro do gargalo d:	8 mm
Altura da panela H1:	7 mm
Altura total	
sem gancho H2:	14 mm
com gancho H3:	30 mm
Rosca M:	M4
Gancho	
Extensão da	
abertura a:	4 mm
Diâmetro interior b:	5.5 mm
Tolerância:	+/- 0.1 mm
Peso:	29 g
Acabamento:	banhado a níquel (Ni)
Força magnética:	+/- 16 kg
Temperatura operacional máx.:	80°C

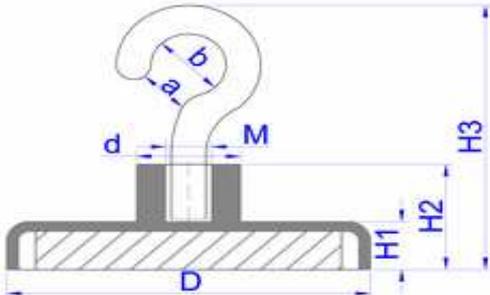


Figura 59 Ímã permanente utilizado em cada Unidade do Sistema de Adesão

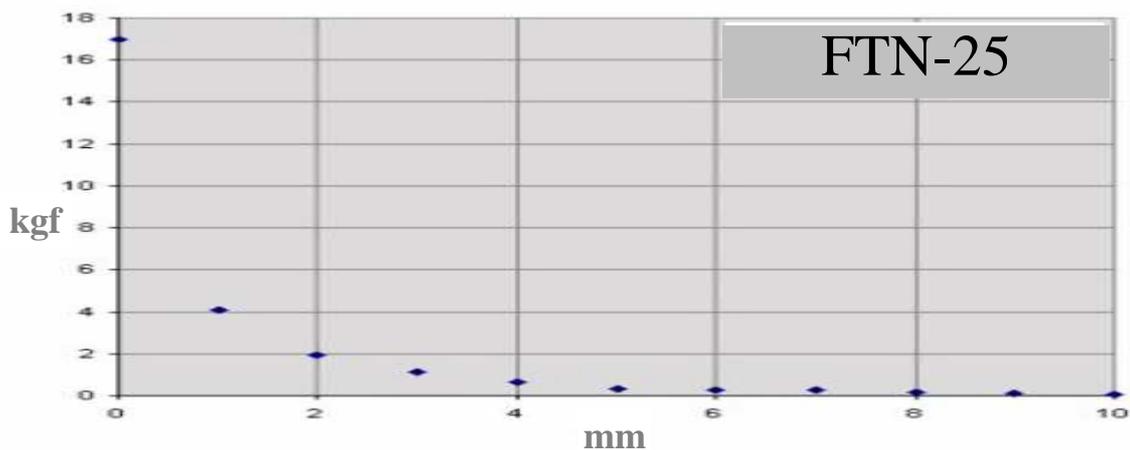


Figura 60 Curva característica equiparada do ímã utilizado para a adesão, numa relação força magnética vs. distância à superfície ferromagnética (fonte: supermagnete, 2010)

Analisando a Figura 60, pode-se concluir que a força depende da distância entre o ímã e a superfície ferromagnética. Verifica-se também que a força magnética decai rapidamente, isto é, exponencialmente com tendência para zero (exponencial decrescente), à medida que o ímã se afasta da superfície.

É de salientar que no caso de se pretender calcular a força de atracção em Newton, é necessário multiplicar a indicação em kgf, presente nas folhas de características dos ímanes permanentes utilizados, por $9,81 \text{ m/s}^2$, que é o valor da aceleração da gravidade ao nível do mar. Assim, 1 kg-força (kgf) (que é igual à força exercida por uma massa de 1 kg) corresponde a uma força de 9,81 Newton.

Por intermédio de um dinamómetro (aparelho graduado de forma a indicar a intensidade da força aplicada em um dos seus extremos) é possível medir a força conjunta desenvolvida pelos quatro ímanes do Sistema de Adesão sobre a superfície, e em várias direcções. A figura 61 descreve as medições efectuadas a título experimental.

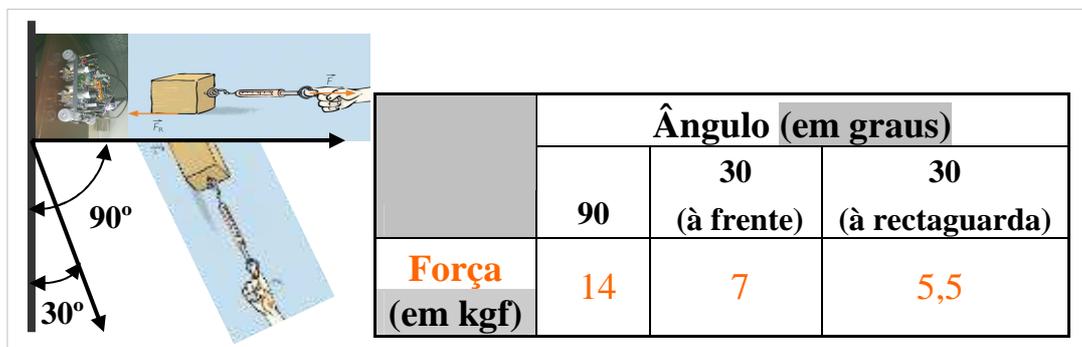


Figura 61 Medição da intensidade da força aplicada pelo Sistema de Adesão sobre a superfície

Além deste íman (FTN-25), com uma função principal no sistema de adesão, também existe um outro íman neste sistema, cuja funcionalidade é de carácter auxiliar, nomeadamente nas transições entre superfícies horizontais e verticais, e como auxiliar na melhoria da aderência das rodas de borracha às superfícies de contacto e deslocamento do robô, minimizando as perdas de tracção e os problemas com a locomoção vertical e/ou invertida. Este íman comporta-se como uma roda livre, que está paralela e em sincronismo com o movimento da roda de locomoção associada (em borracha), intensificando a pressão desta sobre a superfície de contacto. A sua montagem no conjunto de locomoção e adesão, e respectivas características, podem ser observadas nas Figuras 62 e 63.

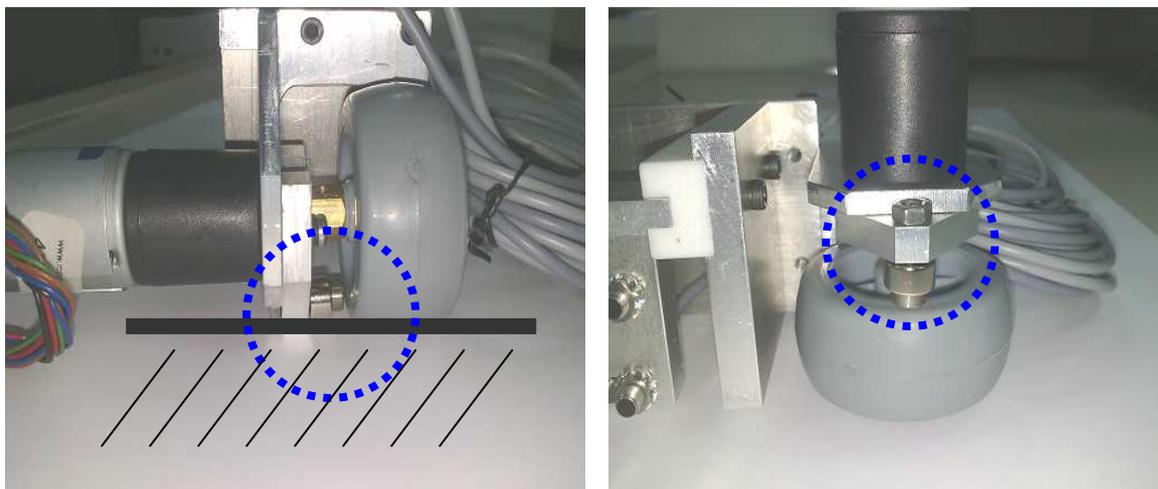


Figura 62 Íman circular como roda livre paralela à roda de locomoção em borracha

R-10-04-05-N: Círculo 10/4 mm H 5 mm

Nº de artigo:	R-10-04-05-N
Forma:	Círculo
Diâmetro exterior:	10 mm
Diâmetro interior:	4 mm
Espessura:	5 mm
Tolerância:	+/- 0.1 mm
Peso:	2,5 g
Acabamento:	banhado a níquel (Ni-Cu-Ni)
Magnetização:	N42
Força magnética:	+/- 2,2 kg
Temperatura operacional máx.:	80°C

Figura 63 Características do íman circular R-10-04-05-N, utilizado como auxiliar na aderência do Sistema de Locomoção à superfície de deslocamento do robô

Relativamente aos ímanes, na sua descrição é habitualmente indicada a força de atracção aproximada em gramas ou quilogramas. No entanto, este valor é o máximo atingível em teoria, e é apenas válido em condições excelentes. A força de atracção real depende de vários factores, entre os quais se podem indicar:

- A distância entre o íman e o objecto de atracção:

Se não existir contacto directo entre os corpos, a força de atracção diminui significativamente à medida que a distância aumenta. Mesmo uma pequena frincha de um milímetro pode reduzir a força de atracção para metade. E até uma fina camada de tinta contribui para a diminuição da força de atracção.

- O material do objecto de atracção:

A força de atracção teórica é válida apenas se o objecto de atracção for de ferro maciço puro. Caso seja de aço de construção ST37, o valor reduz cerca de 5%, e no caso do ST70 cerca de 30%.

- A superfície do objecto de atracção:

Quanto mais lisa for a superfície do objecto de atracção, maior a força de atracção. No caso de uma superfície rugosa, a força de atracção reduz-se significativamente.

- O sentido da força:

A força de atracção teórica é válida quando exercida no sentido vertical em relação à superfície de contacto, como por exemplo no caso do objecto de atracção ser atraído verticalmente sob o íman.

- A espessura do objecto de atracção:

O objecto de atracção não deve ser demasiado fino, senão atinge uma saturação magnética e uma parte do campo magnético permanece inútil.

3.2. UNIDADE PROGRAMÁVEL DE CONTROLO

A arquitectura de controlo do robô trepador é baseada num *Programmable Logic Controller* (PLC), em Português, Controlador Lógico Programável. É um computador especializado, baseado num microprocessador, que desempenha funções de controlo de diversos tipos e níveis de complexidade. Geralmente, as famílias de Controladores Lógicos Programáveis são

definidas pela capacidade de processamento de um determinado número de Entradas e/ou Saídas (E/S). Segundo a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), um PLC é um aparelho electrónico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, temporização, contagem e aritmética, controlando, por intermédio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

O PLC é o controlador ideal para lidar com sistemas caracterizados por eventos discretos, como são os processos em que as variáveis assumem valores zero ou um (ou variáveis ditas digitais). Podem ainda lidar com variáveis analógicas, definidas por intervalos de valores de corrente ou tensão eléctrica. As entradas e/ou saídas digitais são os elementos discretos e as entradas e/ou saídas analógicas são os elementos contínuos entre valores conhecidos de tensão ou corrente. Num sistema típico, toda a informação dos sensores é concentrada no controlador lógico que, de acordo com o programa em memória, define o estado dos pontos de saída, conectados a actuadores.

Os PLCs têm a capacidade de comunicação de dados via canais série e/ou outros, como a Ethernet. Com isto podem ser supervisionados por computadores, formando sistemas de controlo integrados. Assim, *softwares* de supervisão controlam redes de Controladores Lógicos Programáveis. Os canais de comunicação nos PLCs permitem conectar à interface de operação (HMI), computadores, outros PLCs e até mesmo unidades de entradas e saídas remotas. Tipicamente, cada fabricante estabelece um protocolo para fazer com que os seus equipamentos troquem informações entre si, ou com outros. Os protocolos mais comuns são o Modbus (Modicon – Schneider Electric), Profibus (Siemens), Unitelway (Telemecanique – Schneider Electric), DeviceNet (Allen Bradley) e Ethernet/IP (Allen Bradley), entre outros.

Neste caso em particular, foi utilizado um PLC da empresa *Allen Bradley* cuja designação comum é MicroLogix 1100/1763 (ver Figura 64). Segundo o fabricante, este é perfeito para monitorização remota e para aplicações que precisam de bastante memória, mas que se adequam a um número de E/S algo limitado.

Na Figura 64 podem-se identificar alguns recursos muito importantes para a aplicação pretendida, nomeadamente a existência de um *display*/teclado frontal, duas portas de comunicação que aceitam vários protocolos e a possibilidade de adição de módulos para expansão das E/S disponíveis.

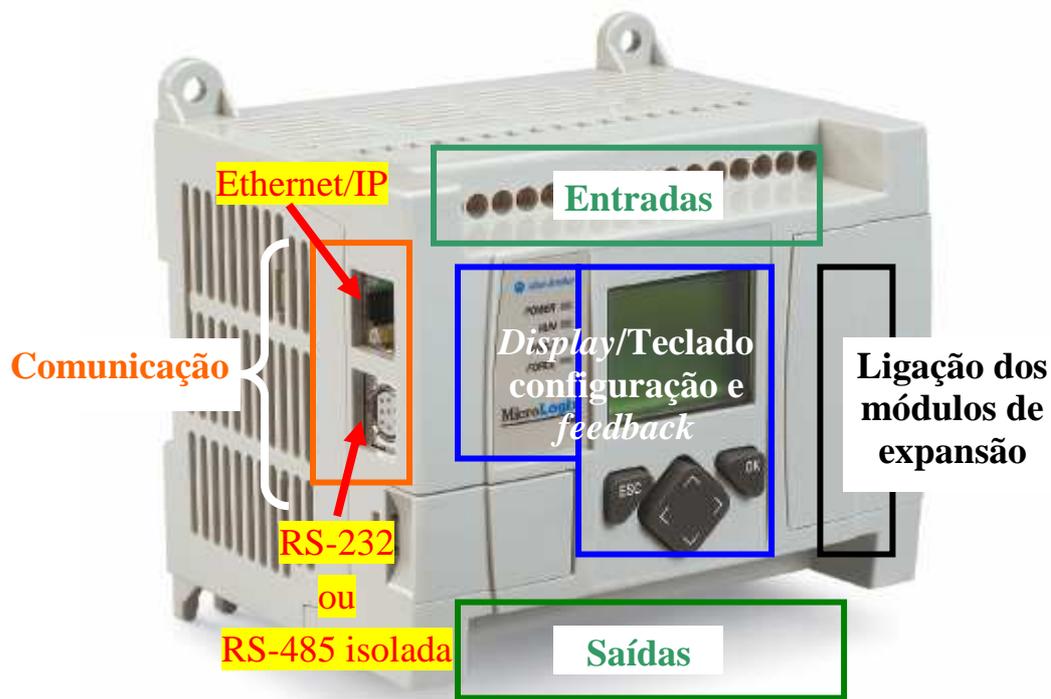


Figura 64 O PLC utilizado no robô trepador

Apresenta-se, de seguida, uma lista com os recursos mais importantes disponibilizados por este equipamento.

- Utilização do *software* de programação RSLogix 500;
- Possibilidade de utilização de ferramentas de diagnóstico e localização de falhas;
- Edição *on-line*;
- Porta 10/100 Mbps incorporada, do tipo EtherNet/IP, para envio de mensagens *peer to peer*;
- Porta combinada RS-232/RS-485 multi-protocolo;
- Dez entradas digitais, duas entradas analógicas e seis saídas digitais em cada controlador;
- Um contador incorporado de alta velocidade (até 20 kHz);

- Duas saídas incorporadas PTO/PWM de alta velocidade (até 20 kHz);
- Visor LCD incorporado para verificação do estado do controlador e das E/S, além de interface de operação simples para mensagens, monitorização e manipulação de bits/inteiros;
- Memória do programa do utilizador com 4 kBytes de palavras;
- Até 128 kBytes para registo de dados e 64 kBytes para receitas;
- Servidor de Web incorporado.

Um dos recursos essenciais para a implementação do protótipo pretendido é a possibilidade de se adicionarem módulos de expansão, uma vez que as E/S disponíveis no controlador base são insuficientes. Este PLC permite a utilização de até quatro módulos 1762 (também usados para expandir os controladores da gama MicroLogix 1200/Allen-Bradley) para aumentar o seu número de E/S, bem como fornece uma maior flexibilidade das E/S para qualquer aplicação.

Os módulos possíveis de serem acoplados ao controlador base incluem:

- Entradas: 120 V AC, digital 24 V DC *sink/source*, analógica, RTD e termopar;
- Saídas: 120 a 240 V AC, digital 24 V DC *sourcing*, relé (incluindo alta corrente isolada) e analógica;
- Funções especiais:

Entrada/Saída: Combinados E/S digitais ou analógicas, RTD e termopar;

Comunicação: DeviceNet, Ethernet, Modbus, ASCII e vários protocolos proprietários, tais como, DF1 e DH485.

Para este projecto, tal como se pode observar na Figura 65, foi necessário acoplar duas cartas de expansão, uma com 8 entradas digitais e a outra de 8 saídas digitais a relé, para aumentar o número total de entradas e saídas disponíveis para utilização na arquitectura idealizada para o protótipo.

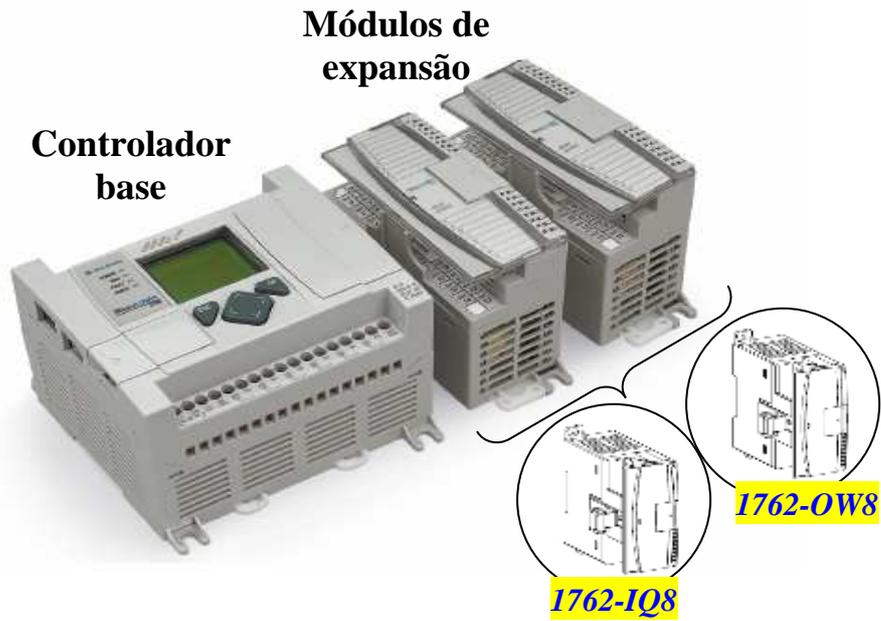


Figura 65 Os módulos de expansão (à direita) conectados ao controlador base (à esquerda)

3.2.1. ESQUEMAS FUNCIONAIS

Relativamente aos recursos disponíveis nesta gama de PLCs, existem vários esquemas funcionais que são auto-explicativos das potencialidades aplicacionais, nomeadamente:

1. O controlador base e a manipulação através do *keypad e display* (LCD) (Figura 66);

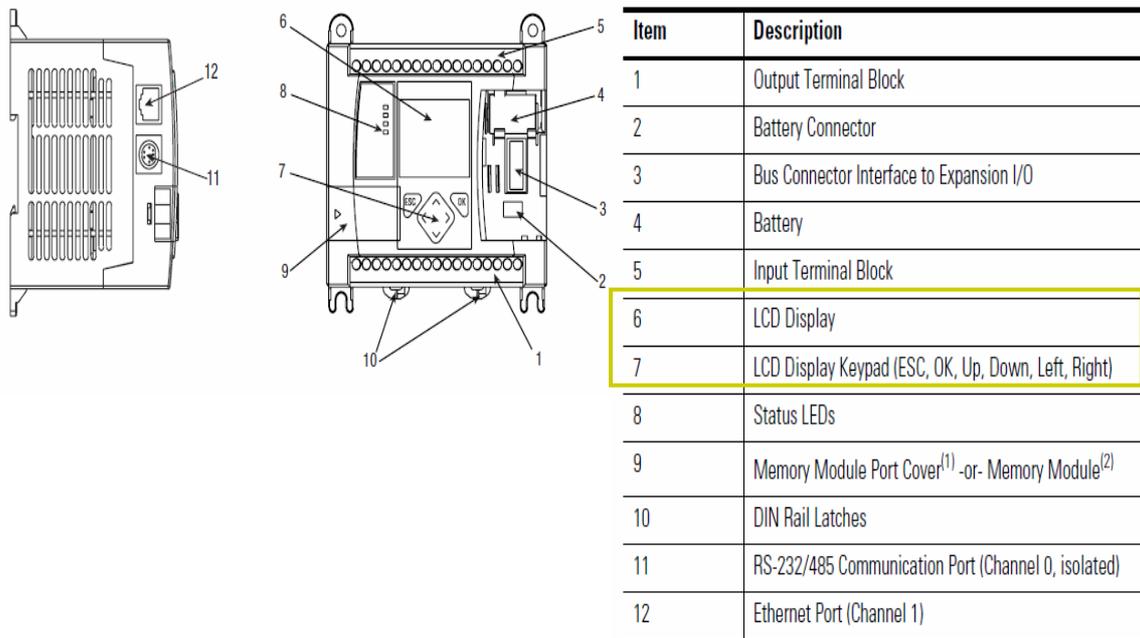


Figura 66 O controlador base com um *keypad e display* (LCD)

Esta interface com o utilizador permite executar diversas funções, as quais estão indicadas na árvore da estrutura de menus representada na Figura 67.

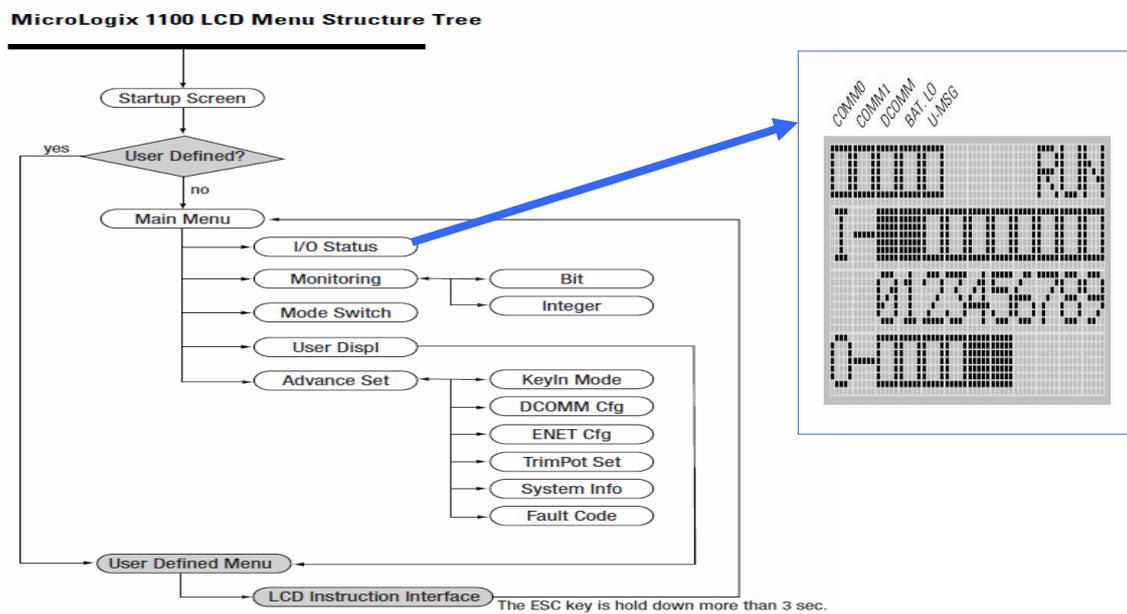
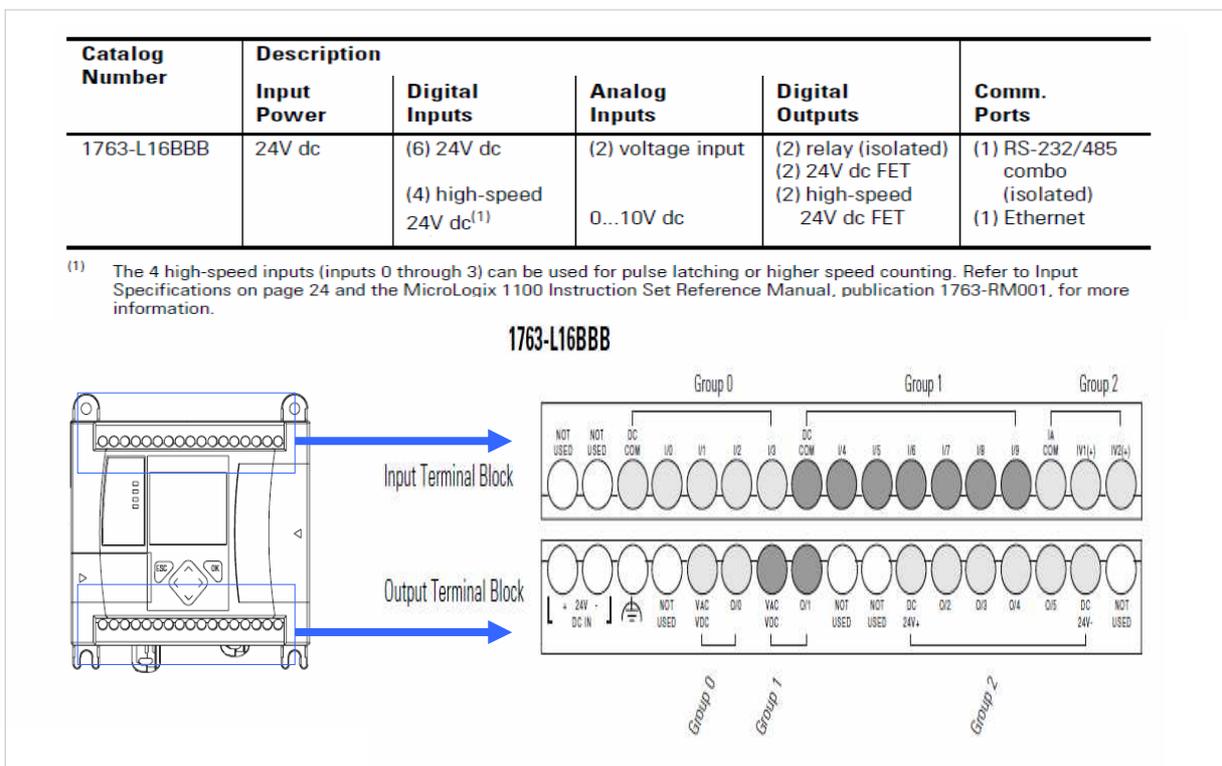


Figura 67 A árvore da estrutura de menus no LCD display e keypad

2. Barramentos de entradas e saídas no controlador base (Figuras 68 e 69);



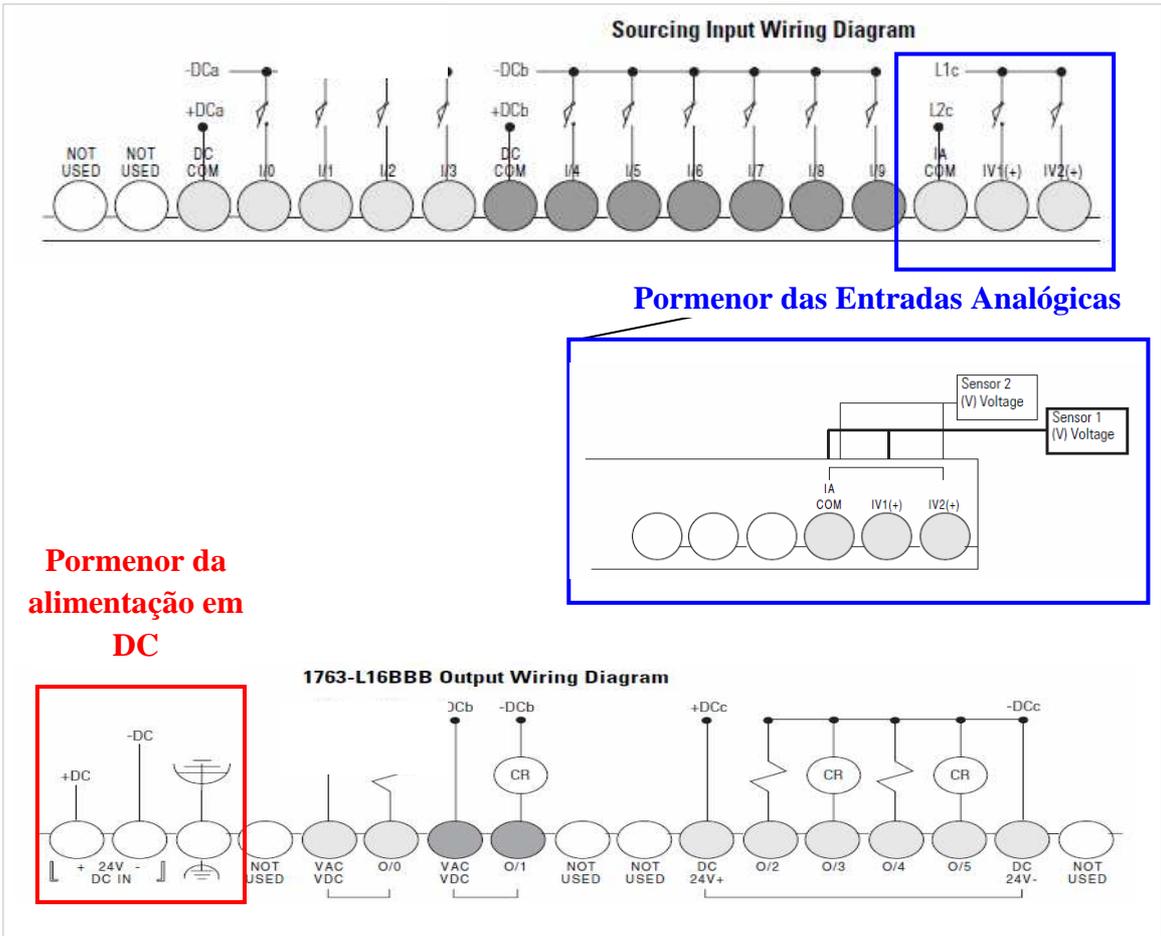


Figura 69 Configuração funcional dos barramentos de E/S no controlador base

3. Carta de expansão 1762-IQ8 com 8 entradas digitais (Figura 70);

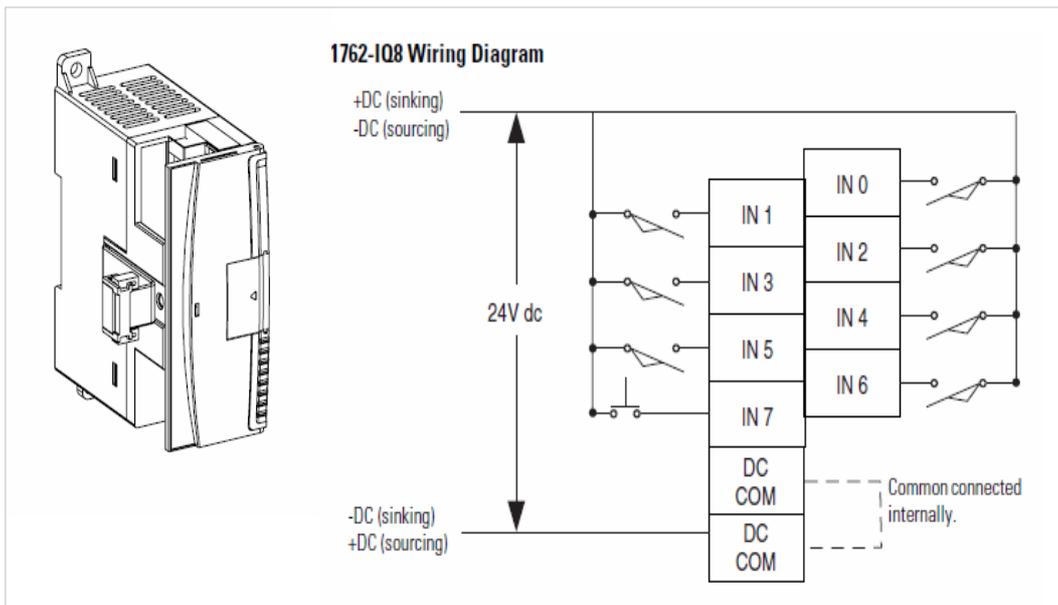


Figura 70 Configuração funcional do barramento de entrada na expansão 1762-IQ8

4. Carta de expansão 1762-OW8 com 8 saídas digitais a relé (Figura 71).

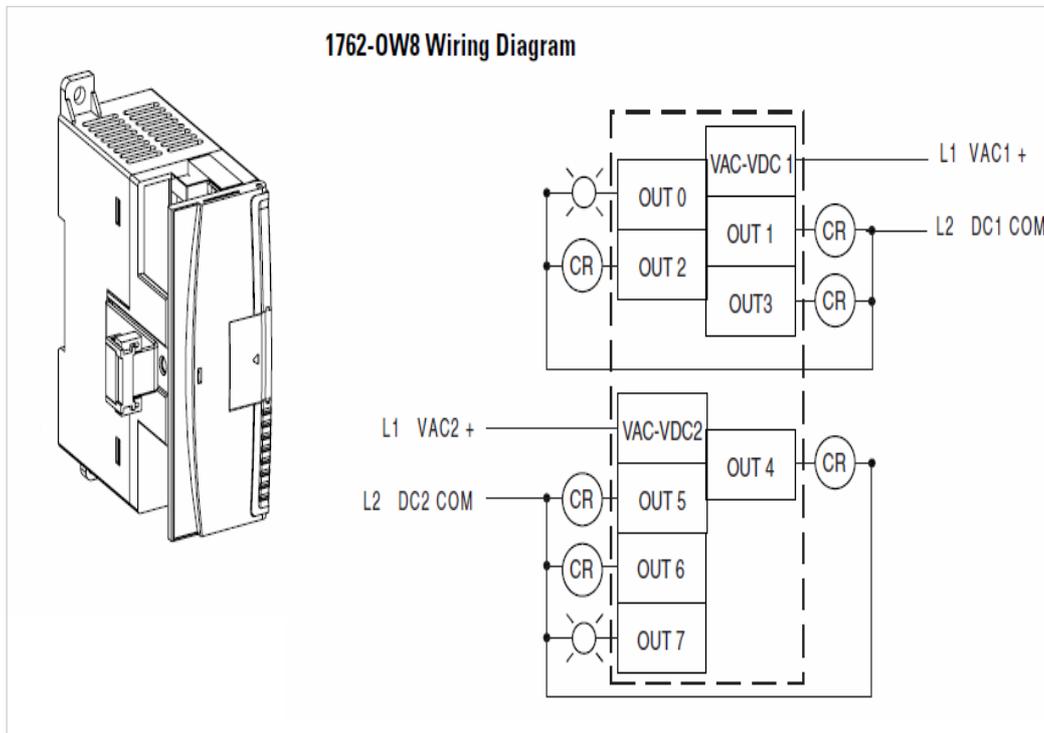


Figura 71 Configuração funcional do barramento de saída na expansão 1762-OW8

3.2.2. DESENHO FUNCIONAL UTILIZADO

Na implementação deste robô trepador, foi adoptado um desenho das ligações eléctricas à unidade de controlo programável que possibilita a execução dinâmica dos requisitos inicialmente estabelecidos para o projecto do protótipo. Assim, foi adoptado o esquema de conexões para as entradas digitais indicado na Tabela 2.

A partir da Tabela 2 é possível verificar que o conjunto de entradas digitais utilizado é obtido directamente do PLC e também de um módulo de expansão, que está acoplado por barramento dedicado ao PLC. O PLC possibilita a utilização de 10 entradas, enquanto o módulo de expansão disponibiliza 8 entradas. Assim, tem-se um total de 18 entradas disponíveis para utilização.

Este PLC está limitado à possibilidade de utilização de apenas 2 entradas analógicas directas. Estas podem ser configuradas para se conectarem a dispositivos que possuam saída em tensão, segundo as especificações descritas na Figura 72.

Tabela 2 Conexão das entradas digitais ao PLC e à unidade de expansão

TABELA ENTRADAS DIGITAIS			
no			
PLC AB MicroLogix 1100			
Bloco Terminais de Entrada do PLC: Modelo 1763 – L16BBB			
GRUPO	TIPO	IDENTIF.	DESCRIÇÃO
0	COM	DC COM	Comum do Grupo 0 ligado ao terminal positivo dos +24 V DC (<i>Sourcing</i>).
0	D	I/0	Entrada do sinal do <i>encoder</i> Motor Locomoção Frontal Direito.
0	D	I/1	Entrada do sinal do <i>encoder</i> Motor Locomoção Traseiro Direito.
0	D	I/2	Entrada do sinal do <i>encoder</i> Motor Locomoção Frontal Esquerdo.
0	D	I/3	Entrada do sinal do <i>encoder</i> Motor Locomoção Traseiro Esquerdo.
1	COM	DC COM	Comum do Grupo 1 ligado ao terminal positivo dos +24 V DC (<i>Sourcing</i>).
1	D	I/4	Entrada do sinal do fim-de-curso “Photomicrosensor T-shaped” Sistema Adesão Frontal Direito.
1	D	I/5	Entrada do sinal do fim-de-curso “Photomicrosensor T-shaped” Sistema Adesão Traseiro Direito.
1	D	I/6	Entrada do sinal do fim-de-curso “Photomicrosensor T-shaped” Sistema Adesão Frontal Esquerdo.
1	D	I/7	Entrada do sinal do fim-de-curso “Photomicrosensor T-shaped” Sistema Adesão Traseiro Esquerdo.
1	D	I/8	Comando manual para o arranque da adesão (premir curto) ou para baixar todas as unidades de adesão (premir longo de aprox. 2 s).
1	D	I/9	Comando manual para a paragem da adesão (premir curto) ou para subir todas as unidades de adesão para a posição de segurança.
Bloco Terminais de Entrada da Carta de Expansão: Modelo 1762 – IQ8			
GRUPO	TIPO	IDENTIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
0	D	IN 0	Sensor indutivo “High Position” Sistema Adesão Frontal Direito.
0	D	IN 1	Sensor indutivo “Low Position” Sistema Adesão Frontal Direito.
0	D	IN 2	Sensor indutivo “High Position” Sistema Adesão Traseiro Direito.
0	D	IN 3	Sensor indutivo “Low Position” Sistema Adesão Traseiro Direito.
0	D	IN 4	Sensor indutivo “High Position” Sistema Adesão Frontal Esquerdo.
0	D	IN 5	Sensor indutivo “Low Position” Sistema Adesão Frontal Esquerdo.
0	D	IN 6	Sensor indutivo “High Position” Sistema Adesão Traseiro Esquerdo.
0	D	IN 7	Sensor indutivo “Low Position” Sistema Adesão Traseiro Esquerdo.
0	COM	DC COM	Comum do Grupo 0 ligado ao terminal negativo/GND dos +24 V DC (<i>Sinking</i>).
0	COM	DC COM	Comum do Grupo 0 ligado ao terminal negativo/GND dos +24 V DC (<i>Sinking</i>).

Analog Inputs

Description	1763- L16BBB
Voltage Input Range	0 ...10.0V dc - 1 LSB
Type of Data	10-bit unsigned integer
Input Coding (0 to 10.0V dc - 1 LSB)	0 ...+1,023
Voltage Input Impedance	210 k Ω
Input Resolution	10 bit
Non-linearity	$\pm 0.5\%$ of full scale
Overall Accuracy -20...+65 °C (-4...+149 °F)	$\pm 0.5\%$ of full scale
Voltage Input Overvoltage Protection	10.5V dc
Field Wiring to Logic Isolation	Non-isolated with logic

Figura 72 Especificações técnicas das entradas analógicas directas do PLC utilizado no protótipo

O esquema de conexões para as entradas analógicas é o descrito na Tabela 3.

Tabela 3 Conexão das entradas analógicas ao PLC

TABELA ENTRADAS ANALÓGICAS			
no			
PLC AB MicroLogix 1100			
Bloco Terminais de Entrada do PLC: Modelo 1763 – L16BBB			
GRUPO	TIPO	IDENTIF.	DESCRIÇÃO
2	COM	IA COM	Comum do Grupo 2 ligado ao terminal negativo/GND dos +24 V DC (GND comum PSUs).
2	A	IV1(+)	Sonar (ultra-sónico) detecção obstáculos frontal.
2	A	IV2(+)	Sonar (ultra-sónico) detecção obstáculos traseiro.

O tipo de ligação mais adequado entre o sonar e a entrada do PLC, para uma maior imunidade ao ruído local, é a ilustrada na Figura 73.

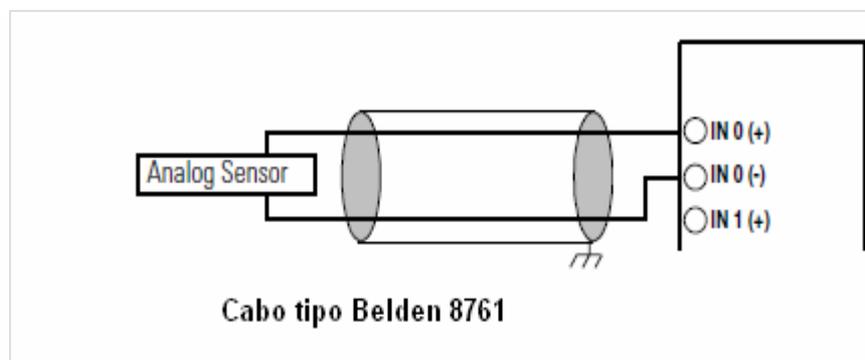


Figura 73 Procedimento de ligação dos sonares

Estas entradas analógicas, apesar de permitirem a utilização de vários tipos de dispositivos analógicos com saída em tensão, não podem providenciar uma ligação em *loop power*, isto é, os dispositivos têm que ser alimentados externamente com o recurso a uma fonte de alimentação. Assim, na Figura 74 podem-se observar as ligações possíveis, e identificar numa caixa com contorno a azul a que foi utilizada no protótipo do robô trepador.

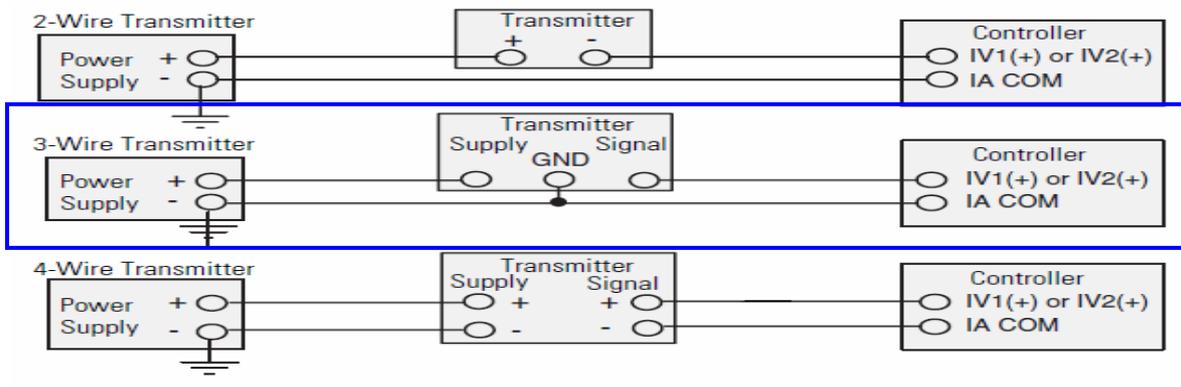


Figura 74 Ligações analógicas possíveis e a utilizada no protótipo (ao centro)

Relativamente às saídas digitais, foi adoptado o esquema de conexões descrito nas Tabelas 4 e 5.

A partir destas tabelas de conexão, é possível constatar que o conjunto de saídas digitais utilizado é obtido directamente do PLC e de um módulo de expansão, que está acoplado por barramento dedicado ao PLC. O PLC possibilita a utilização de 6 saídas (duas a FASTFET, duas a FET e duas a Relé), sem qualquer reserva disponível, enquanto o módulo de expansão disponibiliza 8 saídas, todas a Relé. A partir destas tabelas é possível identificar e quantificar todos os periféricos (sensores e actuadores) utilizados na concepção do protótipo deste robô trepador.

Uma das características mais importantes a salientar, é a possibilidade de variação da velocidade de locomoção. Como se pode ver na Figura 75, esta variação é conseguida a partir da geração de um sinal de PWM numa das saídas do PLC (O/2), que posteriormente é conectada ao terminal comum (VAC-VDC2) da carta de expansão com 8 saídas digitais (1762-OW8), permitindo indirectamente aplicar este sinal a cada um dos arranques (*start*) associados às unidades lógicas de controlo da locomoção, que controlam o funcionamento dos motores do Sistema de Locomoção.

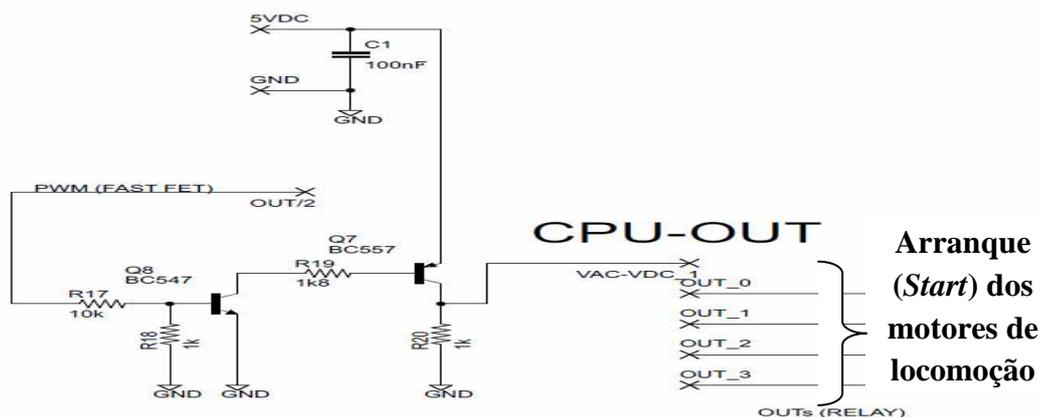


Figura 75 Processo de controlo da velocidade do Sistema de Locomoção por PWM

Tabela 4 Conexão das saídas digitais ao PLC

TABELA SAÍDAS DIGITAIS			
no			
PLC AB MicroLogix 1100			
Bloco Terminais de Saída do PLC: Modelo 1763 – L16BBB			
GRUPO	TIPO	IDENTIF.	DESCRIÇÃO
0	COM	VAC / VDC	Comum do Grupo 0 ligado ao terminal positivo dos +5 V DC (alimentação circuitos digitais).
0	D	O/0	<i>Parallel Load out signal</i> para unidade digital do Sistema Controlo Locomoção (Relé).
1	COM	VAC / VDC	Comum do Grupo 1 ligado ao terminal positivo dos +5 V DC (alimentação circuitos digitais).
1	D	O/1	<i>Reset out signal</i> para unidade digital do Sistema Controlo Locomoção (Relé).
2	COM +	DC 24V +	Comum (+) do Grupo 2 ligado ao terminal positivo dos +24 V DC.
2	D	O/2	<i>PWM out signal</i> para variação velocidade do Sistema de Locomoção (FASTFET).
2	D	O/3	<i>Clock out signal</i> para unidade digital do Sistema Controlo Adesão (FASTFET).
2	D	O/4	<i>Clock out signal</i> para unidade digital do Sistema Controlo Locomoção (FET).
2	D	O/5	<i>Reset out signal</i> para unidade digital do Sistema Controlo Adesão (FET).
2	COM -	DC 24V -	Comum (-) do Grupo 2 ligado ao terminal negativo/GND dos +24 V DC.

Tabela 5 Conexão das saídas digitais à carta de expansão acoplada ao PLC

TABELA SAÍDAS DIGITAIS			
no			
PLC AB MicroLogix 1100			
Bloco Terminais de Saída da Carta de Expansão: Modelo 1762 – OW8			
GRUPO	TIPO	IDENTIF.	DESCRIÇÃO
0	COM	VAC-VDC 1	Comum do Grupo 0 ligado ao terminal O/2 do PLC (<i>PWM out signal</i>).
0	D	OUT 0	Arranque do Motor Locomoção Frontal Direito.
0	D	OUT 1	Arranque do Motor Locomoção Traseiro Direito.
0	D	OUT 2	Arranque do Motor Locomoção Frontal Esquerdo.
0	D	OUT 3	Arranque do Motor Locomoção Traseiro Esquerdo.
1	COM	VAC-VDC 2	Comum Grupo 1 ligado ao terminal positivo dos +5 V DC (alimentação circuitos digitais).
1	D	OUT 4	Arranque do Motor Sistema Adesão Frontal Direito.
1	D	OUT 5	Arranque do Motor Sistema Adesão Traseiro Direito.
1	D	OUT 6	Arranque do Motor Sistema Adesão Frontal Esquerdo.
1	D	OUT 7	Arranque do Motor Sistema Adesão Traseiro Esquerdo.

3.2.3. O SOFTWARE DE PROGRAMAÇÃO DO PLC

O *software* de programação deste PLC, da “Rockwell Automation”, designa-se por RSLOGIX 500. É compatível com as famílias de PLCs Allen-Bradley SLC 500 e MicroLogix e, de acordo com o fabricante, oferece, entre outros, os seguintes recursos:

- Editores flexíveis e fáceis de usar;
- Ferramentas de diagnósticos e localização de falhas;
- Funcionalidades e recursos poderosos que economizam tempo;
- Uma interface do utilizador projectada inclusive para os utilizadores principiantes;
- Possibilidade de ligação do PC ao PLC (MicroLogix 1100) através de qualquer um dos dois canais disponíveis (Figura 76), utilizando o *software* de serviços de comunicação designado por RSLINX, também da “Rockwell Automation”.
- O *software* necessita de baixos recursos do PC, possibilitando a sua utilização a partir de sistemas informáticos com requisitos básicos.

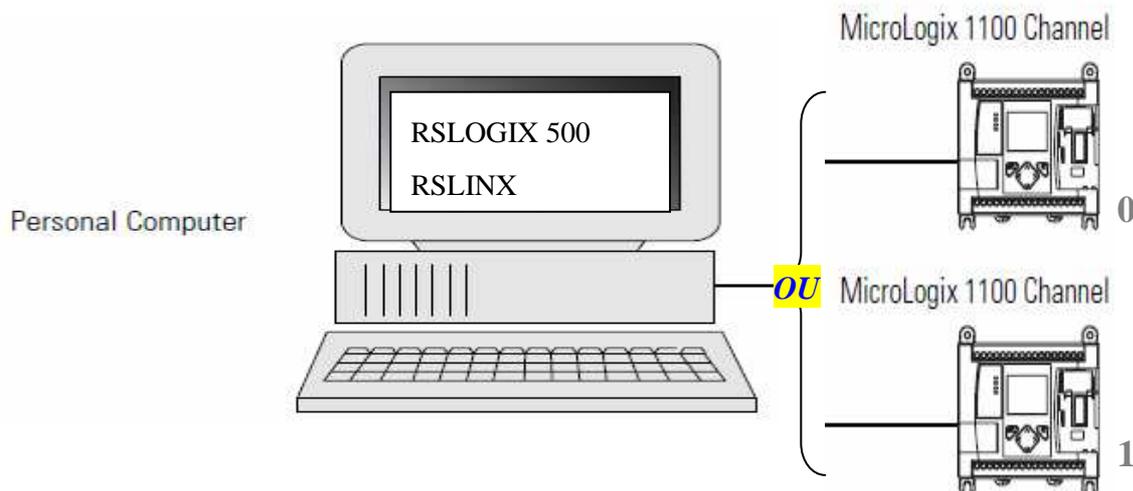


Figura 76 Ligação de um PC ao PLC

O canal 0 utiliza uma ligação do tipo série (RS232/485) e o canal 1 permite uma ligação do tipo Ethernet até 10Mbps ou 100Mbps, suportando algumas funcionalidades do protocolo proprietário designado por *Common Industrial Protocol* (CIP), como é o caso das mensagens do tipo explícito.

O programa enviado para o PLC é escrito em linguagem *Ladder*, na qual as funções lógicas são representadas através de contactos e bobinas, de modo análogo a um esquema eléctrico com os contactos dos transdutores/sensores e actuadores. A linguagem *Ladder* está entre as cinco linguagens de programação de PLCs definidas pela norma IEC 61131-3. Além do *Ladder Diagram* (LD), também é possível utilizar outras linguagens de programação, tais como, *Function Block Diagram* (FBD), *Structured Text* (ST) e *Sequential Function Chart* (SFC). Na Figura 77 pode-se observar um diagrama com todas estas ferramentas informáticas utilizadas, e como elas se relacionam funcionalmente.

Tal como pode ser observado a partir desta figura, para se conectar ao *hardware* físico (PLC) o *software* RSLogix500 necessita de um outro programa do tipo *OPC Server*, o RSLinx, também da “Rockwell Automation”. Um *OPC Server* é uma aplicação que actua como uma *Application Programming Interface* (API) (ou Interface de Programação de Aplicativos). Uma API é um conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um *software* para a utilização das suas funcionalidades por programas aplicativos, isto é, programas que não “querem envolver-se” em detalhes da implementação do *software*, mas apenas usar os seus serviços, como é o caso do RSLogix500. Um *OPC Server* permite assim conectar dispositivos do tipo PLC, SoftPLC, DCS, RTU, ou mesmo uma fonte de dados (como uma Base de Dados), convertendo a informação associada para o formato OPC, podendo posteriormente ser

utilizada por aplicações genéricas tais como HMIs, históricos, representações gráficas, etc. Estas aplicações irão actuar como OPC *Clients*, pois esta arquitectura é do tipo *Server/Client*.

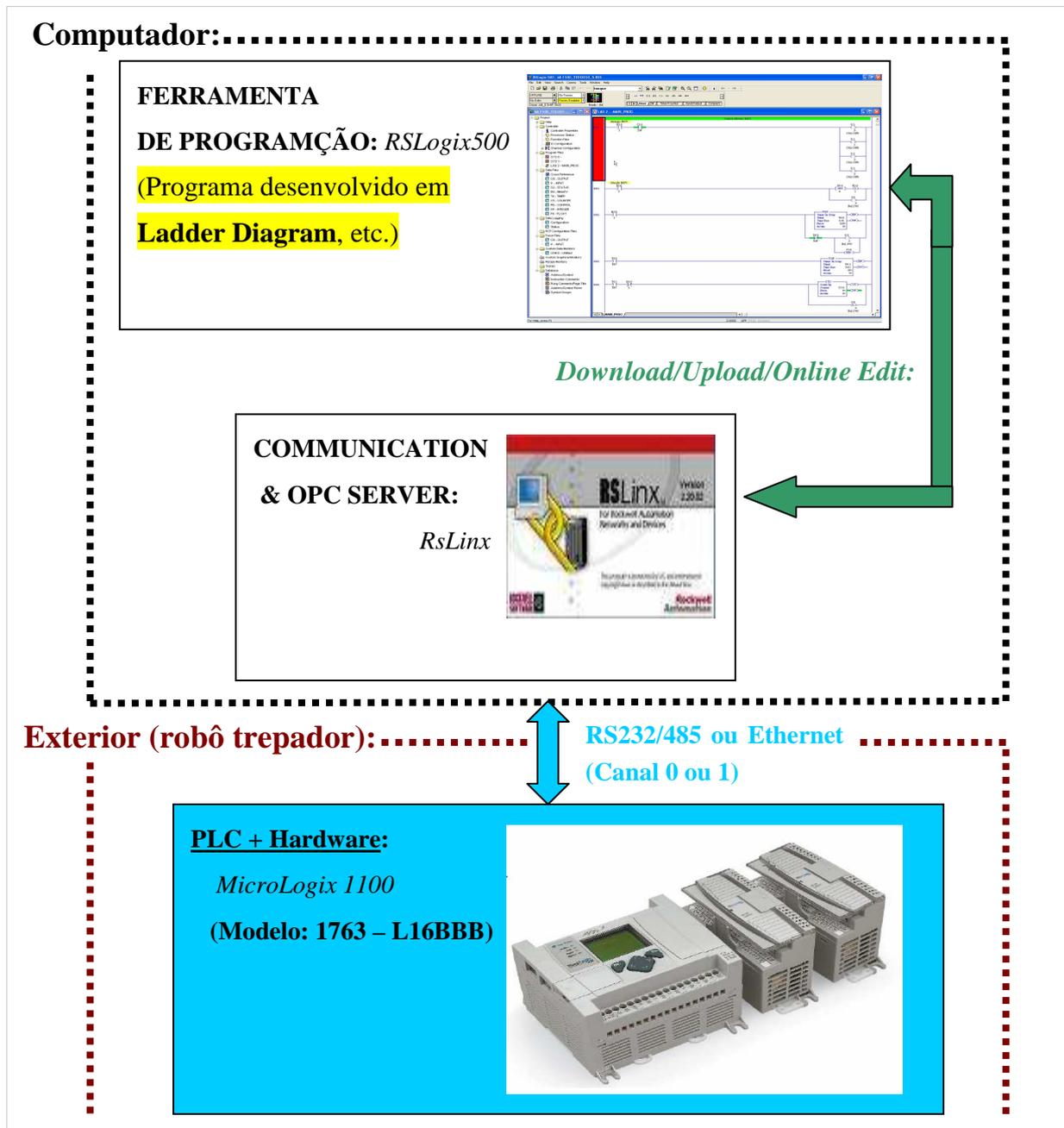


Figura 77 Estrutura de interligação funcional entre as diversas aplicações informáticas

3.2.4. O SOFTWARE DE SUPERVISÃO/SCADA DO ROBÔ TREPADOR

De forma a existir um ambiente gráfico mais amigável para quem operar remotamente o robô trepador, é utilizado um *software* do tipo *Supervision Control And Data Acquisition* (SCADA) como *Human Machine Interface* (HMI). Este *software*, o RSView32 da “Rockwell

Automation”, proporciona uma maior facilidade na manipulação das variáveis definidas no programa que corre no PLC MicroLogix 1100. Na Figura 78 é possível observar uma imagem ilustrativa do ambiente gráfico de comando do protótipo e a forma de conexão ao PLC.

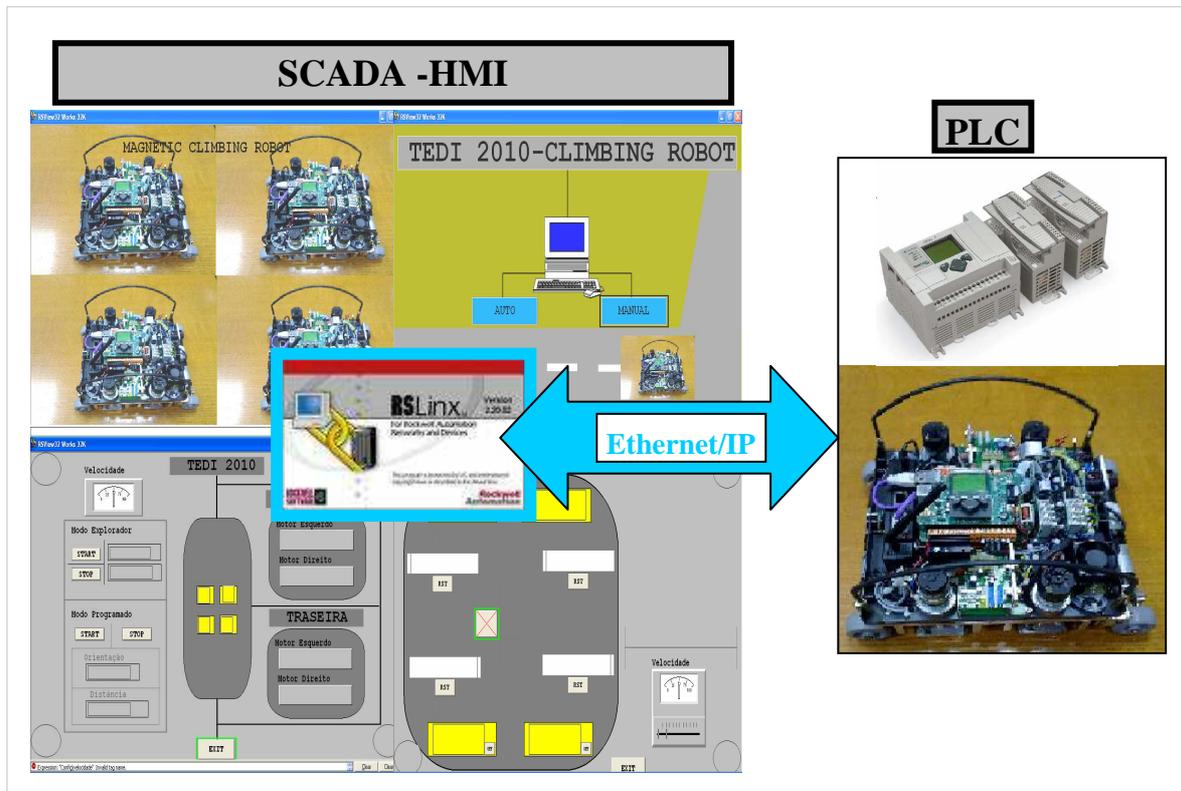


Figura 78 Supervisão (SCADA – RSVIEW32) do protótipo do robô trepador, a partir de um computador remoto

É possível aceder a todos os parâmetros de configuração dos processos de locomoção e adesão adoptados, e ter *feedback* das variáveis físicas medidas pelo robô trepador, a partir de qualquer computador onde corra este SCADA, e a programação dedicada associada, com o seu interface gráfico orientado para a operação remota do robô (o HMI).

Tal como foi possível constatar a partir do conteúdo deste capítulo, a arquitectura base idealizada para o protótipo do robô trepador foi detalhadamente descrita com base nos elementos fundamentais seleccionados (sensores, actuadores e controlador lógico). No entanto, numa fase posterior é necessário montar fisicamente todos estes elementos, que darão “corpo” ao robô, adoptando o processo técnico-construtivo mais adequado, com o objectivo de serem atingidos os pressupostos/objectivos inicialmente estabelecidos. Assim, o próximo capítulo descreverá detalhadamente o processo construtivo do protótipo, agrupando a descrição da montagem dos elementos anteriormente mencionados por grupos operacionais (mecânico, eléctrico e de programação).

4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO TEDI 2010

Neste capítulo descreve-se em pormenor a construção do protótipo, nomeadamente no que diz respeito à arquitectura mecânica adoptada para os sistemas de locomoção e de adesão, aos circuitos eléctricos e sistemas electrónicos implementados e à programação do PLC e do SCADA que serve de HMI para a operação remota do robô trepador.

4.1. ARQUITECTURA MECÂNICA

Este robô é construído com base numa estrutura modular, constituída por uma base em PVC rígido e quatro unidades padronizadas, compostas por uma estrutura motorizada de ajuste da distância do íman permanente à superfície de deslocamento (Figura 79 – detalhe 1) e um sistema de locomoção motorizado composto por um par de rodas, uma em borracha e a outra magnética (Figura 79 – detalhe 2), para maximizar a aderência à superfície de contacto e permitir a passagem de uma superfície horizontal (que pode não ter características ferromagnéticas) para uma vertical, ferromagnética. A função da roda magnética é estabelecer a ligação/adesão no momento da transição, quando ainda não é possível utilizar as unidades principais (constituídas pelas estruturas motorizadas com ímanes permanentes) para a adesão à superfície vertical.

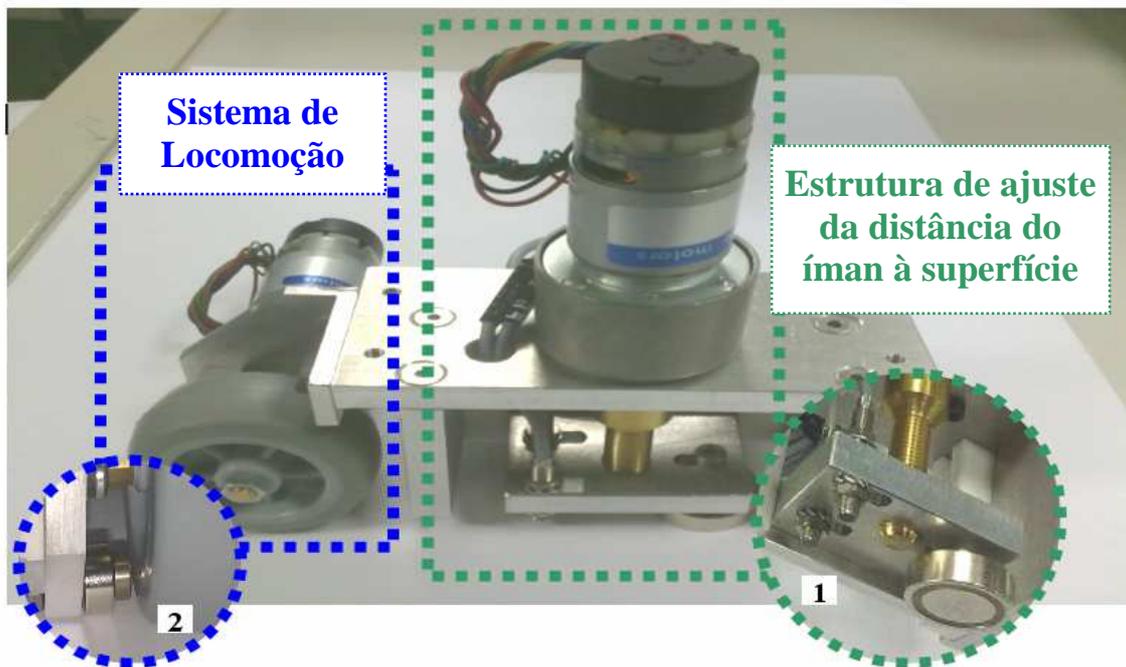


Figura 79 A unidade padrão, com o sistema de locomoção (à esquerda) e a estrutura de ajuste da distância do íman permanente à superfície (à direita)

As quatro unidades exactamente iguais, isto é, normalizadas, são montadas na base do robô, na disposição que pode ser observada na Figura 80.

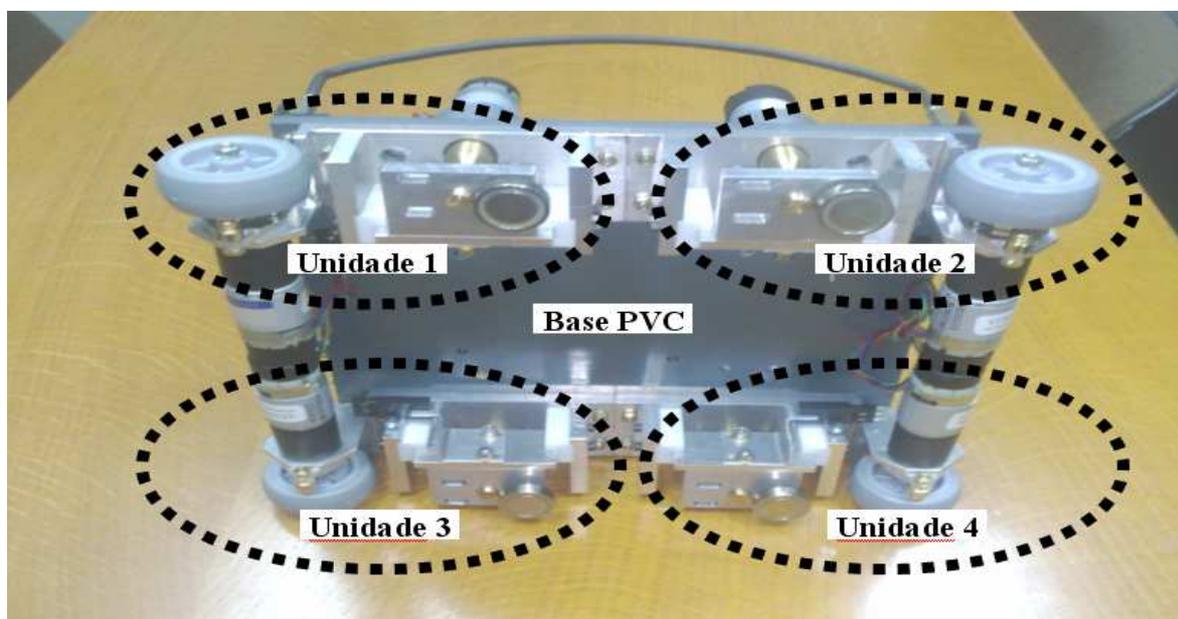


Figura 80 Montagem das quatro unidades padrão na base do robô, com a identificação dessas unidades

4.1.1. A UNIDADE DE ADESÃO MAGNÉTICA

A unidade de adesão é a responsável por suportar o peso do robô numa superfície ferromagnética disposta em posição vertical ou invertida. Esta unidade é constituída pelos ímanes permanentes e por detectores da distância à superfície de contacto, do tipo indutivo. Na Figura 81 pode-se observar esquematicamente o sistema de ajuste dinâmico da distância dos ímanes permanentes à superfície de deslocamento.

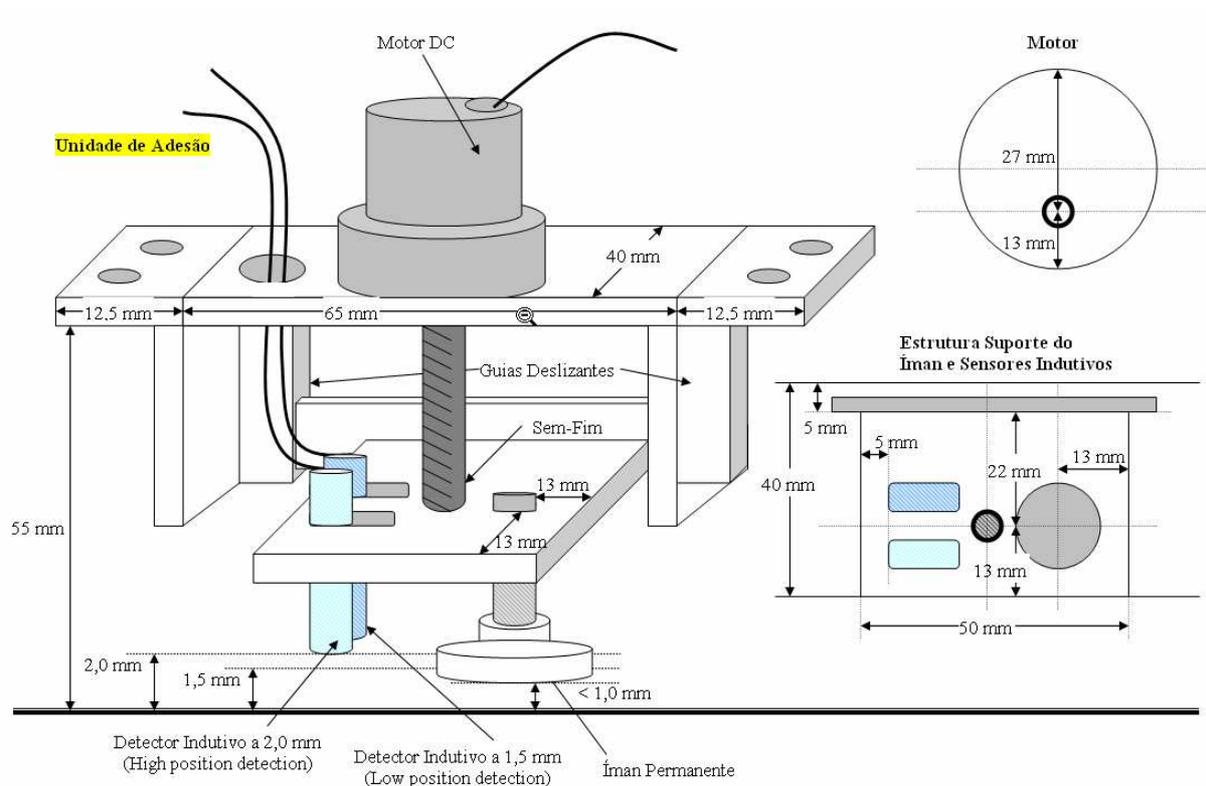


Figura 81 Representação esquemática do sistema de ajuste dinâmico da adesão do robô

Tal como pode ser observado, o sistema motorizado, composto pelo motor acoplado à estrutura de suporte do íman permanente e dos sensores indutivos, ajusta de uma forma dinâmica a distância do íman à superfície de contacto e deslocamento, por intermédio de um veio sem-fim, utilizando a informação da distância fornecida pelos dois sensores do tipo indutivo. O seu princípio de funcionamento permite utilizar dois modos distintos de comportamento referencial, em relação ao *High* ou *Low position detection – Inductive Sensor*. Estes dois modos são os seguintes:

A. Modo de ajuste através da referência *High position detection* – *Inductive Sensor*:

1. Inicialmente o sistema faz o zero, movendo para isso a estrutura de suporte móvel para baixo, até detectar a superfície de deslocamento com a informação digital do *Low position detection* – *Inductive Sensor*;
2. Posteriormente, o sistema vai à procura do ponto mais distante em relação à superfície de deslocamento, movendo a estrutura de suporte móvel para cima, até deixar de detectar a superfície de deslocamento com a informação digital *High position detection* – *Inductive Sensor*;
3. Finalmente, o sistema posiciona-se num ponto controlável, em relação à superfície de deslocamento, movendo a estrutura de suporte móvel para baixo, até detectar a superfície de deslocamento com a informação digital *High position detection* – *Inductive Sensor*, parando de seguida;
4. É a partir do ponto controlável, que o sistema se posiciona dinamicamente em relação à superfície de deslocamento, movendo-se para cima, até perder o *High position detection* – *Inductive Sensor*, quando detecta o *Low position detection* – *Inductive Sensor*, pois o íman está muito próximo da superfície de deslocamento, ou deslocando-se para baixo quando deixa de detectar o *High position detection* – *Inductive Sensor* pois, o íman está muito afastado da superfície de deslocamento.

B. Modo de ajuste através da referência *Low position detection* – *Inductive Sensor*:

1. Inicialmente, o sistema faz o zero, movendo para isso a estrutura de suporte móvel para cima, até deixar de detectar a superfície de deslocamento com a informação digital do *High position detection* – *Inductive Sensor*;
2. Posteriormente, o sistema vai à procura do ponto mais próximo em relação à superfície de deslocamento, movendo a estrutura de suporte móvel para baixo, até detectar a superfície de deslocamento com a informação digital *Low position detection* – *Inductive Sensor*;
3. Finalmente, o sistema posiciona-se num ponto controlável, em relação à superfície de deslocamento, movendo a estrutura de suporte móvel para cima, até deixar de

detectar a superfície de deslocamento com a informação digital *Low position detection – Inductive Sensor*, parando de seguida;

4. É a partir do ponto controlável, que o sistema se posiciona dinamicamente em relação à superfície de deslocamento, movendo-se para cima quando detecta o *Low position detection – Inductive Sensor*, pois o íman está muito próximo da superfície de deslocamento, ou deslocando-se para baixo, até encontrar o *Low position detection – Inductive Sensor*, quando deixa de detectar o *High position detection – Inductive Sensor*, pois o íman está muito afastado da superfície de deslocamento.

Na Figura 82 são apresentadas algumas fotografias da estrutura dinâmica de ajuste da distância do íman permanente à superfície de deslocamento, nas quais podem ser observados alguns pormenores importantes e devidamente identificados.

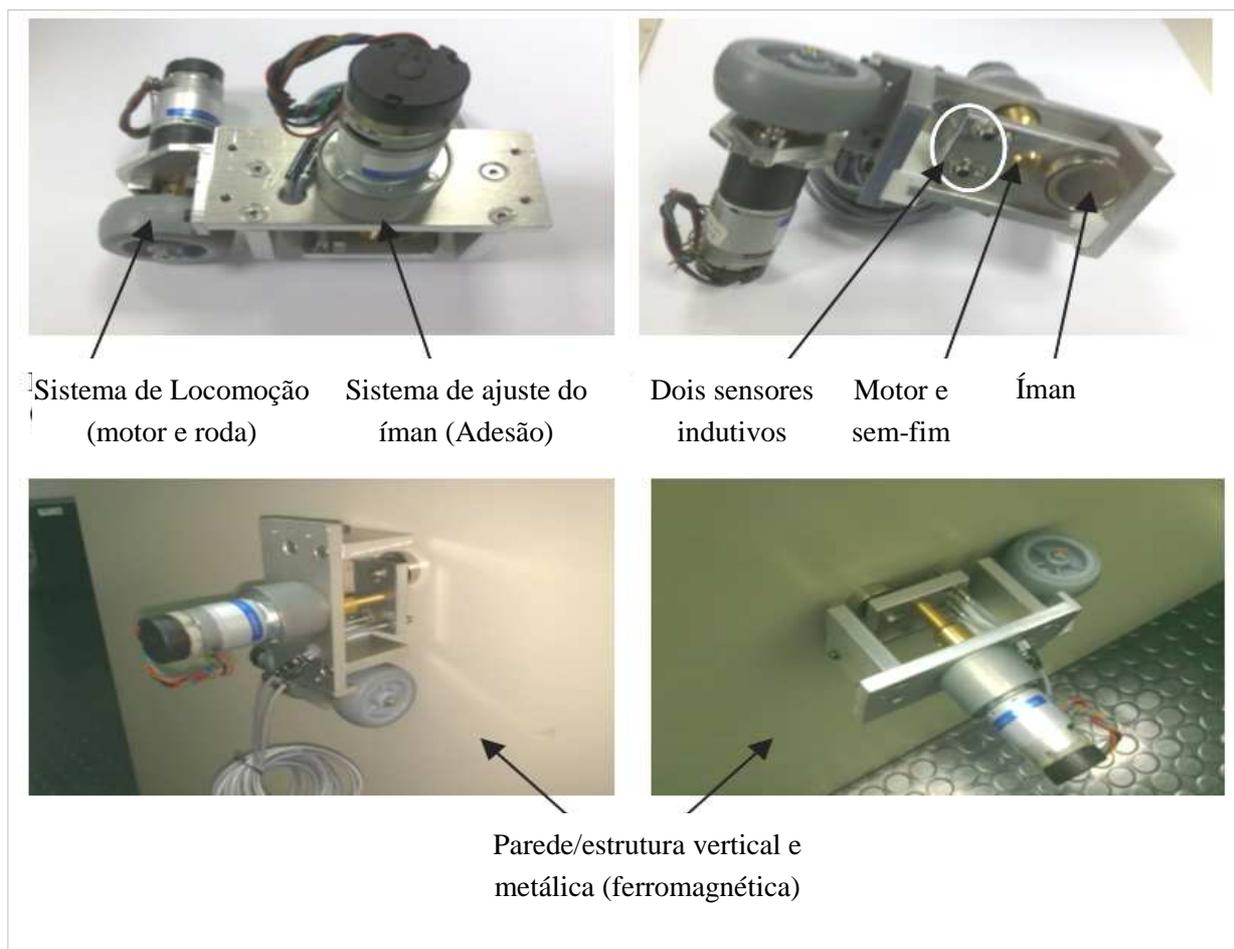


Figura 82 Fotografias da Unidade de Adesão Magnética, com os pormenores relevantes devidamente identificados

4.1.2. UNIDADE DE LOCOMOÇÃO ATRAVÉS DE RODAS

Quanto ao sistema de locomoção, este é constituído por quatro estruturas constituídas pelo par motor e roda, esta com o exterior em borracha para melhorar a aderência à superfície de deslocamento. Cada uma destas estruturas, que está montada num conjunto mais amplo que também contém o sistema de ajuste vertical do íman, tem a particularidade de possuir, numa montagem quase paralela à parte mais exterior da roda, um pequeno íman circular com possibilidade de rotação em sincronismo com a respectiva roda. A sua finalidade é melhorar a tracção da roda relativamente à superfície de deslocamento, além de permitir que o robô transite de uma superfície horizontal para uma vertical. A Figura 83 ilustra esta particularidade do sistema de locomoção.

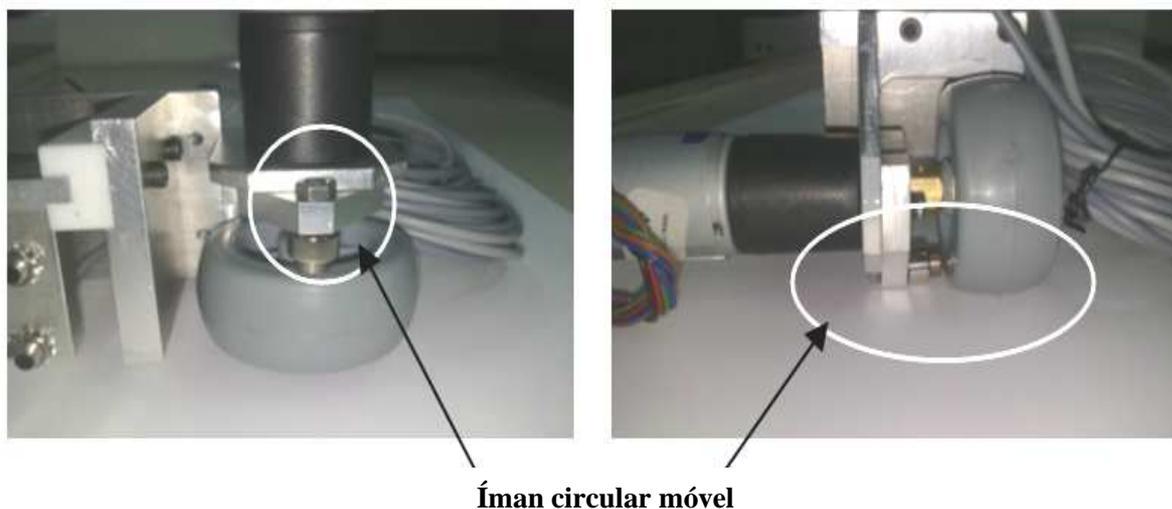


Figura 83 Sistema de locomoção auxiliado por um íman circular móvel

Com a finalidade de garantir a total aderência das quatro unidades de locomoção à superfície de contacto com as rodas (e de deslocamento do robô), mesmo que esta superfície não apresente características perfeitamente planas, foi implementado nas duas unidades posteriores um sistema de auto-nivelamento, constituído por uma estrutura com guia deslizante e auto-compensada por uma mola. Este sistema de compensação, que pode ser observado na Figura 84, não permite (ou minimiza) que surjam períodos de ausência de contacto entre rodas e o piso, quaisquer que sejam as características da superfície, o que provocaria dificuldade, ou mesmo impossibilidade, de manutenção de um movimento rectilíneo do robô. O controlo desta situação é muito importante para poder existir um comando perfeito da mobilidade, quer em termos de locomoção, como de direcção, por parte do técnico que manobrar o robô sobre a estrutura a inspeccionar.

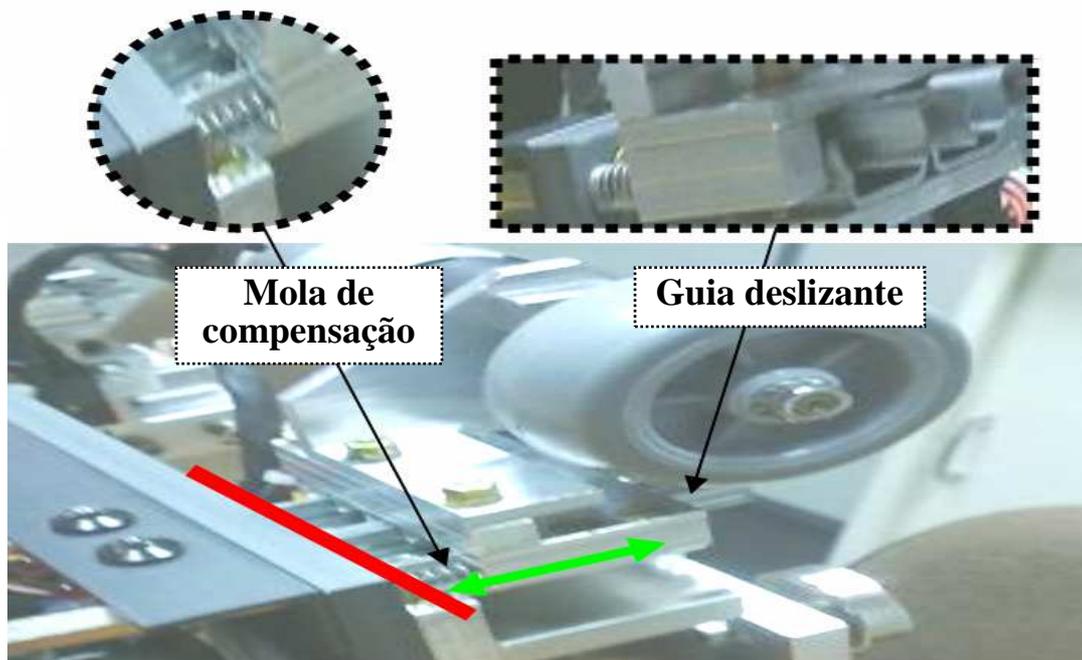
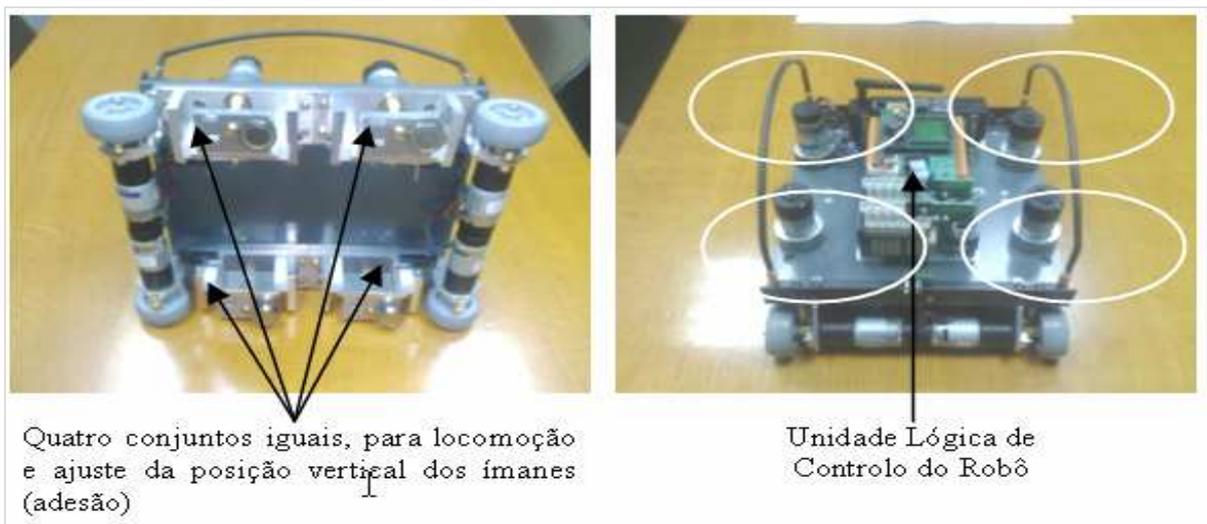


Figura 84 Sistema de auto-nivelamento do robô face às características da superfície

4.1.3. MONTAGEM NA BASE EM PVC

Os quatro conjuntos normalizados estão montados numa base em PVC, dando origem à estrutura de suporte base que constitui o robô, e permite a implementação dos restantes sistemas funcionais. Esta montagem, composta pelas Unidades de Adesão e Locomoção fixadas na base em PVC, pode ser observada na Figura 85, onde também já se pode identificar a Unidade Lógica de Controlo do robô trepador.



Quatro conjuntos iguais, para locomoção e ajuste da posição vertical dos ímanes (adesão)

Unidade Lógica de Controlo do Robô

Figura 85 Estrutura base de suporte do robô

4.2. SISTEMA ELECTRÓNICO

O controlo deste robô é baseado numa Unidade Lógica Central do tipo PLC *standard*. A programação adoptada para o seu funcionamento é executada no PLC, com o auxílio de um *software* de programação adequado ao tipo de controlador lógico utilizado. A restante electrónica está dividida em dois grandes blocos funcionais: a alimentação eléctrica (em DC) de todos os sistemas eléctricos/electrónicos e a configuração, controlo e tratamento sensorial das funcionalidades mecatrónicas. Na Figura 86 pode-se observar a arquitectura de controlo por detrás da implementação dos requisitos funcionais para a execução do protótipo do robô trepador magnético.

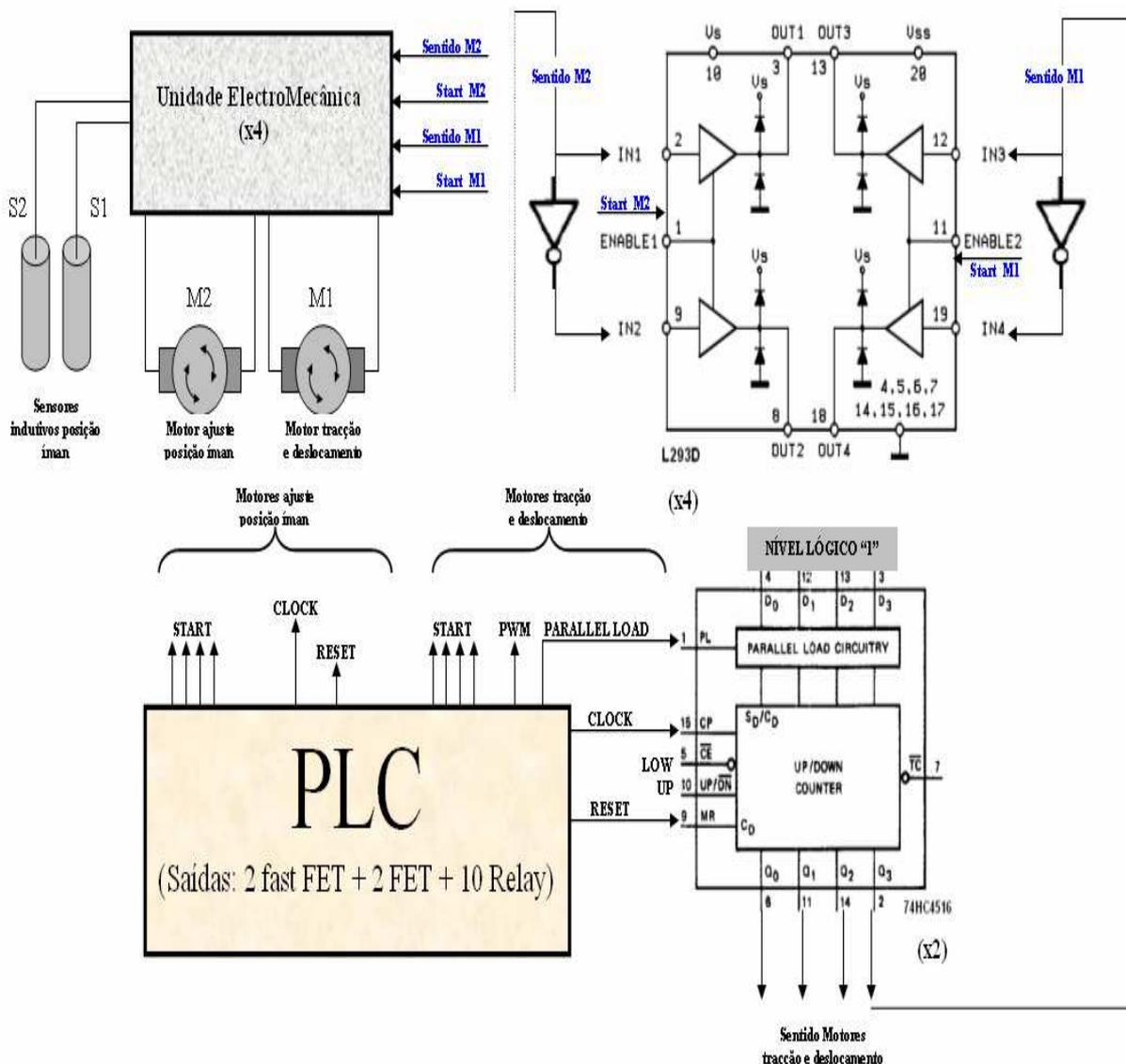


Figura 86 Arquitectura de controlo dos sistemas do robô trepador

Como se pode identificar na Figura 86, foi desenvolvido um conjunto de circuitos lógicos que permitem otimizar a utilização dos recursos em I/O disponibilizados pelo PLC. Toda a electrónica digital implementada serve para atingir este objectivo.

Nas próximas subsecções irão ser retratados, com algum pormenor, os dois grandes blocos funcionais, de características eléctricas/electrónicas, presentes no TEDI 2010.

4.2.1. CIRCUITOS DE ALIMENTAÇÃO EM DC

Tanto a Unidade de Adesão como a de Locomoção têm associado um circuito de alimentação em corrente contínua, com características semelhantes, que fornecem energia eléctrica com os níveis necessários para cada uma das funcionalidades definidas para o protótipo. A Figura 87 apresenta o diagrama de blocos adoptado para a distribuição das alimentações em DC.

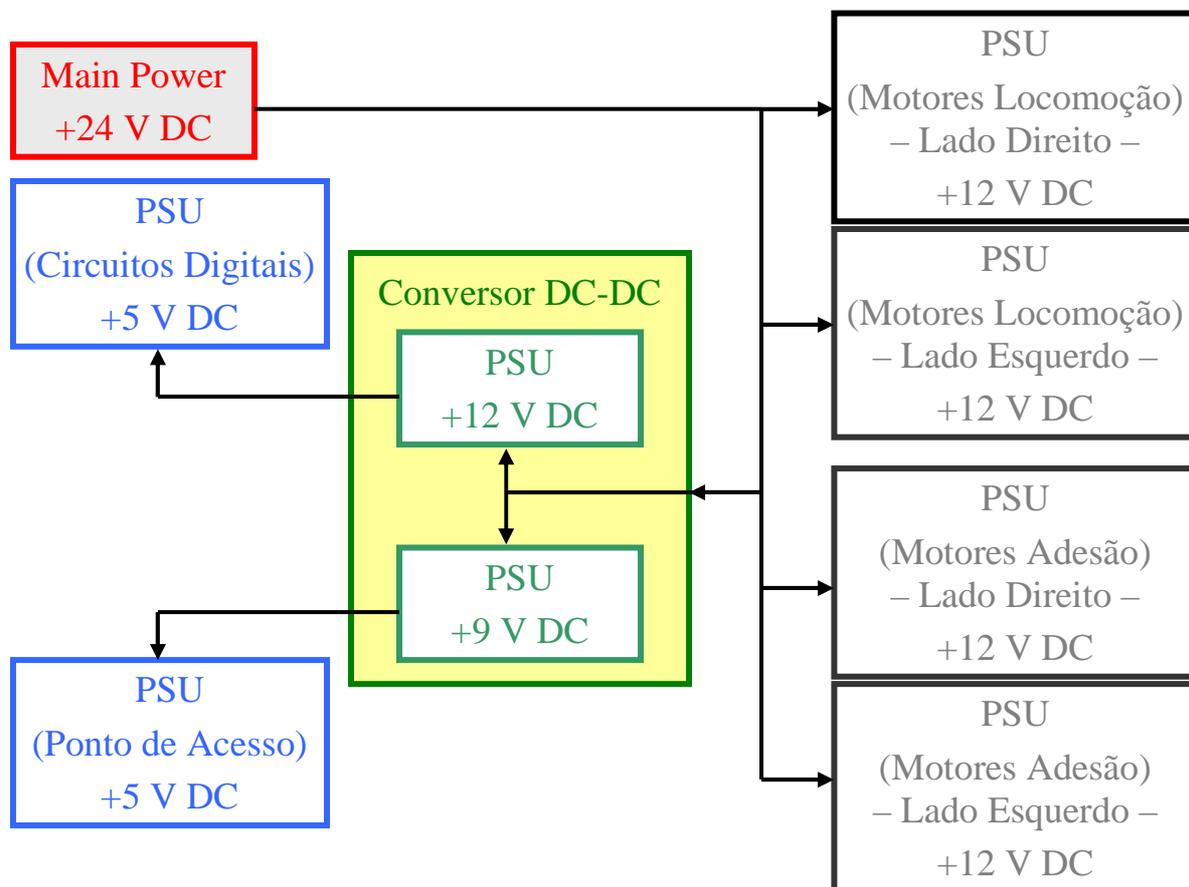


Figura 87 Diagrama de blocos da distribuição das alimentações em DC presentes no robô trepador

Tal como pode ser observado na Figura 88, cada uma das duas placas de circuito impresso (PCI), com os circuitos de alimentação DC, é composta por três fontes de alimentação, reguladas com circuitos integrados do tipo monolítico, como são o 7805 e o 7812. Uma

dessas fontes, a de +5 V DC, não possui qualquer ajuste da tensão na saída, permanecendo este valor fixo. As outras duas fontes, as de +12 V DC, possuem a possibilidade de ajuste da tensão na sua saída, por intermédio de um *trimmer* do tipo multi-volta.

A placa de circuito impresso (PCI) elaborada tem o aspecto reproduzido pela Figura 88, na qual é possível identificar toda a electrónica utilizada.

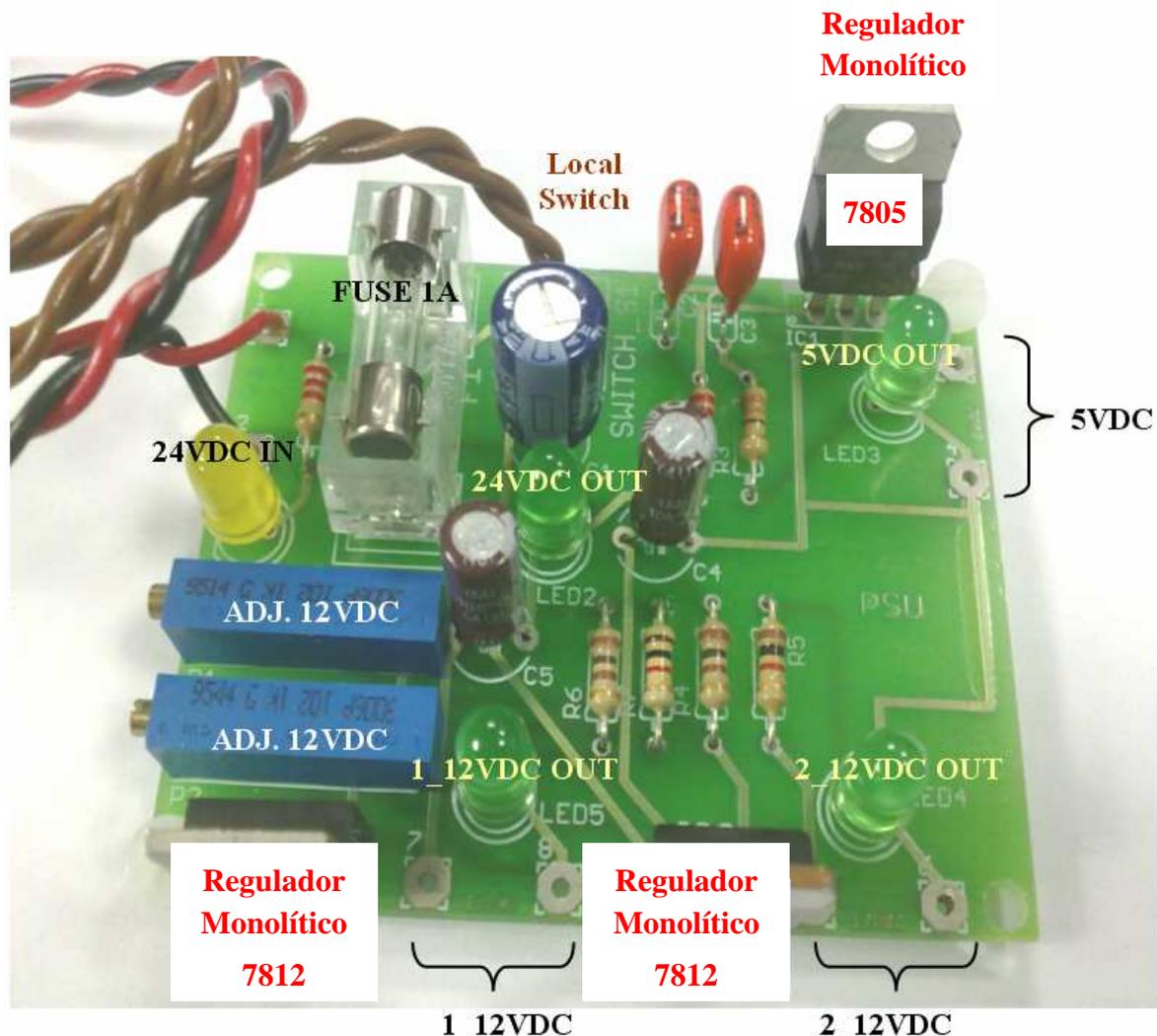


Figura 88 A placa de circuito impresso utilizada nos circuitos de alimentação DC

O robô móvel é constituído por duas destas PCI. Uma delas é utilizada para fornecer os +5 V DC que alimentam todos os circuitos digitais e 2x +12 V DC, independentes, para cada par de motores utilizados na Unidade de Locomoção, e dispostos sobre o mesmo lado da Base em PVC, onde estão montados. A outra PCI é utilizada para fornecer os +5 V DC que alimentam o ponto de acesso (AP) do tipo Wi-Fi 802.11g, utilizado no sistema de comunicação remota

com o robô, e $2 \times +12$ V DC, independentes, para cada par de motores utilizados na Unidade de Adesão, e disposto sobre o mesmo lado da Base em PVC, onde estão aplicados. Os restantes equipamentos electrónicos (como são o PLC e todo o conjunto sensorial) são alimentados directamente a partir dos +24 V DC aplicados à entrada, via ligação eléctrica umbilical, excepto os sensores ultra-sónicos de detecção de obstáculos, nas partes frontal e traseira, que são alimentados pelos +5 V DC, também utilizados nos circuitos digitais. Assim, existe um painel/sistema de controlo/protecção e distribuição da alimentação em +24 V DC fornecida externamente ao robô trepador. A Figura 89 mostra e descreve este painel.

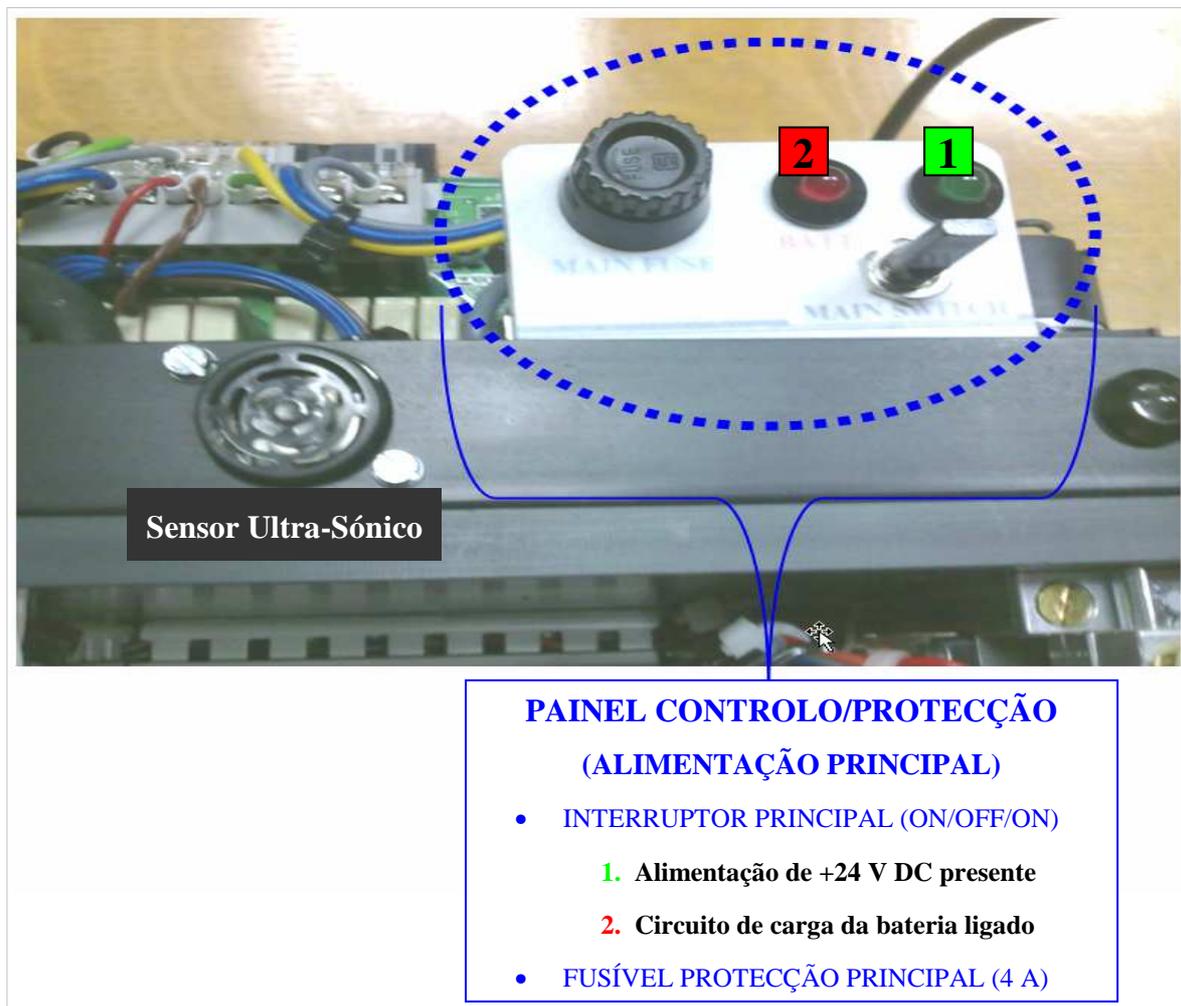


Figura 89 Sistema eléctrico de controlo/protecção e distribuição da alimentação em +24 V DC recebida por conexão eléctrica ao exterior

O painel de controlo da alimentação principal (de +24 V DC) permite alimentar todo o robô trepador, além de prever a possibilidade futura de integração de baterias no robô, possibilitando a sua carga eléctrica, permitindo assim ao robô mais autonomia na exploração do ambiente de aplicação e inspecção.

Também faz parte do sistema de alimentação uma unidade de conversão DC-DC (circuito electrónico conversor de DC para DC), cuja função principal é dissipar sob forma térmica, controlada por um ventilador, o excesso de potência/tensão entregue aos reguladores monolíticos a partir dos +24 V DC, face às tensões mais baixas necessárias a jusante, tais como são os +5 V DC. A Figura 90 é uma fotografia devidamente legendada que ilustra esta situação.

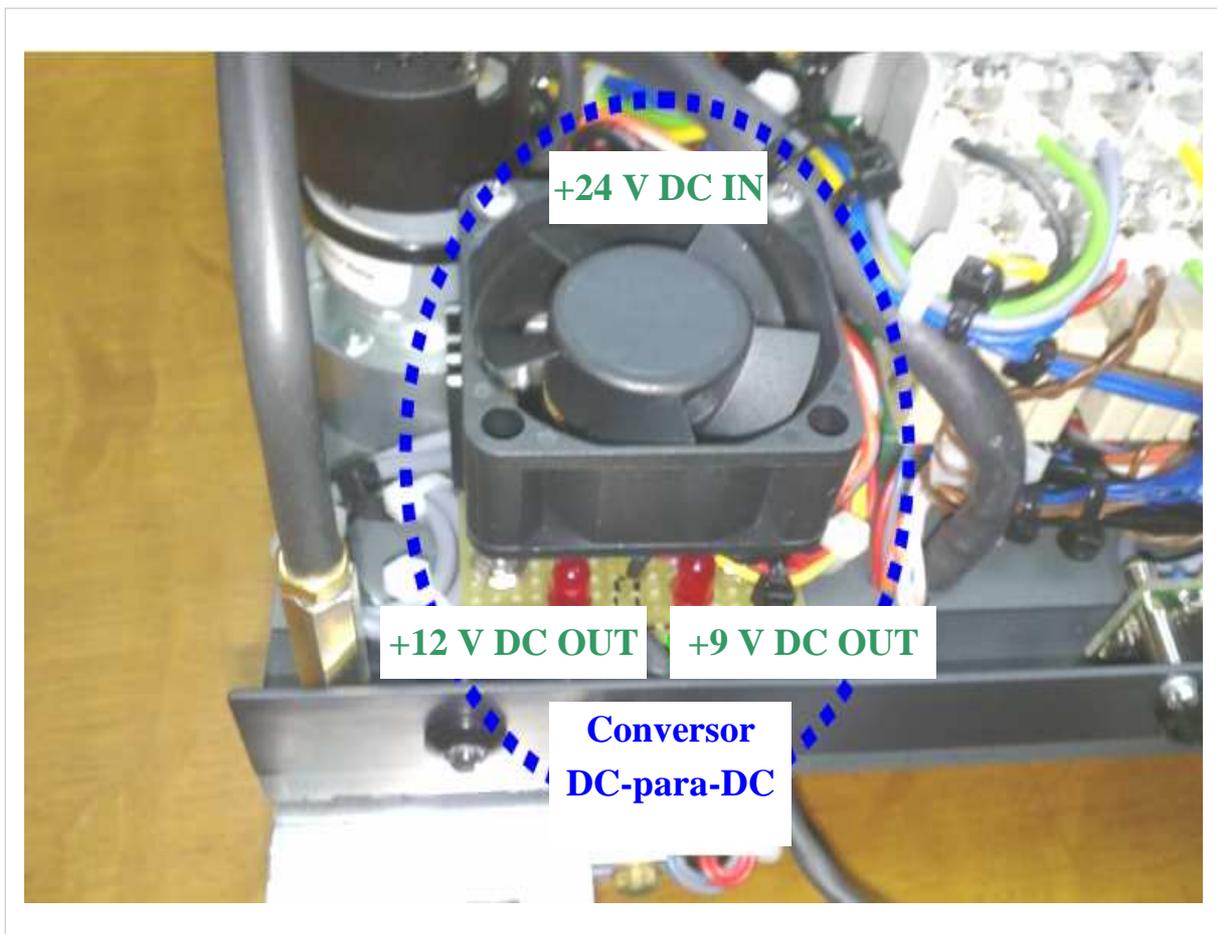


Figura 90 A unidade de conversão DC-DC

Ao nível da implementação eléctrica, a saída de +9 V DC é utilizada para alimentar o regulador monolítico da fonte de tensão com +5 V DC, que fornece aproximadamente 700 Ma ao AP do tipo Wi-Fi 802.11g. A outra saída, de +12 V DC, é encaminhada para o regulador monolítico da outra fonte de +5 V DC, a qual é responsável por alimentar electricamente com aproximadamente 200 Ma todos os circuitos lógicos/digitais complementares à operação lógica do PLC e os sensores ultra-sónicos de detecção de obstáculos.

4.2.2. CIRCUITOS LÓGICOS E DIGITAIS

Tanto a Unidade de Adesão como a de Locomoção têm um circuito de controlo lógico associado, que permite o seu controlo otimizado pelo PLC. Nas Figuras 91 e 92 podem-se observar fotografias, devidamente legendadas, destes circuitos electrónicos digitais do tipo controlo lógico.

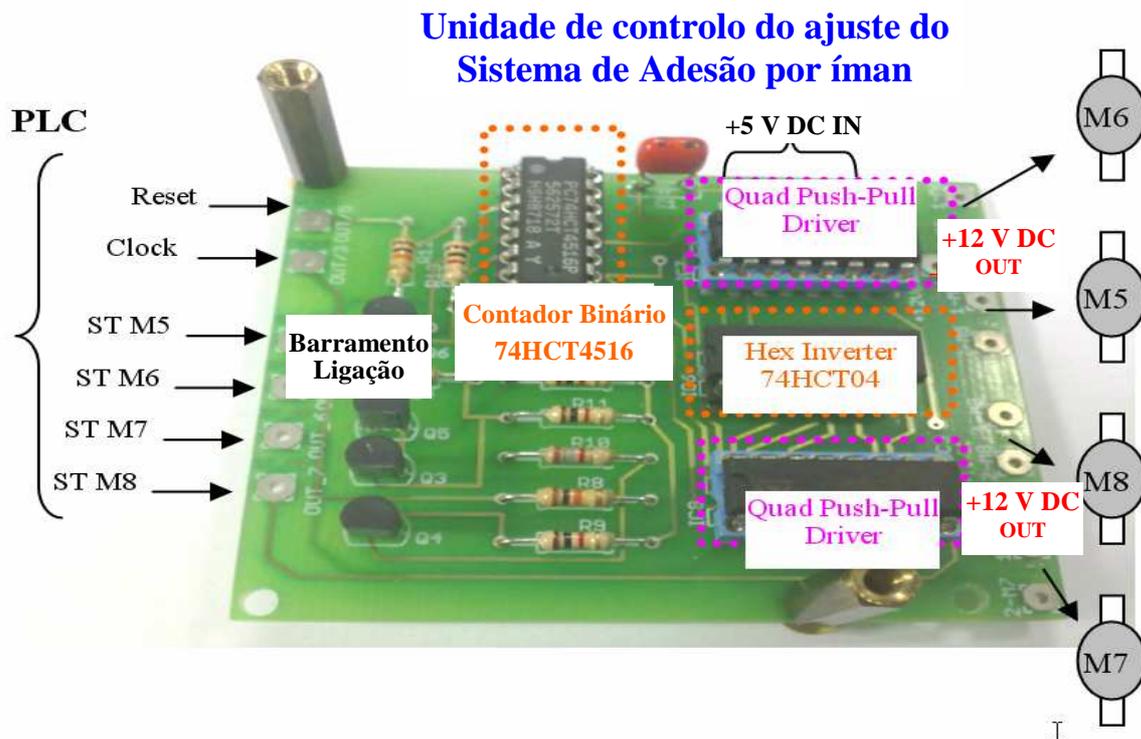


Figura 91 Circuito lógico da Unidade de Adesão

O seu princípio de funcionamento é baseado num Contador Binário do tipo incremental/decremental (*Binary Up/Down Counter*), utilizado na configuração incremental (*UP*) e interligado com inversores lógicos (*NOT*). O PLC, por intermédio das suas saídas, executa inicialmente o *Reset* do Contador Binário, colocando as suas quatro saídas ao nível lógico “0”. Posteriormente, utilizando-se a entrada de *Clock*, são enviados pelo PLC vários impulsos em proporção ao valor lógico que se deseja na saída do Contador Binário (entre “0” e “15” decimal). O tipo de valor lógico, “0” ou “1”, presente em cada uma das quatro saídas do 74HCT4516, define o sentido de rotação do motor associado: com 0 V DC (“0” lógico) define um sentido e +5 V DC (“1” lógico) o sentido oposto. Posteriormente, só é necessário fazer o *Start* associado ao motor “x” pretendido, ST Mx, para se colocar em funcionamento esse motor. Como o controlo sobre a Unidade de Adesão tem que ser o mais rápido possível,

pois a unidade tem um funcionamento muito dinâmico, são usadas saídas do PLC do tipo FET e Fast FET para os sinais de *Reset* e *Clock*, respectivamente. Os sinais *Start* (ST Mx) utilizam saídas do PLC do tipo relé, pois não existem requisitos de rapidez tão exigentes e críticos.

Os *Quad Push-Pull Drivers* são do tipo L293D, em circuito integrado (CI), já com díodos de protecção contra picos de tensão (*output clamping diodes*), para protecção do CI face às forças contra-electromotrizes (f.c.e.m.) geradas pelas bobinas dos motores quando são desligadas da alimentação, e servem para comandar em potência, com uma tensão regulada e ajustável de +12 V DC, os vários motores. Em cada L293D são combinados os quatro *Half-H Drivers* para se formarem duas pontes H, que irão comandar dois motores, ambos do mesmo lado físico do robô trepador. Assim, o sistema permite definir o sentido de rotação e o arranque de cada motor, de uma forma individualizada e independente.

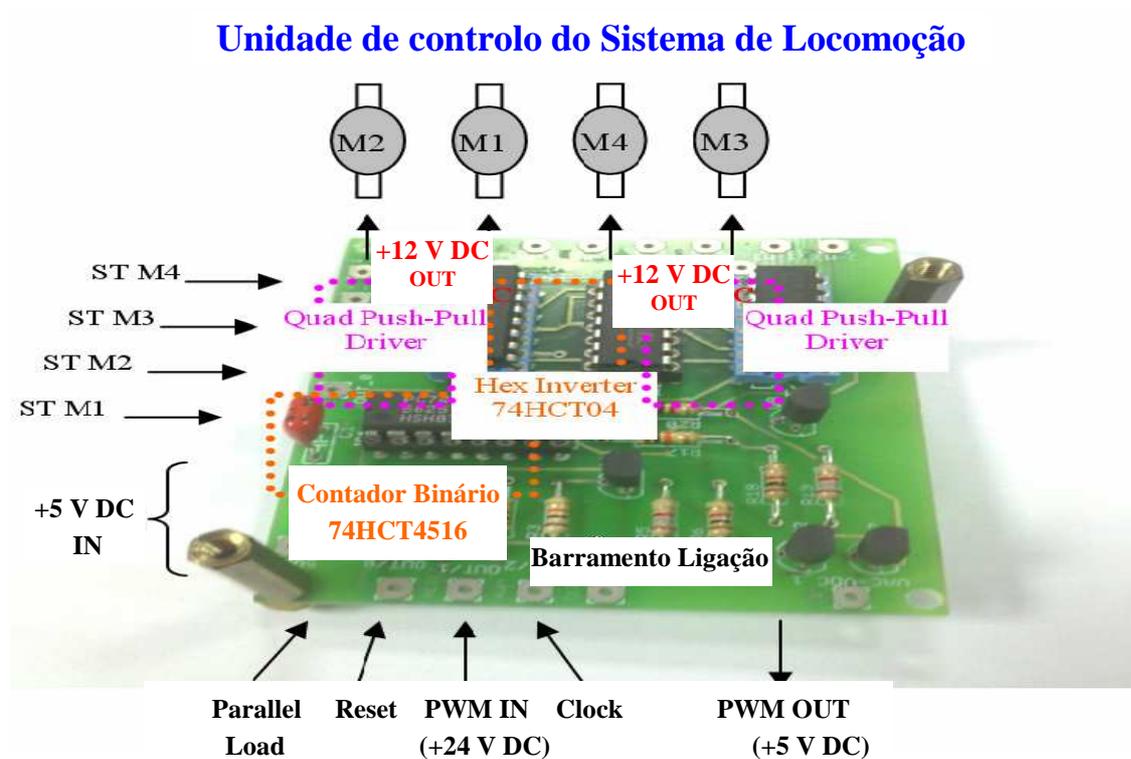


Figura 92 Circuito lógico da Unidade de Locomoção

O controlo da Unidade de Locomoção tem um princípio de funcionamento muito semelhante ao que foi descrito para o controlo da Unidade de Adesão Magnética Ajustável, com algumas pequenas diferenças que estão associadas às particularidades da própria função atribuída a cada uma delas. Como o controlo desta unidade não necessita de ser tão rápido como o da Unidade de Adesão, os sinais de *Reset* e *Parallel Load* são feitos utilizando saídas do PLC

por relé e o *Clock* por FET (e não Fast FET). Considerando o facto de o robô apresentar essencialmente um movimento rectilíneo, para a frente ou para trás, existe a possibilidade de comutação rápida entre eles com a utilização da entrada *Parallel Load*. Esta envia para as quatro saídas do Contador Binário o valor lógico “1” (correspondente ao valor 15 em decimal), invertendo o sentido de rotação dos motores relativamente a uma configuração com as quatro saídas ao nível lógico “0” (0 em decimal), possibilitada pela entrada de *Reset*. Todas as restantes configurações para locomoção são obtidas a partir da entrada de *Clock*, segundo o processo descrito anteriormente para a Unidade de Adesão. Os sinais de *Start* (ST Mx) utilizam saídas do PLC do tipo relé.

Face ao exposto, na Figura 93 representa-se o estado lógico das quatro saídas do contador binário na situação de locomoção mais vulgar, o movimento rectilíneo para a frente ou para trás.

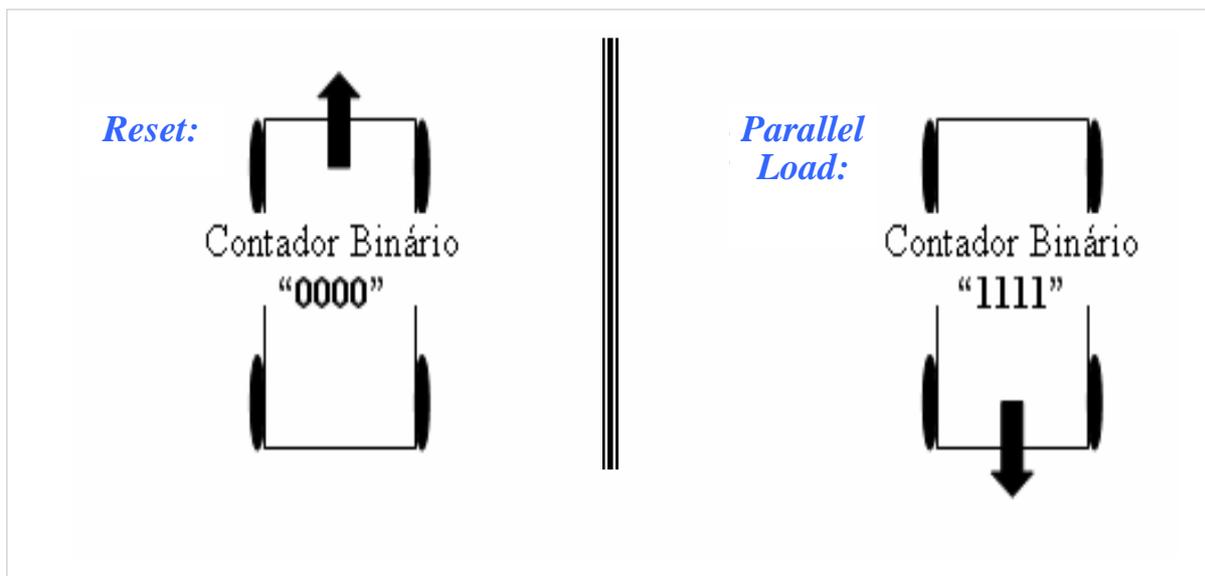


Figura 93 Configuração do processo de locomoção rectilínea nos dois sentidos

As outras configurações possíveis para a locomoção do robô estão representadas na Figura 94. Aqui é possível observar as alterações que são necessárias introduzir na saída do Contador Binário para executar as transições entre os diferentes tipos de movimentos possíveis, como mudança de direcção, passando pela locomoção rectilínea em ambos sentidos.

Os *Quad Push-Pull Drivers* utilizados também são do tipo L293D, tal como foi descrito para a Unidade de Adesão. Servem para comandar em potência, com uma tensão de +12 V DC regulada e ajustável, cada um dos quatro motores existentes para a locomoção. Em cada L293D também são combinados os quatro *Half-H Drivers* para se formarem duas pontes H,

que irão comandar dois motores de locomoção, ambos montados no mesmo lado físico do robô trepador.

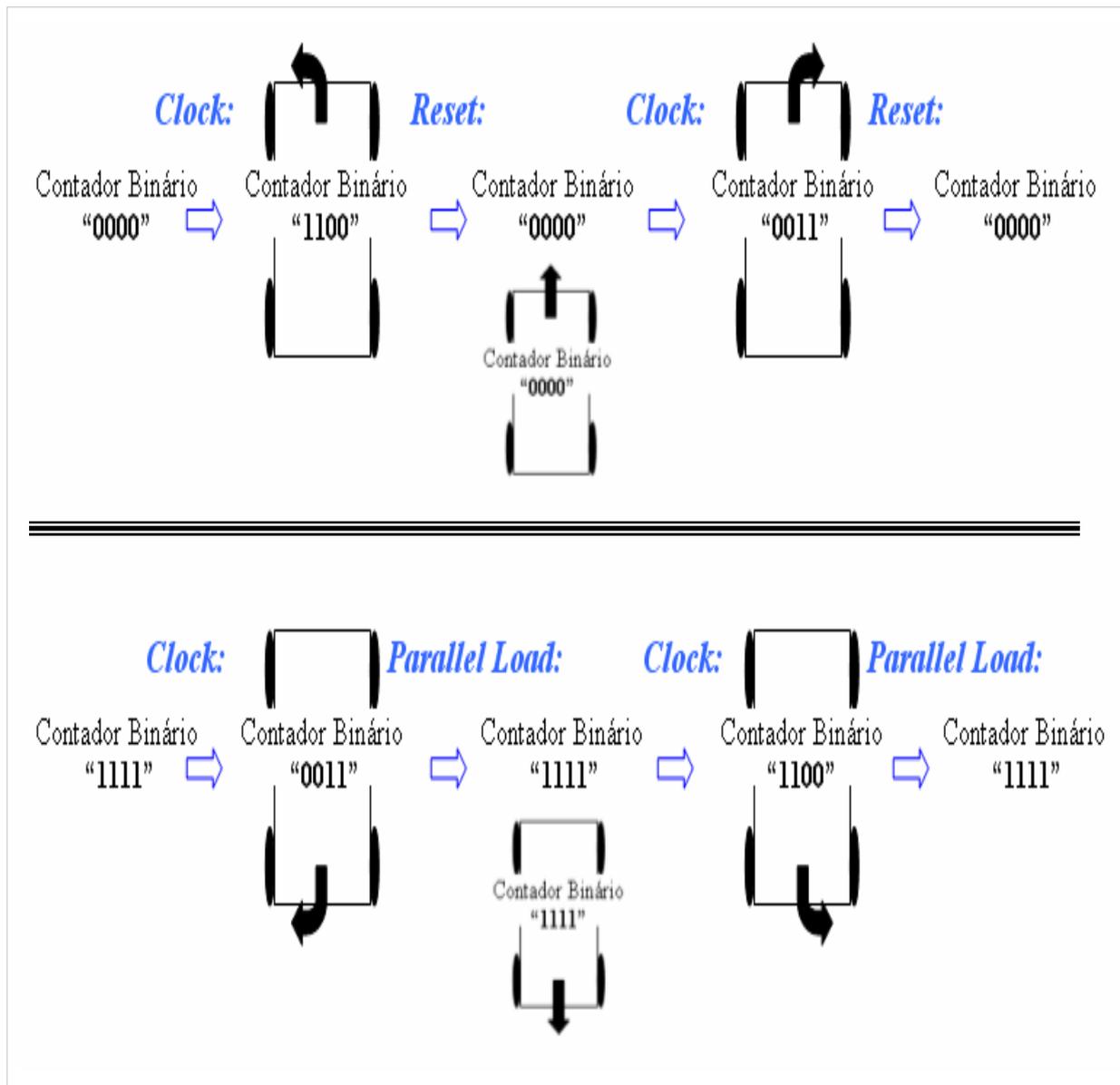


Figura 94 Configuração do processo de locomoção não retilínea nas várias direcções e sentidos

4.2.3. INTERLIGAÇÃO DOS CIRCUITOS DE ALIMENTAÇÃO EM DC COM OS CIRCUITOS LÓGICOS E DIGITAIS

Na Figura 95 pode-se ver como foram combinados fisicamente e electricamente ambos os tipos de circuitos presentes no robô trepador TEDI 2010. Pode-se ainda observar que a montagem dos módulos electrónicos finais, um para o controlo da Locomoção e o outro para o controlo da Adesão, resulta numa estrutura compacta e optimizada em tamanho e características eléctricas, composta pelos circuitos anteriormente analisados.

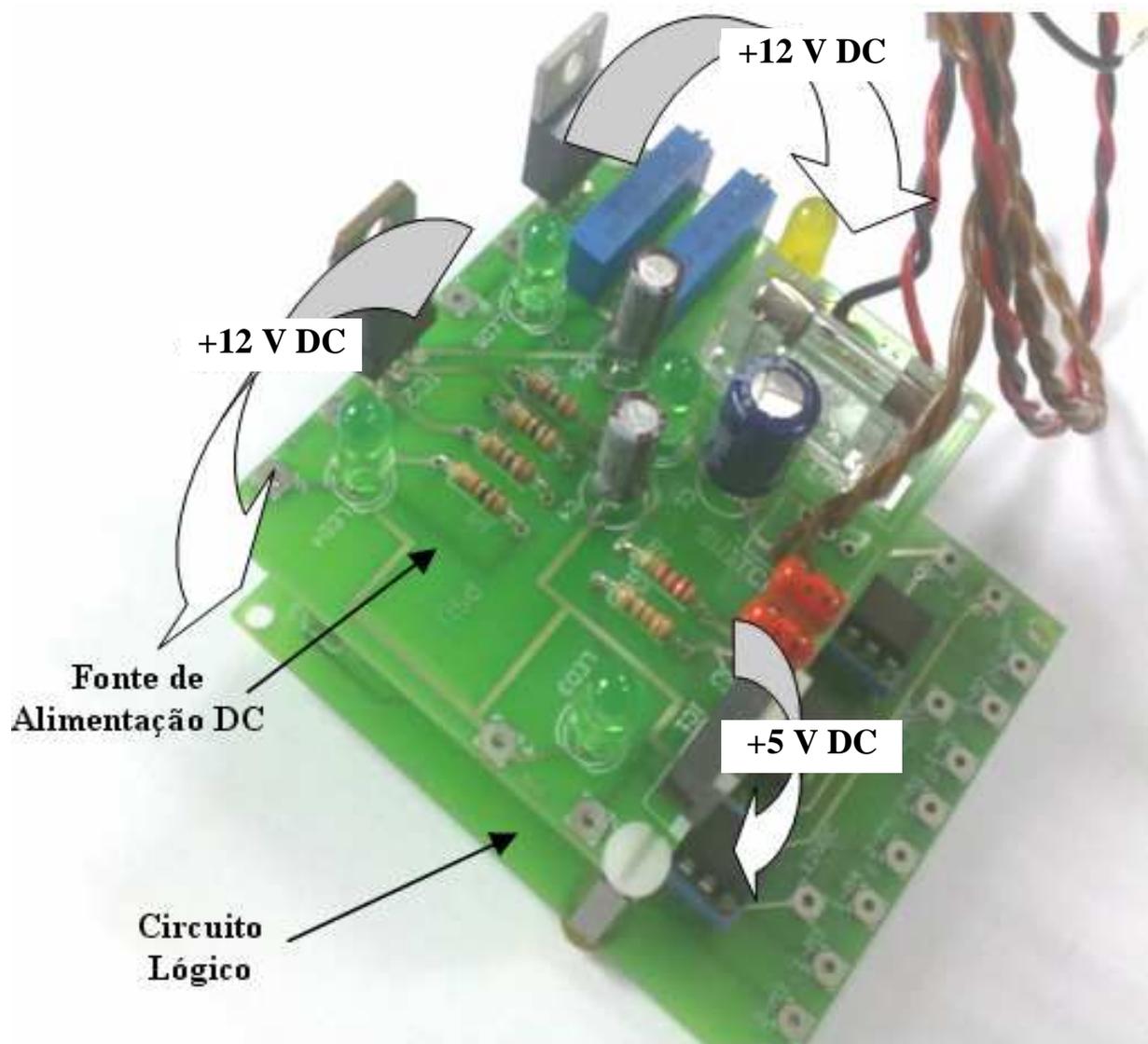


Figura 95 Montagem do circuito de alimentação em DC sobre o circuito lógico e sua interligação eléctrica

4.2.4. LAYOUT ELÉCTRICO FINAL

Nas Figuras 96 e 97, pode-se observar o *layout* eléctrico adoptado e a descrição legendada das respectivas funções e interligações, nomeadamente nos planos superior e inferior do robô trepador.

No plano superior (ver Figura 96) encontra-se, essencialmente, toda a electrónica necessária para a alimentação e controlo do robô, e também os motores do sistema de adesão. Nesta figura é possível identificar a ligação em Ethernet entre o Ponto de Acesso Wi-Fi e o PLC, que irá permitir a programação do PLC, e principalmente o controlo à distância de todo o

sistema automatizado implementado a partir de um computador que corra uma aplicação amigável do tipo Interface Homem-Máquina (HMI).

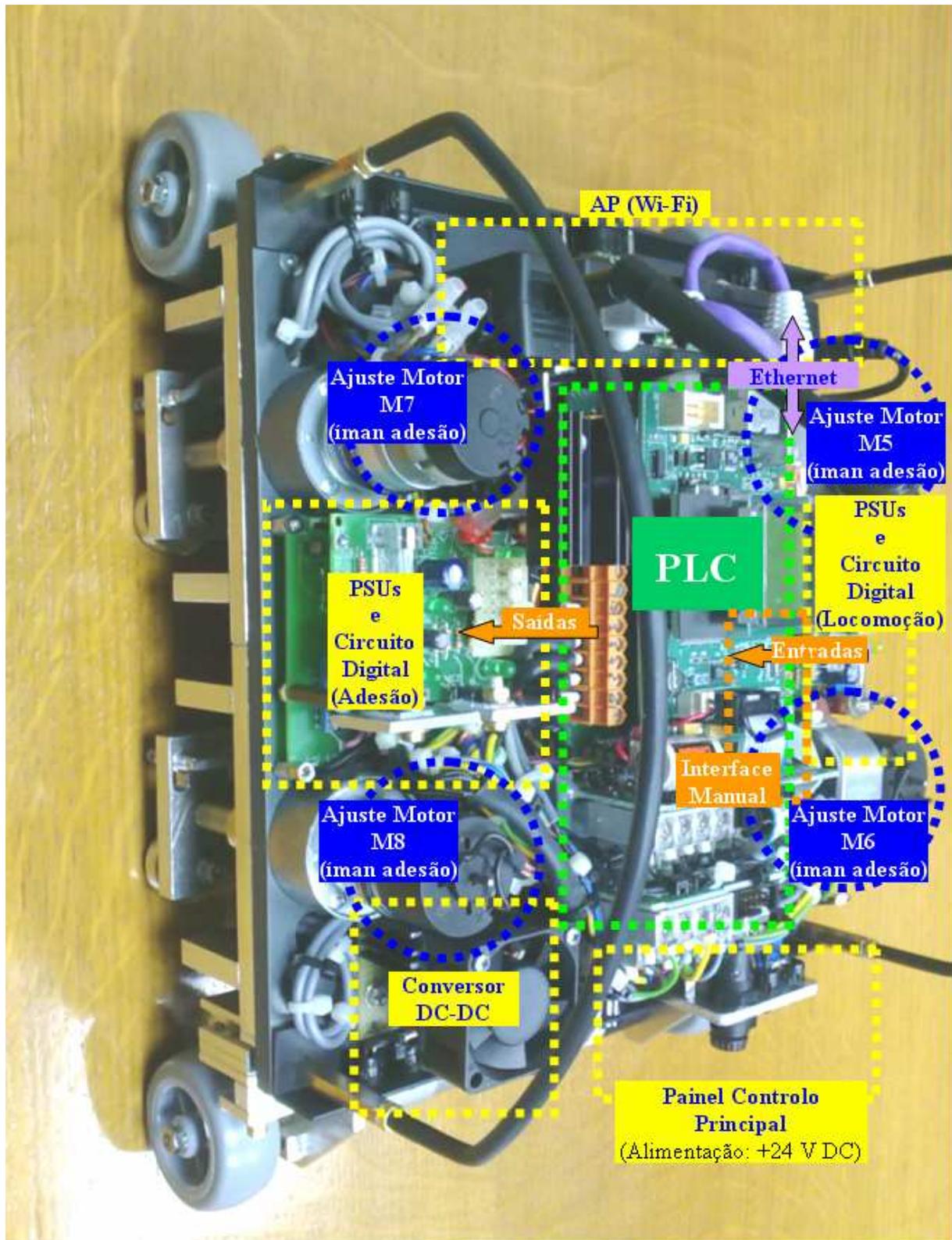


Figura 96 Vista superior do robô

No plano inferior (Figura 97) encontra-se, essencialmente, toda a “mecânica” necessária para o controlo da locomoção e adesão do robô, os motores do sistema de locomoção e a maioria dos dispositivos sensoriais. Neste plano do robô trepador estão, quase exclusivamente, implementados todos os componentes sensoriais que permitem ao PLC do robô obter um *feedback* das acções mecânicas e da interacção com o meio envolvente, com a excepção dos sensores ultra-sónicos para detecção de obstáculos, frontais e/ou traseiros, que estão instalados no outro plano.

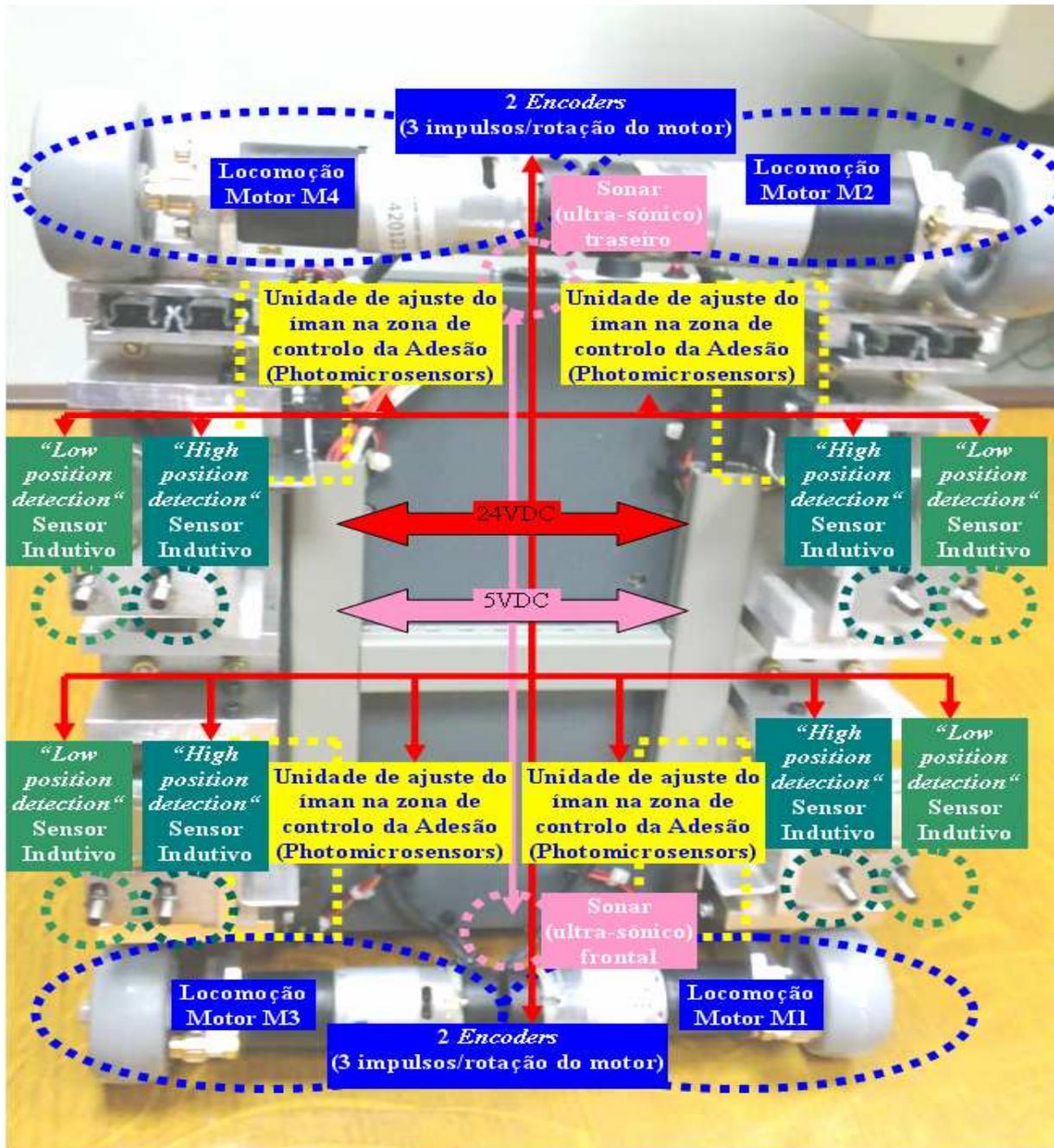


Figura 97 Vista inferior do robô

4.3. PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA ROBOTIZADO

Nesta secção é abordada a programação do sistema que constitui o protótipo do robô trepador. Esta é efectuada sobre *hardwares* distintos, mas complementares, já que o protótipo, para além do próprio robô trepador com o PLC, possui uma interface amigável para o seu controlo remoto, isto é, um SCADA/HMI a partir de um PC colocado à distância.

4.3.1. ESTRUTURA DE PROGRAMAÇÃO DO PLC

A programação do PLC, que é executado no *software* editor RSLogix500, tem em consideração as características próprias do PLC MicroLogix 1100 utilizado no protótipo. Na sua execução foi essencial manipular, de uma forma organizada, os registos de dados que existem por omissão (*Default Data Files*), com o objectivo de se obter uma programação estruturada. Estes registos podem ser acedidos a partir da árvore de projecto que aparece no editor de programação do RSLogix500, na janela posicionada por omissão à esquerda da janela de programação (Figura 98), e servem para utilização como etiquetas (*Tags*) ao longo de todo o programa elaborado para o PLC. A Tabela 6 mostra a descrição de cada um dos registos de dados.

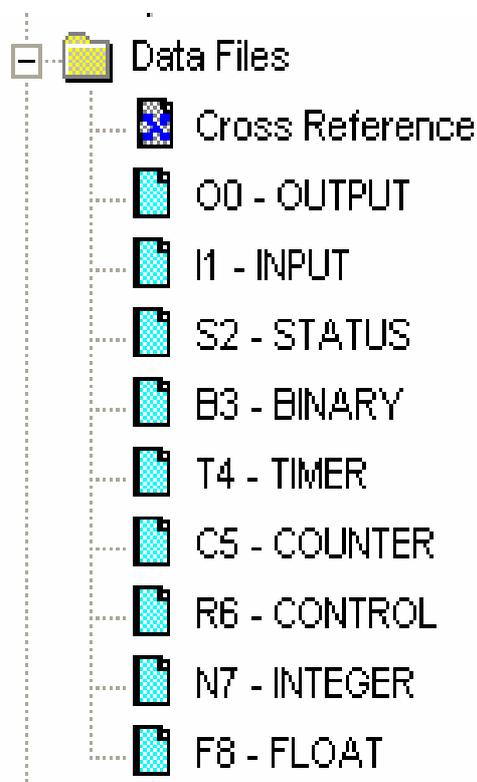


Figura 98 Os registos de dados do PLC MicroLogix 1100

Tabela 6 Descrição de cada registo de dados do PLC MicroLogix 1100

Registro	Tipo	Descrição
O0	Output	Este registo armazena o estado das saídas do PLC.
I1	Input	Este registo armazena o estado das entradas do PLC.
S2	Status	Este registo armazena informações do funcionamento do PLC, úteis para a resolução de problemas do controlador e funcionamento do programa.
B3	Bit	Este registo armazena a lógica de “relés” internos.
T4	Timer	Este registo armazena o acumulador dos temporizadores, os valores de <i>preset</i> e os bits de <i>status</i> .
C5	Counter	Este registo armazena o acumulador dos contadores, os valores de <i>preset</i> e os bits de <i>status</i> .
R6	Control	Este registo armazena o comprimento e a posição do ponteiro de programa, além dos bits de <i>status</i> , para obter instruções de controlo, tais como registos de deslocamento e sequenciadores.
N7	Integer	Este registo é usado para armazenar informação binária, ou numérica inteira, na gama de -32767 até 32768.
F8	Floating Point	Este registo é usado para armazenar informação numérica real na gama de 1.1754944e-38 até 3.40282347e+38.

A configuração do registo de dados, na programação do protótipo, permite criar toda a estrutura de etiquetas que será utilizada ao longo do programa. A Figura 99 ilustra a

organização adoptada para o registo de saída e a Figura 100 ilustra a organização adoptada para o registo de entrada.

The figure consists of two screenshots from a software interface. The top screenshot, titled "Data File 00 (bin) -- OUTPUT", displays a table of output bits. The columns are labeled "Offset" and "15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0". The rows show bit values for addresses 0:0.0, 0:0.1, 0:0.2, 0:0.3, and 0:2.0. A red box highlights the bit values for offset 0:0.0, and a yellow box highlights the bit values for offset 0:2.0. A text box in the center reads "Saídas disponibilizadas pelo hardware instalado".

The bottom screenshot, titled "Cross Reference Report - Sorted by Address", displays a list of instructions with their addresses and locations. A red box highlights the first six entries, and a yellow box highlights the last six entries. A text box on the right reads "Etiquetas utilizadas, com ou sem descrição, e sua localização no programa". Red arrows point from the text box to the highlighted entries.

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
0:0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Bul.1763	MicroLogix 1100 Series B
0:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Bul.1763	MicroLogix 1100 Series B
0:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Bul.1763	MicroLogix 1100 Series B
0:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Bul.1763	MicroLogix 1100 Series B
0:2.0											0	0	0	0	0	0	1762-0W8	- 8-Output Relay

Address	Instruction	File	Location
0:0.0	- MOV	File #2	MAIN_PROG - 21
0:0/1	- Reset Sistema		Locomoção
0:0/2	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 3
0:0/3	- OTL	File #2	MAIN_PROG - 12
	- OTU	File #2	MAIN_PROG - 32
	- XIC	File #2	MAIN_PROG - 35
0:0/4	- OTL	File #2	MAIN_PROG - 33
	- OTU	File #2	MAIN_PROG - 15
	- XIC	File #2	MAIN_PROG - 18
0:0/5	- Reset Sistema		Adesão
	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 4
0:2.0	- MOV	File #2	MAIN_PROG - 22
0:2/0	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 11
	- XIC	File #5	SENSORS - 10
0:2/1	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 11
	- XIC	File #5	SENSORS - 15
0:2/2	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 11
	- XIC	File #5	SENSORS - 20
0:2/3	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 11
	- XIC	File #5	SENSORS - 25
0:2/4	- Adesão		FrDir
	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 25
0:2/5	- Adesão		RearDir
	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 26
0:2/6	- Adesão		FrEsq
	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 27
0:2/7	- Adesão		RearEsq
	- OTE	File #2	MAIN_PROG - 28

Figura 99 Criação da estrutura de etiquetas associada ao registo de saída



Entradas disponibilizadas pelo hardware instalado

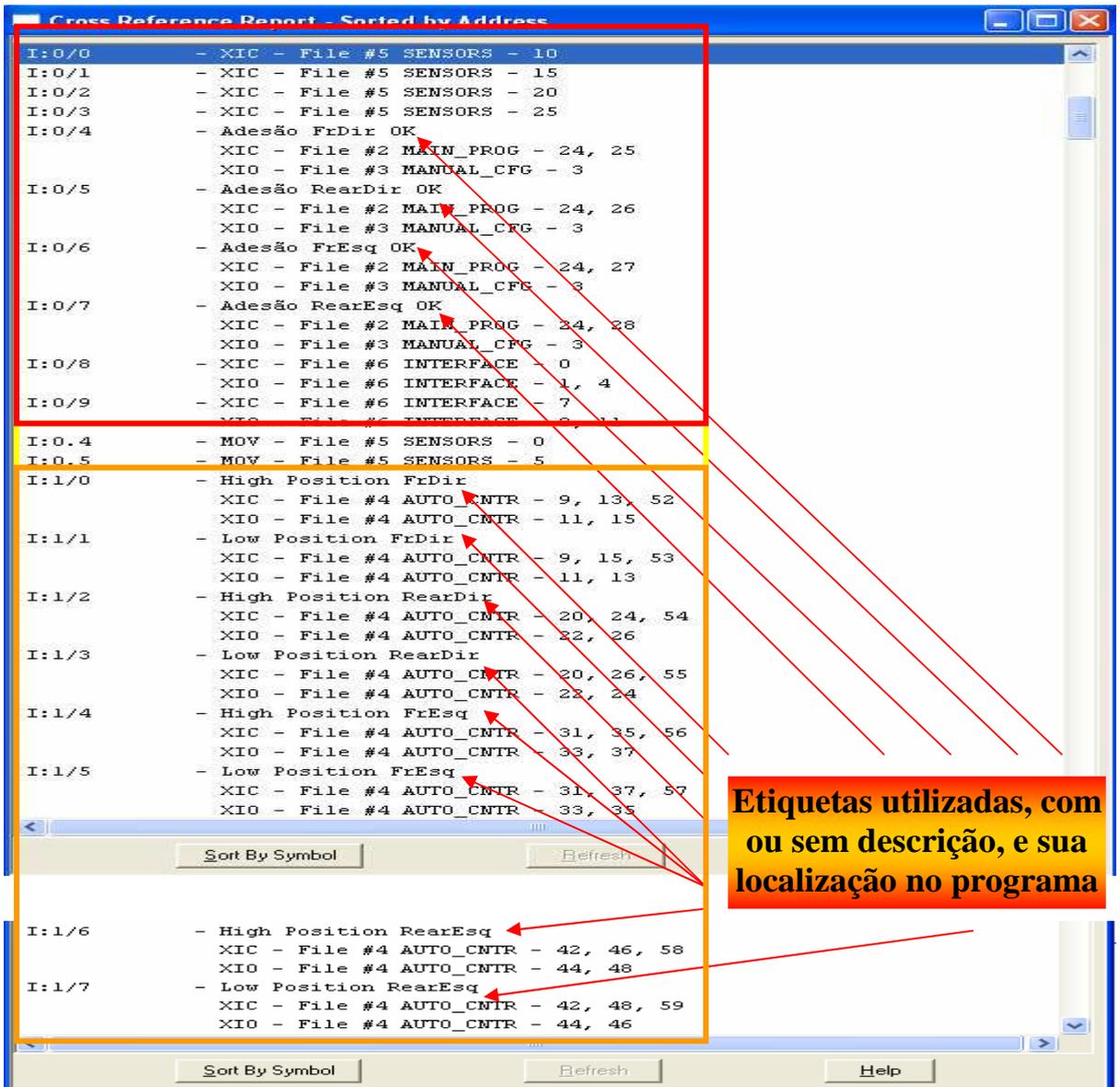


Figura 100 Criação da estrutura de etiquetas associada ao registo de entradas

Os registos B3, T4, C5, N7 e F8 são configurados com o mesmo objectivo, isto é, a sua utilização como etiquetas nas várias rotinas de programação, sejam principais ou subrotinas. Os restantes registos, S2 e R6, são do sistema, mas podem ser utilizados como etiquetas ao longo do programa. Um exemplo desta possibilidade é o registo S2:1/15, que regista o primeiro varrimento (*Scan*) efectuado (*First Pass*).

A árvore de projecto, além da tabela de registos internos do PLC, também permite aceder a outras funcionalidades associadas ao PLC usado e a este editor de programação. Na Figura 101 tem-se uma visão geral desta árvore.

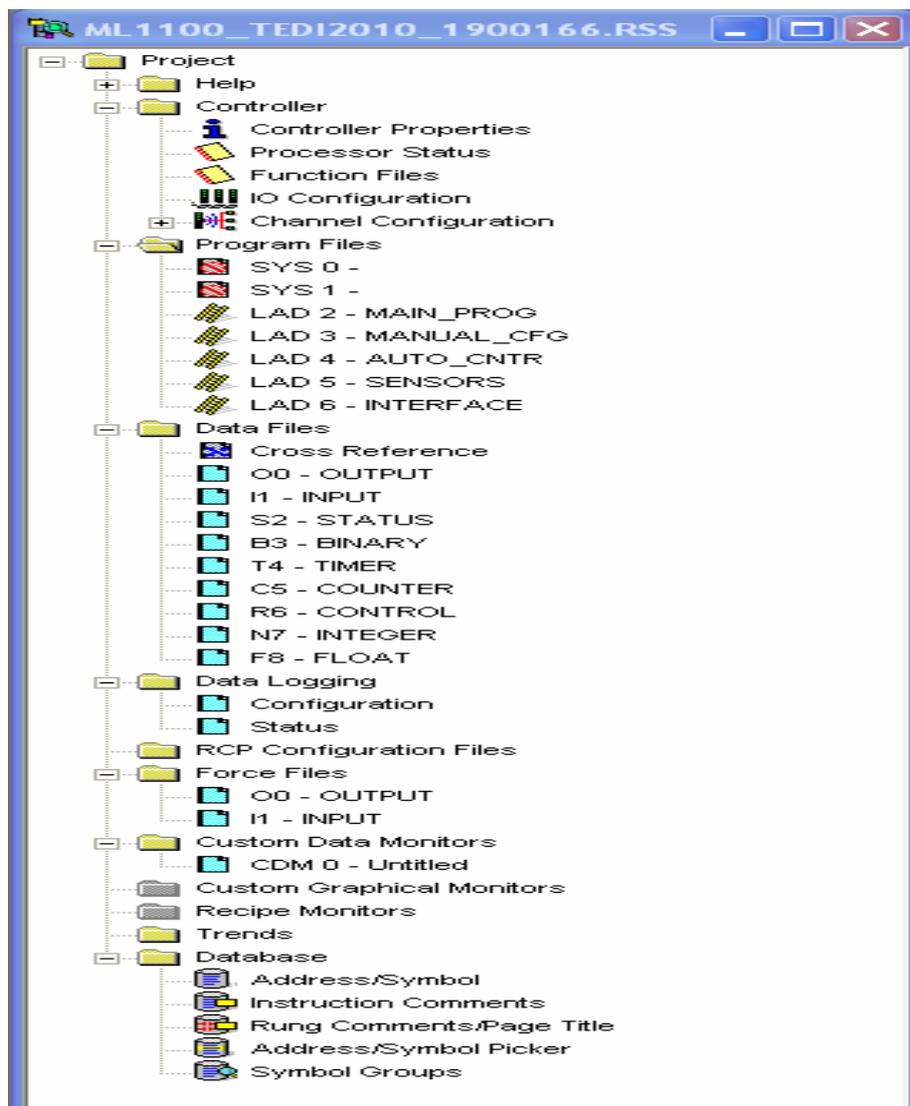


Figura 101 A árvore de projecto visualizada no *software* de programação RSLogix500

Das funcionalidades disponibilizadas, é importante salientar o acesso à configuração do *hardware* do controlador (*Controller*) e à manipulação e criação do arquivo (*Folder*)

designado por ficheiros de programa (*Program Files*), que contém os vários programas de sistema (SYS 0 e SYS 1) e os escritos em linguagem de programação para o PLC. Neste caso em particular foi utilizada a linguagem Ladder, também designada por diagrama Ladder ou diagrama de contactos. Em termos estruturais, cada programa está inserido num dos ficheiros (*Files*) do tipo LAD, isto é em LAD 2, LAD 3, LAD 4, LAD 5, LAD 6, etc., visualizados na árvore de projecto, sendo um deles o programa principal, que para além de conter programação pode chamar os outros programas como se estes fossem subrotinas. Neste caso o programa principal está associado a LAD 2, sendo os restantes LAD chamados pelo anterior. A Figura 102 ilustra esta característica da programação utilizada.

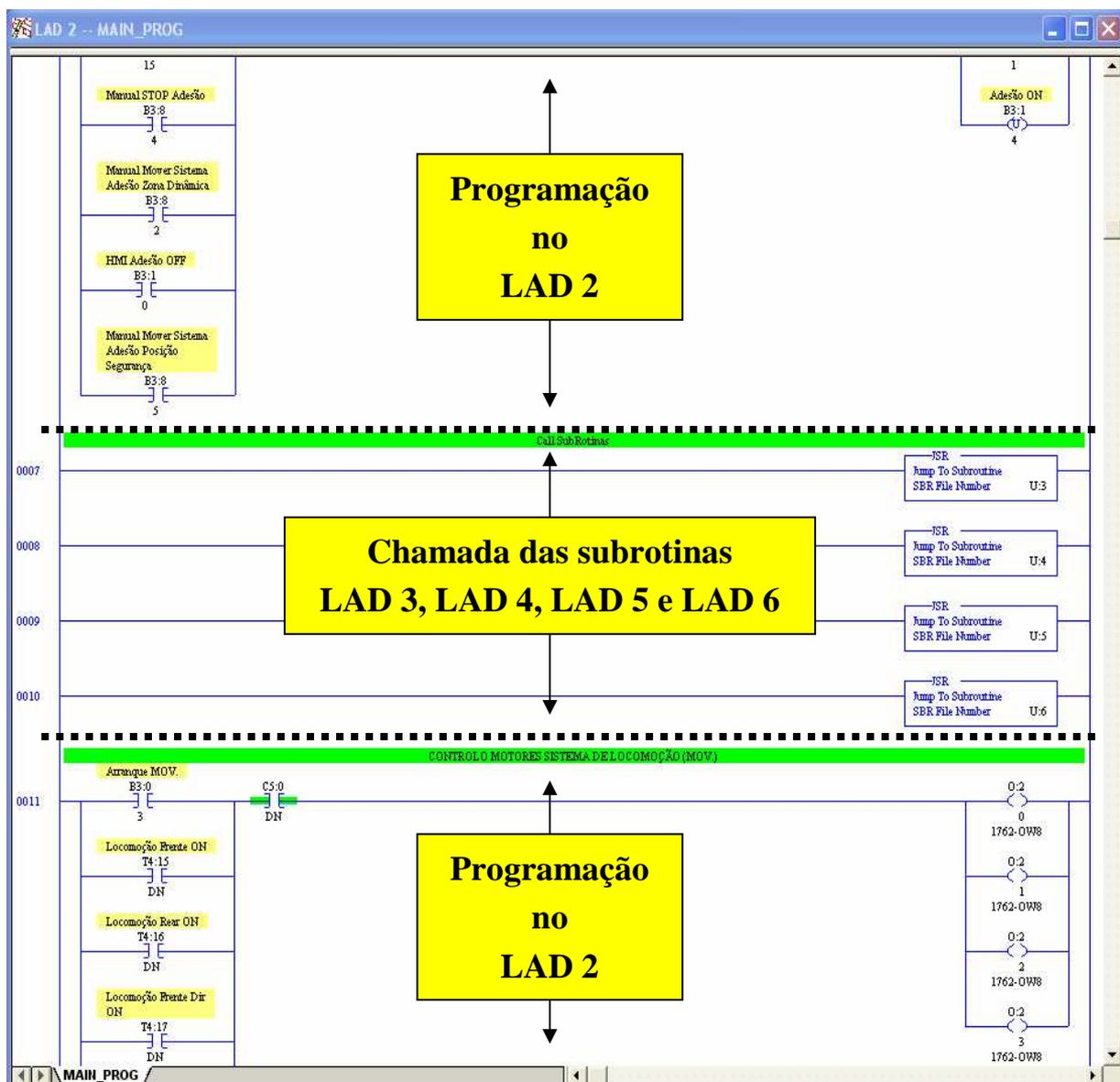


Figura 102 Estrutura de programação com uma rotina principal e subrotinas

O processo de funcionamento básico do PLC consiste em ler ciclicamente os sinais que são aplicados às suas entradas, transferindo-os de seguida para uma unidade de memória denominada memória de imagem de entrada. Posteriormente “corre” o programa, começando em LAD 2, chamando sequencialmente os restantes LAD à medida que a função designada por *Jump to Subroutine* (JSR) aparece. Este programa constitui a lógica que avalia a condição dos pontos de entrada e dos estados anteriores do PLC, executando as funções lógicas desejadas e accionando as saídas. Finalmente, no final do tempo de varrimento, os resultados são transferidos para a memória imagem de saída e aplicados aos terminais de saída, já com as alterações introduzidas pela execução do programa no seu todo. Pode-se dizer que o PLC está a funcionar de uma forma cíclica (em *loop*), sendo o tempo de cada ciclo designado por *Scan Time*. Este ciclo básico é representado na Figura 103.



Figura 103 Ciclo de processamento do PLC

4.3.2. ARQUITECTURA DO PROGRAMA DO PLC

Na programação desenvolvida para o controlo do protótipo TEDI 2010, tal como é visível na Figura 104, foi criada uma rotina principal e quatro rotinas secundárias ou subrotinas. A razão associada a esta estrutura tem a ver com a lógica funcional atribuída a cada rotina.

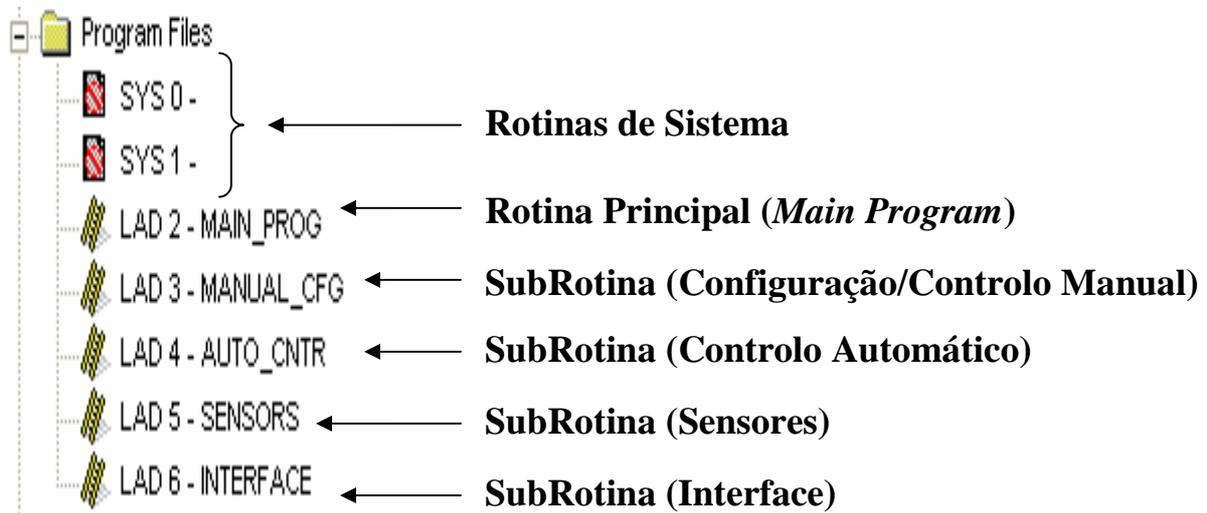


Figura 104 A funcionalidade atribuída a cada rotina do programa no PLC

A rotina principal (LAD 2), para além de chamar as outras rotinas, é a responsável pela lógica de inicialização do robô e pelo controlo principal sobre os sistemas de locomoção e de adesão, implementando a lógica necessária para a ligação do PLC aos circuitos lógicos externos. Possibilita também a interface com os motores através dos contadores binários (CI 74HCT4516) e das pontes H (CI L293D).

A rotina LAD 3 contém a lógica necessária à configuração e controlo manual efectuado por um operador do robô dos sistemas de locomoção e de adesão.

A rotina LAD 4 implementa toda a lógica necessária para o controlo automático dos sistemas de adesão e de locomoção do robô, não sendo necessária qualquer intervenção de um operador. É nesta rotina que se dá o controlo posicional dos ímanes relativamente à superfície de locomoção do robô. Também é aqui que se processa a possibilidade de exploração autónoma por parte do robô.

No que diz respeito ao controlo posicional em automático do Sistema de Adesão, pode-se utilizar dois processos distintos de actuação. O primeiro é do tipo sequencial, ou seja, cada Unidade de Adesão é controlada numa sequência de prioridade que está associada a um

método do tipo *token* ou testemunho. Assim, a Unidade de Adesão que necessita de se ajustar posicionalmente, em relação à superfície de locomoção, só o poderá fazer quando possuir o *token* do processo sequencial. Este *token* “passa” ciclicamente por todas as unidades, e é “agarrado” unicamente por aquela que necessita de actuar sobre a sua motorização, através dos sistemas lógicos associados. Quando esta unidade já não precisa de actuar, liberta o *token* para outra, ou este torna-se livre até tal cenário de necessidade surgir novamente. A Figura 105 representa este processo de funcionamento.

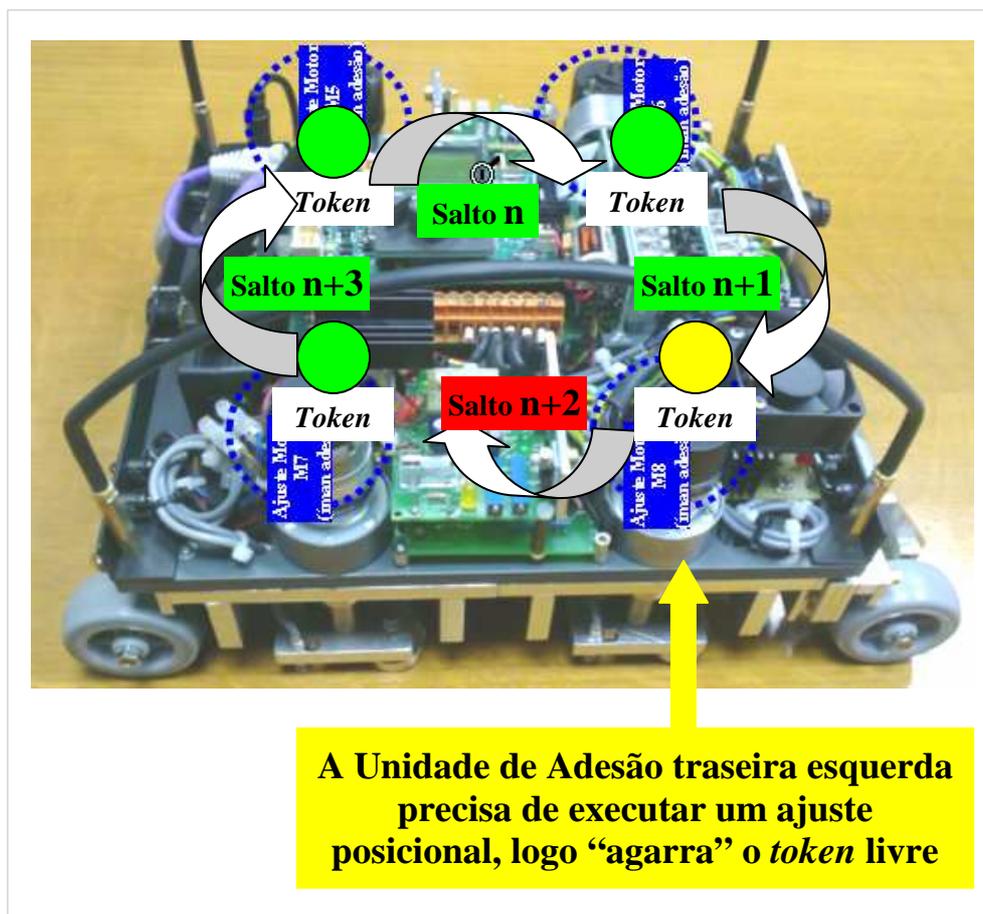


Figura 105 Processo por *token* de controlo automático do Sistema de Adesão

O segundo processo passível de utilização é com base num método do tipo paralelo, isto é, as Unidades de Adesão podem actuar em simultâneo sobre as suas motorizações. Esta situação obriga a pequenas pausas sobre a(s) unidade(s) que esteja(m) em funcionamento, face a outra(s) que também o inicie(m), de forma a se posicionar correctamente a lógica partilhada pelas unidades e que define o sentido de rotação dos motores. A Figura 106 representa este processo alternativo de funcionamento.

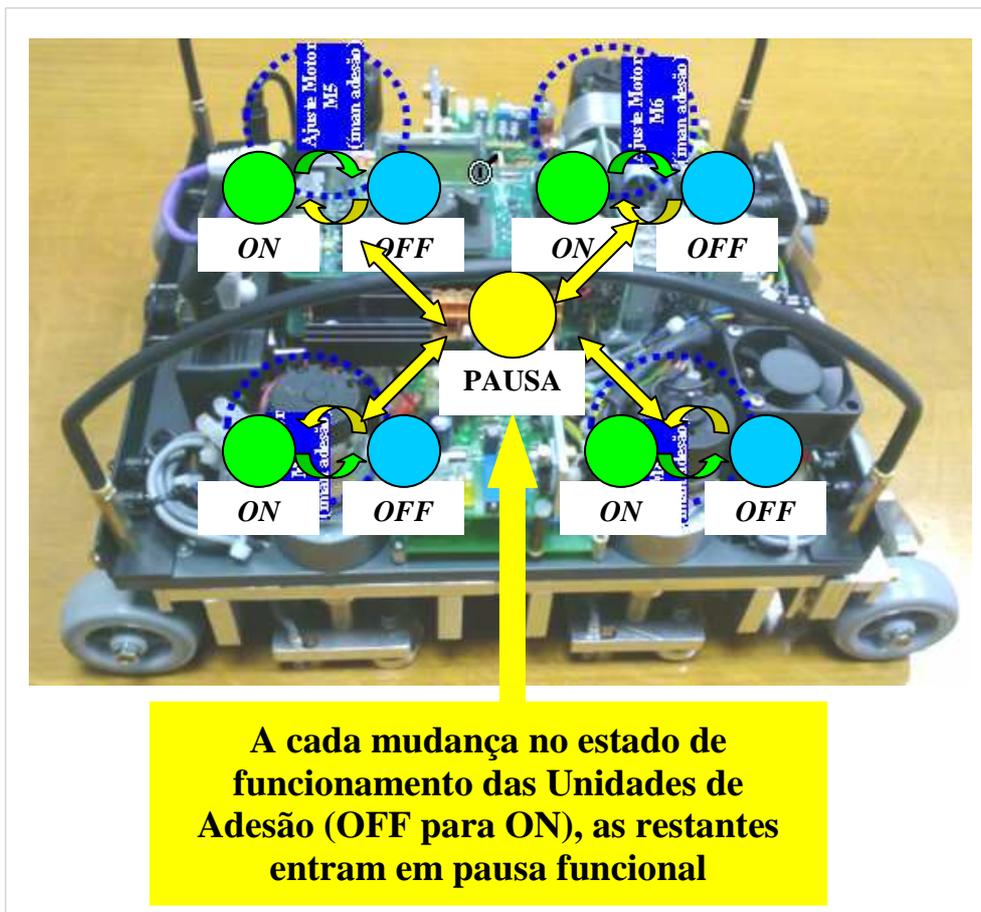


Figura 106 Processo do tipo paralelo de controlo automático do Sistema de Adesão

Relativamente à possibilidade que o robô possui para a exploração autónoma, esta é executada de forma totalmente automatizada usando uma de duas possibilidades, disponibilizadas pelo protótipo através do HMI. Uma das opções é a utilização de um temporizador (que terá que ser previamente programado pelo operador do sistema) que permite ao robô um movimento rectilíneo autónomo, com reacção (mudança de direcção ou imobilização) perante a presença de obstáculos no trajecto seguido, até à sua total imobilização por extinção do tempo predefinido. A Figura 107 descreve este tipo de exploração autónoma por temporização.

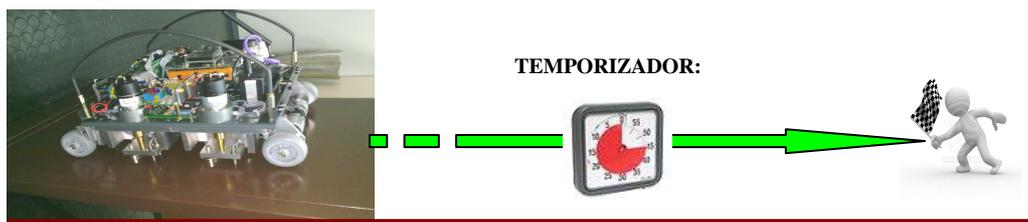


Figura 107 Exploração autónoma por temporização

A outra possibilidade está associada à predefinição de uma distância a percorrer, durante a qual o robô terá um comportamento em tudo semelhante à configuração por temporizador, até à sua total imobilização por alcance da distância predefinida. A Figura 108 descreve este tipo de exploração autónoma através da distância percorrida.

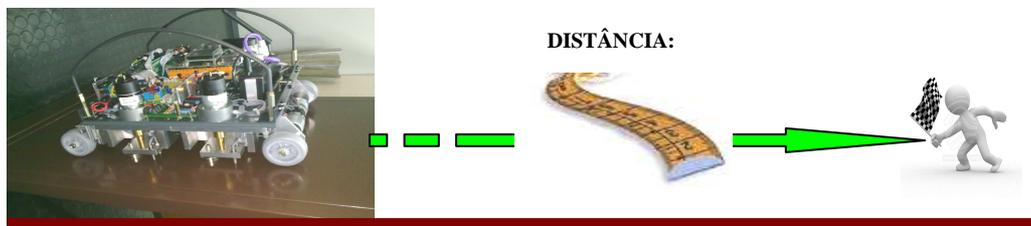


Figura 108 Exploração autónoma por distância

O processamento dos sinais enviados pelos sensores que controlam o movimento do robô, nomeadamente no que diz respeito à detecção de obstáculos pelos sonares e às assimetrias rotacionais dos motores detectadas pelos *encoders*, é efectuado na rotina LAD 5.

Por último a rotina LAD 6 está associada ao controlo lógico de uma interface física de comando manual local (Figura 109), que está acoplada a duas entradas digitais no PLC.

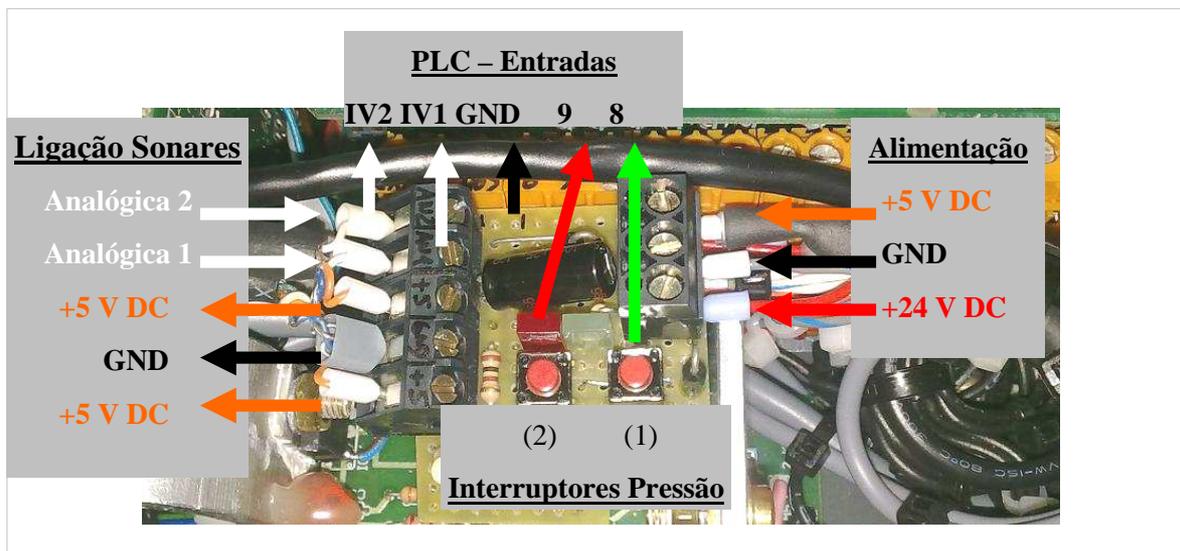


Figura 109 A interface de comando manual local dos sistemas de adesão e de locomoção

Esta interface permite actuar através de dois interruptores de pressão sobre os sistemas de adesão e de locomoção, possibilitando algumas funcionalidades locais, tais como:

- Activar o controlo automático do Sistema de Adesão – (1);

- Mover manualmente as quatro unidades de adesão em direcção à superfície de locomoção – (1);
- Parar os Sistemas de Adesão e de Locomoção – (2);
- Mover automaticamente as quatro unidades de adesão para a zona de segurança, isto é, numa direcção contrária à superfície de locomoção – (2).

Tal como é possível identificar na Figura 109, a interface de comando local também é utilizada para a conexão dos sonares frontal e traseiro do robô à fonte de alimentação de +5 V DC e às entradas analógicas em tensão IV1 e IV2 do PLC.

4.3.3. PROGRAMA DO SCADA/HMI

O programa do SCADA/HMI, que é executado no *software* RSView32, tem em consideração as características próprias da programação desenvolvida no PLC MicroLogix 1100 utilizado no protótipo. No seu desenvolvimento foi essencial criar as etiquetas (*Tags*) de uma forma organizada. Estas podem ser do tipo digital, analógico ou de caracteres (*Strings*), e ficam gravadas na base de dados das etiquetas (*Tag Database*), com o objectivo de se obter uma programação estruturada e sincronizada relativamente ao programa do PLC e suas etiquetas. Esta base de dados é acessível a partir da janela de projecto, seleccionando o caminho *Tag Database*, que se encontra na pasta *System* (como se pode ver na Figura 110).

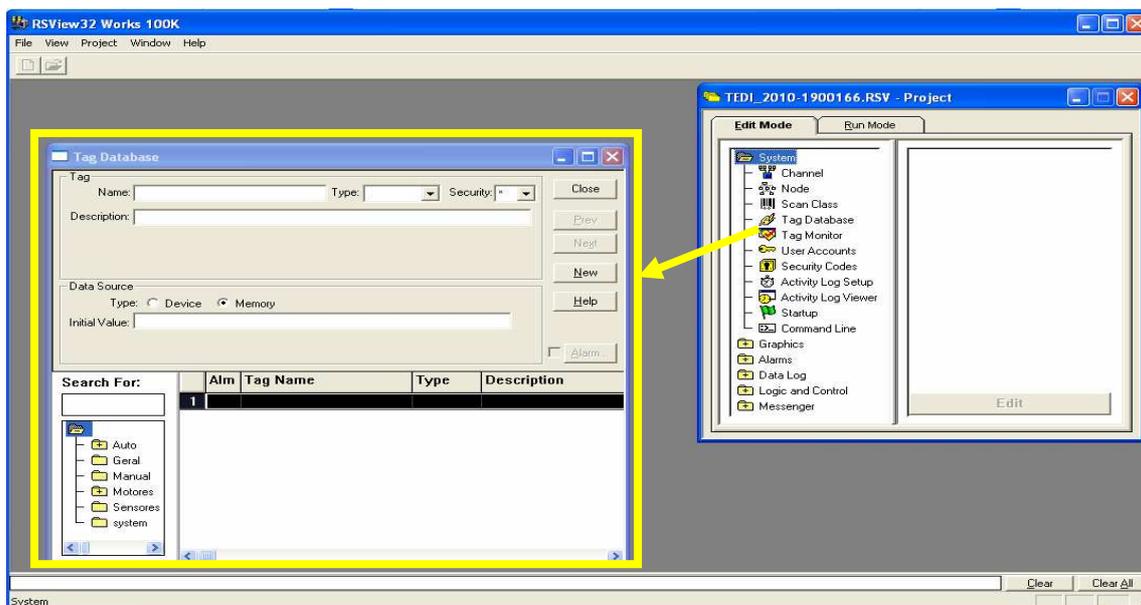


Figura 110 Base de dados de etiquetas do SCADA/HMI

A construção da base de dados das etiquetas durante a programação do SCADA/HMI do protótipo, permitiu criar toda a estrutura de etiquetas utilizada ao longo do programa gráfico. A Figura 111 ilustra a organização adoptada neste caso particular.

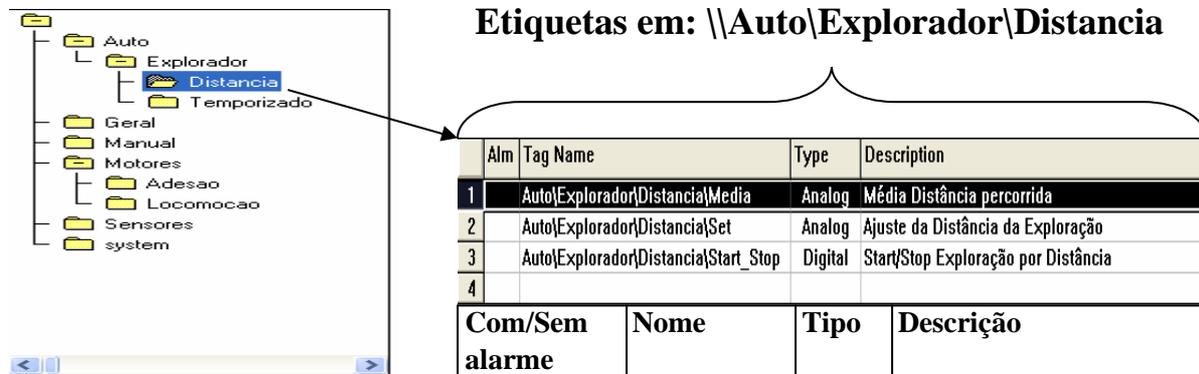


Figura 111 Estrutura de pastas e etiquetas criada na base de dados das etiquetas

A base de dados está organizada segundo numa árvore de pastas, sendo possível adicionar mais pastas ou etiquetas em cada pasta. Na Figura 111 apresenta-se, a título de exemplo, as etiquetas na pasta “Distancia”, que se encontra dentro da pasta “Explorador” que, por sua vez, se encontra dentro da pasta “Auto”. Com esta possibilidade organizativa, é possível criar as etiquetas em pastas cujo nome tem a ver com a funcionalidade das etiquetas nos gráficos/*displays* HMI onde vão ser utilizadas. Assim, a pasta “Auto” tem todas as etiquetas associadas à utilização em modo automático do robô. As restantes pastas assumem uma lógica de criação e utilização igual.

Os gráficos/*displays* HMI também são criados, e são acessíveis, a partir da janela de projecto, através da selecção do caminho *Display*, que se encontra na pasta *Graphics* (Figura 112).

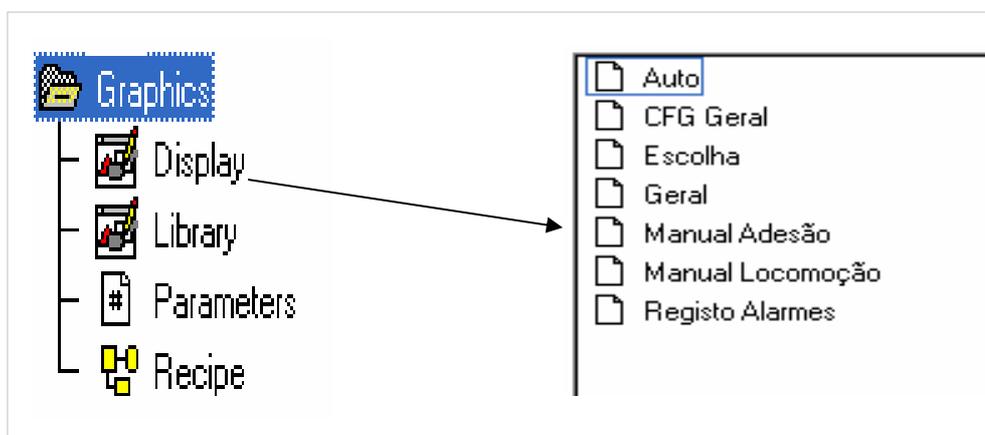


Figura 112 Os gráficos HMI criados na pasta “Graphics/Display”

Na realização deste projecto foram criados, e programados com as etiquetas anteriormente criadas, sete gráficos, cuja função geral está associada ao controlo remoto do robô trepador. A característica de cada gráfico e sua função particular é descrita a seguir.

- O gráfico/*display* “Geral”, que é o ecrã de apresentação do HMI, é apresentado na Figura 113.

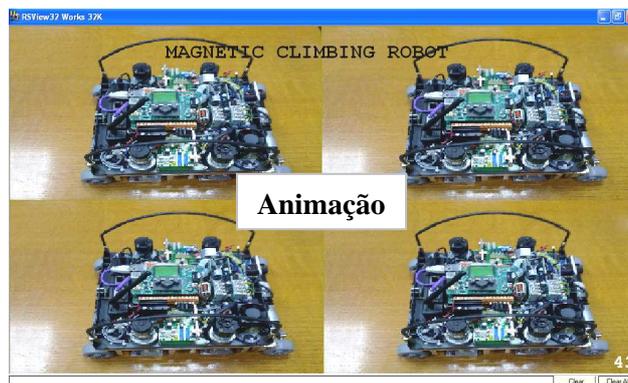


Figura 113 Gráfico/*Display* HMI “Geral”

- O gráfico/*display* “Escolha”, que é a “porta de entrada” para os restantes gráficos/*displays*, é mostrado na Figura 114.



Figura 114 Gráfico/*Display* HMI “Escolha”

- O gráfico/*display* “Registo Alarmes” permite visualizar a lista de alarmes activos e o registo de ocorrência, além de permitir actuar sobre o seu reconhecimento, activação ou desactivação (Figura 115).



Figura 115 Gráfico/Display HMI “Registo Alarmes”

- O gráfico/display “Auto” é responsável pelo controlo remoto da capacidade de exploração do meio envolvente, em modo automático. A Figura 116 apresenta este gráfico, com a sua descrição.

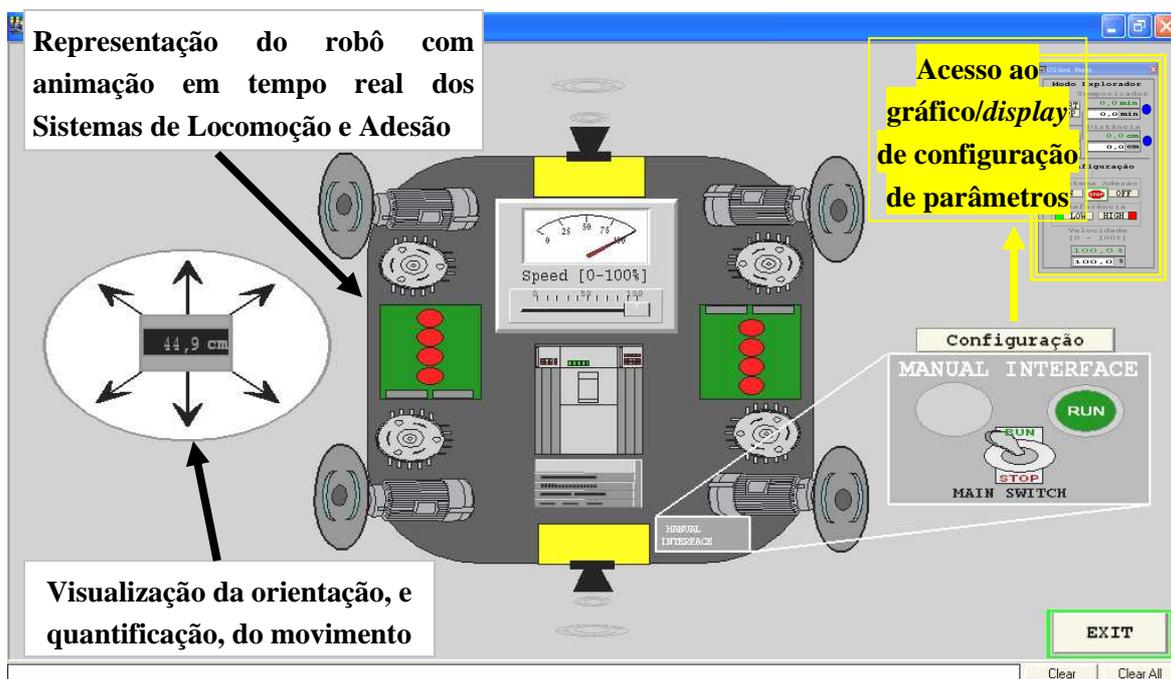


Figura 116 Gráfico/Display HMI “Auto”

- O gráfico/display “CFG Geral” é utilizado para configurar alguns parâmetros relacionados com a forma de funcionamento do robô (Figura 117).

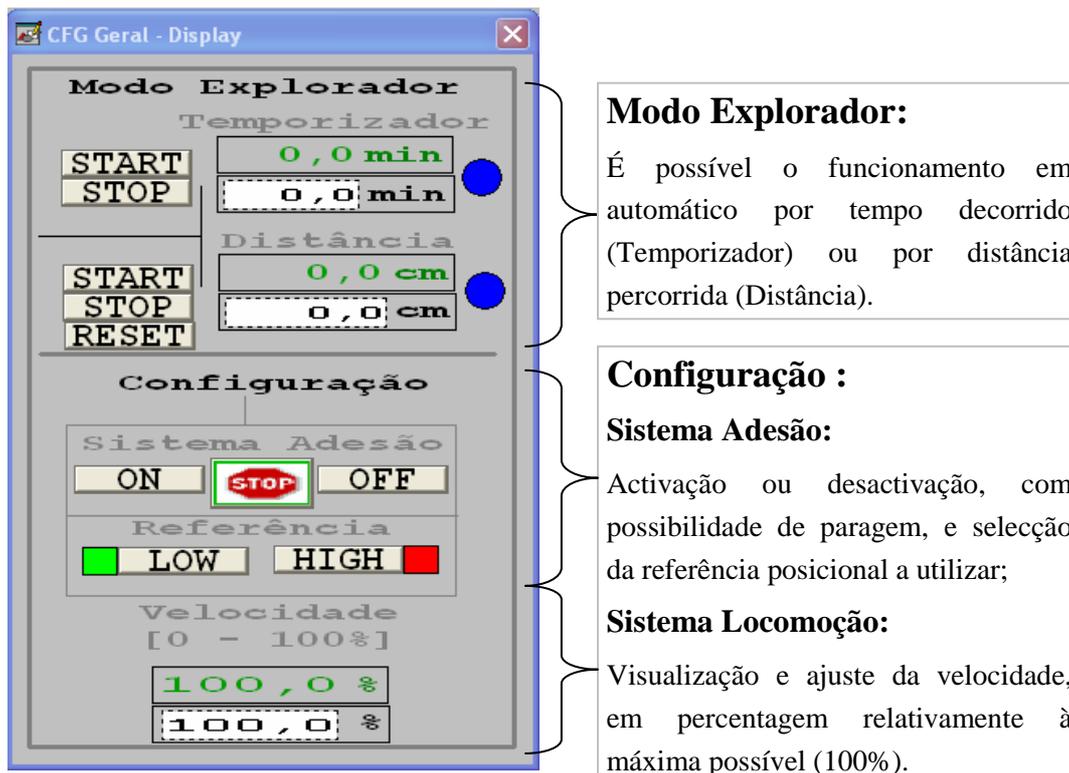


Figura 117 Gráfico/Display HMI “CFG Geral”

- O gráfico/display “Manual Adesão” permite operar manualmente as várias funcionalidades do robô trepador que integram o sistema de adesão (Figura 118).

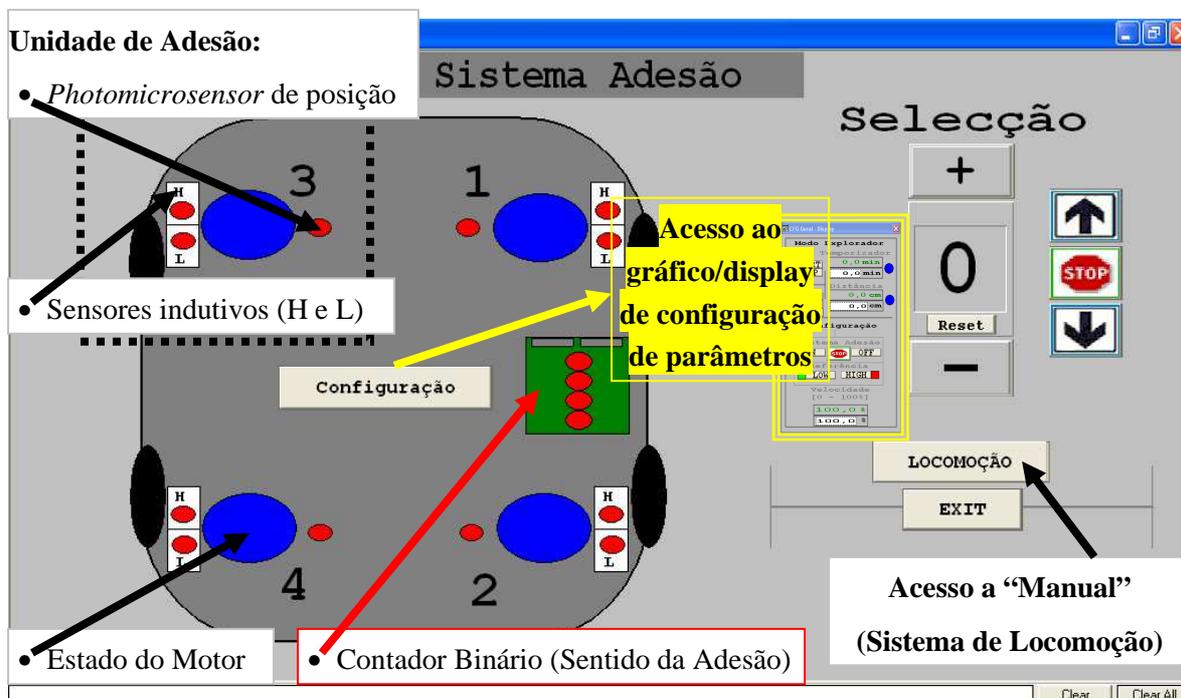


Figura 118 Gráfico/Display HMI “Manual Adesão”

É importante descrever, com pormenor, a possibilidade de operação manual de cada unidade de adesão, em ambos os sentidos e de forma independente. Esta possibilidade é permitida pelas teclas associadas ao submenu “Seleção”, que se encontra representado na Figura 119.

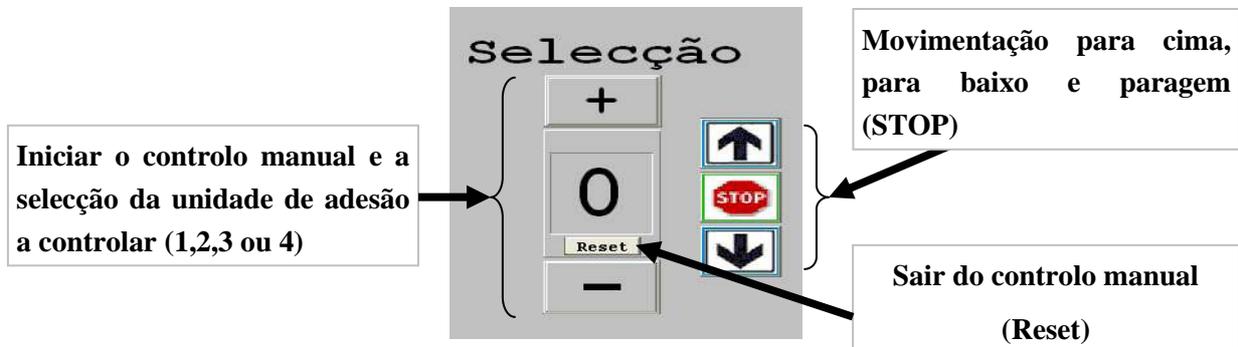


Figura 119 Pormenor do comando individual das unidades de adesão no Gráfico/Display HMI “Manual Adesão”

- O gráfico/display “Manual Locomoção”, apresentado na Figura 120, permite operar manualmente as várias funcionalidades do robô trepador que fazem parte do sistema de locomoção.

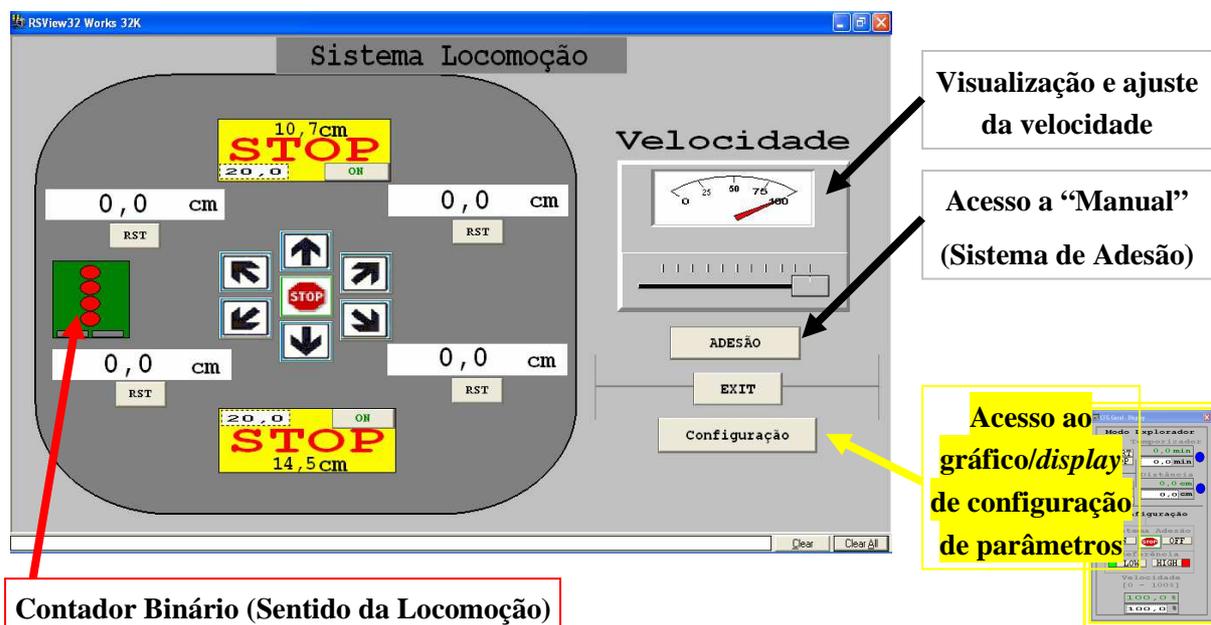


Figura 120 Gráfico/Display HMI “Manual Locomoção”

Também neste caso é importante descrever, com algum pormenor, a possibilidade de controlo manual do movimento de locomoção, em todas as direcções e sentidos. Esta possibilidade é permitida pelas teclas de direcção, que podem ser observadas na Figura 121.



Figura 121 Pormenor das teclas de controlo da direcção da locomoção no Gráfico/Display HMI “Manual Locomoção”

Para auxiliar o controlo remoto manual da locomoção, é indicado no gráfico/display “Manual Locomoção” a distância percorrida (em centímetros) por cada motor do Sistema de Locomoção, permitindo identificar assimetrias no movimento. Também existe a indicação da distância (em centímetros) a que se encontra qualquer obstáculo que surja nas partes frontal ou traseira do robô. Quando o obstáculo fica dentro da distância pré-definida para imobilização do robô, este pára, excepto se esta opção for desactivada. A Figura 122 apresenta e descreve estes sistemas auxiliares da condução manual do robô trepador.

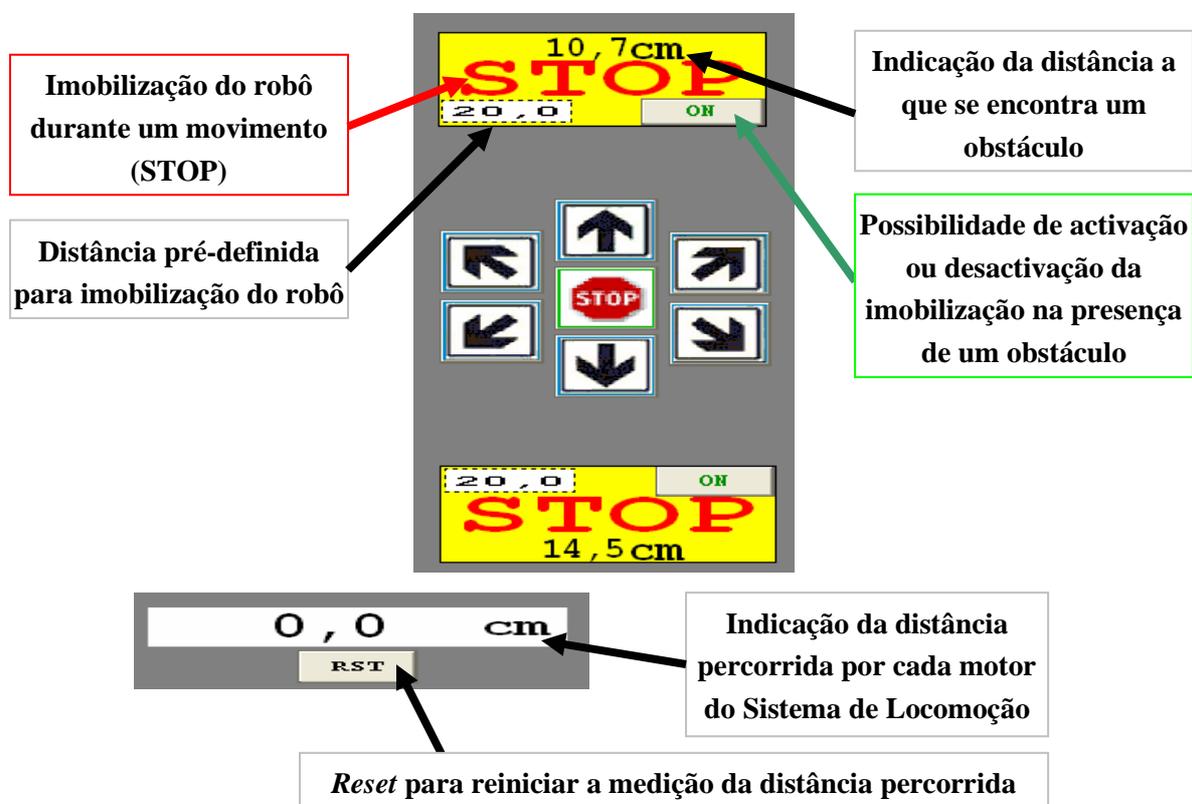


Figura 122 Pormenor dos “equipamentos” auxiliares à condução manual do robô no Gráfico/Display HMI “Manual Locomoção”

Assim, com todos estes gráficos/*displays* disponibilizados pelo sistema de supervisão remota do robô (o seu HMI), é possível a um operador ter acesso a informação sobre todos os equipamentos colocados a bordo, que permitem uma monitorização interna e externa ao sistema móvel, e comandar de uma forma controlada as diversas funcionalidades disponíveis.

Finalizada esta fase, o robô trepador (visto como um protótipo) está concluído, cumprindo os requisitos mínimos necessários para executar as tarefas para as quais foi desenvolvido. No entanto, o sucesso da sua adequação às tarefas para as quais foi projectado, ainda é relativamente incerto. A partir deste ponto será necessário empreender um conjunto de testes e ensaios exaustivos, em vários cenários com distintos graus de exigência (vários tipos de superfícies verticais, com várias inclinações), para se determinar o grau de eficiência e de estabilidade do protótipo. Será com base na interpretação dos resultados obtidos nesta necessária fase de testes, que será possível implementar alterações no protótipo que permitam a sua adequação às acções pretendidas, isto é, uma maior eficácia na realização das tarefas para as quais foi orientado, independentemente das características da superfície, e uma elevada estabilidade funcional. Caso não seja possível atingir um resultado operacional excelente, torna-se necessário, pelo menos, identificar os limites técnicos associados ao protótipo, com o propósito de adequar a sua utilização às suas limitações técnicas.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Considerando a severidade de muitos ambientes onde existe a necessidade de trabalho humano, a exploração de robôs trepadores nessas aplicações tem, sem dúvida, uma ampla perspectiva. As principais aplicações previstas para estas máquinas vão desde a limpeza à inspeção de construções de difícil acesso.

Até à data, já foi dedicada uma investigação considerável a estas máquinas e mais de 200 protótipos destinados a estas aplicações foram desenvolvidas no mundo até o ano de 2006, e muitos outros até este momento. No entanto, a aplicação de robôs trepadores ainda é limitada. Para além de um pequeno conjunto de produtos industrializados bem sucedidos (sendo a medida de sucesso relativa), a maioria são apenas protótipos e poucos deles podem ser encontrados em utilização normal, devido ao seu desempenho algo insatisfatório aquando de testes no local de aplicação.

Para fazer dos robôs trepadores um substituto popular do trabalho manual, são pré-requisitos indispensáveis uma alta confiabilidade e elevada eficiência e, por outro lado, a preços acessíveis (Schraft, *et al.*, 2003; Rosa e Sinatra, 2003; Warren, 2003). O cumprimento destas exigências ainda está longe, o que indica que ainda há um longo caminho de desenvolvimento e de melhoria a percorrer (Armada e Gonzales de Santos, 2001; Warren, 2002; Virk, 2003; Semerano, *et al.*, 2003).

Dadas estas considerações, este trabalho apresentou várias aplicações possíveis de robôs trepadores. Foi também efectuado um levantamento de vários robôs trepadores, adoptando diferentes tecnologias para a sua locomoção e para a adesão às superfícies. Por último, foram abordadas as novas tecnologias, principalmente de inspiração biológica, que estão actualmente a ser desenvolvidas para a adesão destes robôs às superfícies em que se devem movimentar.

O robô trepador objecto principal desta Tese de Mestrado, cujo desenvolvimento se descreveu, foi alvo de um estudo inicial que incidiu na melhor forma de implementar a componente mecânica, fundamental para o seu sucesso operacional. Esta teria que ser estruturalmente rígida, e o total das folgas mecânicas teria que ser inferior à precisão pedida às Unidades de Adesão, nomeadamente para um controlo da distância dos ímanes à superfície de locomoção na ordem de 1 mm, ou menos. Assim, foi adoptada uma base em material leve mas, estruturalmente com baixa deformação (em PVC com 8 mm de espessura), reforçada com a orientação topo a topo utilizada para a montagem das Unidades de Adesão/Locomoção (maquinadas com precisão) sobre esta base. Com isto conseguiu-se uma baixa deformação desta estrutura face às forças magnéticas geradas em direcção à superfície de locomoção. No entanto, apesar desta cuidada implementação técnica, surgiu um problema associado a uma pequena folga nos veios dos motores de locomoção. Esta, relativamente à precisão pretendida para a adesão controlada, é algo crítica e provoca alguns problemas durante o movimento do robô, nomeadamente a possibilidade de contacto dos ímanes permanentes com a superfície ferromagnética. Assim, como forma de ultrapassar esta situação, é necessário adoptar um critério de controlo muito rigoroso para a manutenção da distância dos ímanes à superfície, trabalhando com distâncias ligeiramente superiores às idealmente possíveis e diminuindo ao mínimo o tempo de resposta da Unidade de Adesão face às solicitações do sistema.

Durante os ensaios em superfícies verticais, foram detectados dois problemas importantes para um movimento bem sucedido do robô em qualquer direcção pretendida, e cuja resolução

apresenta um elevado grau de dificuldade. O primeiro está intrinsecamente associado ao peso final do protótipo (de aproximadamente 3,5 kg), o que obrigou à utilização de ímanes permanentes de aproximadamente 16 kgf de força gerada em contacto directo com a superfície, e uma curva de força vs. distância inversamente proporcional à distância, de forma logarítmica. Estes, em certas condições de aproximação à superfície, provocam a sua deformação em direcção à fonte da força gerada, proporcionando em muitos momentos um contacto directo indesejado, face ao atrito criado. O segundo problema detectado é bastante limitador de um movimento regular do protótipo, porque está relacionado com a capacidade de aderência das rodas à superfície de locomoção, quando esta apresenta pouca rugosidade (apresentando mesmo um aspecto polido). Nesta circunstância, face à relação do peso do protótipo, compensado pela adesão conseguida, com a aderência das rodas à superfície de locomoção (relação directa, em que mais peso implica uma maior aderência), o robô poderá ter bastante dificuldade em se movimentar verticalmente. Para minimizar estes problemas é necessário ensaiar várias alterações sobre as rodas (utilização de outro tipo de borracha, tornar a sua superfície mais rugosa, etc.), para aumentar a sua aderência e, tal como já foi afirmado anteriormente, adoptar um critério de controlo muito rigoroso para a manutenção da distância dos ímanes à superfície, de forma a controlar os efeitos da deformação estrutural da superfície. É, no entanto, necessário ter em consideração que qualquer acção sobre as rodas para alterar a capacidade de aderência poderá ter reflexos na manobrabilidade, pois o robô possui quatro rodas fixas e muda de direcção através da rotação oposta em lados opostos.

Também poderá ser útil ensaiar a utilização de ímanes mais “potentes”, o que parecendo uma contradição com o que já foi dito anteriormente, permitiria trabalhar com as Unidades de Adesão a uma distância superior em relação à superfície de locomoção, desenvolvendo uma força igual, ou até mesmo superior. Nesta situação, em caso de deformação, a possibilidade de contacto seria menor e a aderência poderia sofrer uma melhoria devido a um maior “esmagamento” das rodas contra a superfície.

No âmbito dos ajustes mecânicos a efectuar no protótipo, é necessário dedicar uma atenção especial ao ajuste dos ímanes rotativos (montados em paralelo com as rodas de locomoção), dos sensores indutivos de controlo da adesão e dos *photomicrosensors* de detecção da posição vertical do Sistema de Adesão. Os ímanes rotativos têm que ser ajustados de maneira a não impedirem o contacto total das rodas em borracha com a superfície (inclusive com uma ligeira deformação), para se obter a aderência máxima possibilitada pelos materiais em contacto. Os

sensores indutivos têm que ser ajustados um em relação ao outro, e ambos em relação ao íman, para cumprirem com o processo de ajuste programado para a Unidade de Adesão. Os *phantom sensors*, como são uma garantia para evitar danos estruturais na Unidade de Adesão, têm que ser afinados posicionalmente para evitar que o veio rotativo da unidade desloque a estrutura acoplado para fora dos limites da zona de segurança mecânica.

A componente eléctrica/electrónica utilizou um misto de equipamentos comerciais, como são o caso do PLC e das placas de expansão, e outros desenvolvidos integralmente pelo aluno (desde o desenho eléctrico até a execução das PCI e montagem electrónica), como são as fontes de alimentação e os circuitos lógicos/digitais. Toda a parte sensorial foi também seleccionada face à aplicação pretendida, e adquirida comercialmente. Aqui, surgiram dois grandes problemas. O primeiro tem a ver com as prestações dos sonares. Contrariamente à especificação, estes apresentam uma fraca abertura e uma baixa selectividade na detecção de obstáculos, não detectando os que se apresentam mais afastados do centro ou os de tamanho mais pequeno. O outro problema está associado à concepção adoptada para o comando dos motores, inclusive os do Sistema de Adesão. Devido a condicionantes limitativas associadas ao número de E/S disponibilizadas pelo PLC e expansões, foi adoptada uma implementação série no controlo do sentido de rotação dos motores, por oposição à alternativa mais comum (em paralelo). Com isso, foram racionalizadas as saídas utilizadas, mas sacrificou-se a velocidade de resposta e a simplicidade do controlo. Na situação particular da velocidade de resposta, esta poderá apresentar alguns impedimentos para se conseguir um critério de controlo o mais eficaz possível, para uma optimização da distância dos ímanes à superfície de locomoção, face às tolerâncias intrínsecas à própria mecânica e motores que foram utilizados.

A programação do PLC teve em consideração os requisitos funcionais definidos inicialmente para o robô trepador, os quais são acessíveis de uma forma mais amigável através do HMI. No entanto, surgiu um problema que está directamente associado ao número de contadores rápidos disponibilizados por este modelo de PLC (só um contador). Como existem quatro *encoders* (ligados a contadores comuns), que à rotação máxima do motor associado geram impulsos a uma frequência na ordem dos 338,6 Hz (≈ 1 impulso a cada 3 ms), e considerando o tempo de ciclo do programa do PLC (que é da ordem dos 10 ms), ocorre a perda de alguns impulsos em cada rotação do *gearmotor*. Logo, o valor da distância percorrida não pode ser obtido directamente dos *encoders*, sendo, em alternativa, calculado a partir da relação directa entre o número de impulsos detectados pelo PLC para uma unidade do comprimento. Como

existem algumas pequenas flutuações nos tempos de ciclo do PLC, é assim introduzido um pequeno erro no cálculo da distância percorrida com o recurso ao processo indicado anteriormente. A solução passaria pela implementação de quatro contadores em tempo real, que posteriormente forneceriam os valores obtidos ao PLC através, por exemplo, da comunicação série disponível.

A partir da análise geral dos resultados obtidos, pode-se concluir que estes foram bastante positivos, uma vez que a abordagem adoptada para o posicionamento dinâmico dos ímanes permanentes sobre a superfície de locomoção, é bastante prometedora em termos de resultados. No entanto, é necessária atenção especial ao peso final do robô, pois poderá colocar em risco a sua capacidade de aderência à superfície e originar a sua deformação por excesso de força de adesão para sustentação. Um outro aspecto a melhorar será a forma como é executada a mudança de direcção. Esta deveria estar menos dependente das características de atrito da superfície, pois isto cria um problema de equilíbrio relativamente à aderência. O ideal era o Sistema de Locomoção ter roda(s) direccionais.

Concluindo, uma possível miniturização de todo o protótipo, com uma redução substancial do seu peso (sem perder a oferta técnica em processamento e comunicações), associada a algumas pequenas modificações, nomeadamente no processo de mudança de direcção, permitiria obter um robô trepador de elevada mobilidade em qualquer estrutura ferromagnética e uma boa segurança anti-queda, proporcionando uma excelente eficiência para a execução dos trabalhos pretendidos.

As perspectivas de desenvolvimentos futuros neste protótipo são bastante animadoras, porque existe um espaço de manobra bastante amplo e simplificado. Ao nível da estrutura mecânica é perfeitamente possível implementar e ensaiar novos sistemas, pois a plataforma estrutural é bastante flexível. Ao nível da programação, torna-se possível com muita facilidade ensaiar novos algoritmos e esquemas de controlo dos sistemas de adesão e de locomoção. A utilização de um PLC do tipo industrial permite dispor de um conjunto de ferramentas desenvolvidas para uma utilização simples e eficiente, mesmo em cenários complexos. A utilização de uma rede de comunicação do tipo Ethernet permite integrar uma série de equipamentos de terceiros, quer vocacionados para o desenvolvimento do próprio protótipo, quer outros (instrumentos de precisão), para tornar possível a inspecção contratada ao robô trepador, além de permitir a integração do robô em infra-estruturas de comunicação mais globais, como é a Internet. É, assim, perfeitamente possível controlar este robô à distância, a

partir de qualquer parte do mundo através da rede pública mundial (a Internet) utilizando, por exemplo, uma ligação do tipo *Virtual Private Network* (VPN).

Referências Documentais

- AKINFIEV, T. e ARMADA, M. (2001). On the optimal location of a magnet gripper for a climbing robot, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), *Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing, pp. 877–882.
- ALEXANDER, R. M. (2005). Problems of scale for walking and climbing animals, in M. A. Armada and P. G. de Santos (eds), *Climbing and Walking Robots*, Springer, pp. 47–54.
- ALEXANDER, R., WHITE, T. S., CALLOW, G., GOUGH, D. e ANDERSON, J. (2003). A mobile climbing robot for high-precision manufacture and inspection of aero-structures, in G. Muscato and D. Longo (eds), *Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 777–784.
- ARMADA, M. (2003). The role of CLAWAR in education, training, working conditions and safety, in G. Muscato and D. Longo (eds), *Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1049–1055.
- ARMADA, M. A., DE SANTOS, P. G., GARCÍA, E., PRIETO, M. e NABULSI, S. (2005). Design of mobile robots, *Proceedings of the 2005 CLAWAR: Introductory Mobile Robotics Workshop*, London, UK, pp. 2890–2895.
- ARMADA, M. e GONZALES DE SANTOS, P. (2001). Perspectives of climbing and walking robots for the construction industry, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), *Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing, pp. 929–936.
- ARMADA, M., GONZALES DE SANTOS, P. e PRIETO, M. (2002). Climbing and walking robots for the petrochemical industry and for underwater applications, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), *Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 939–945.
- ASBECK, A. T., KIM, S., MCCLUNG, A., PARNES, A. e CUTKOSKY, M. R. (2006). Climbing walls with microspines, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, USA, pp. 4315–4317.
- AZAIZ, R. (2008). Unifier unified robotic system to service solar power plants, in L. Marques, A. de Almeida, M. O. Tokhi and G. S. Virk (eds), *Advances in Mobile Robotics*, World Scientific, pp. 1141–1145.

- BACKES, P. G., BAR-COHEN, Y. e JOFFE, B. (1997). The multifunctional automated crawling system (macs), Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 335–340.
- BALAGUER, C., GIMENEZ, A. E JARDON, A. (2005). Climbing robots mobility for inspection and maintenance of 3d complex environments, *Autonomous Robots* 18(2): 157–169.
- BELL, M. e BALKCOM, D. (2006). A toy climbing robot, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA, pp. 4366–4368.
- BERNS, K., BRAUN, T., HILLENBRAND, C. E LUKSCH, T. (2005). Developing climbing robots for education, in M. A. Armada and P. G. de Santos (eds), *Climbing and Walking Robots*, Springer, pp. 981–988.
- BERNS, K., e HILLENBRAND, C. (2004). A climbing robot based on under pressure adhesion for the inspection of concrete walls, Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics, Paris, France.
- BERNS, K., HILLENBRAND, C. E LUKSCH, T. (2003). Climbing robots for commercial applications – a survey, in G. Muscato and D. Longo (eds), *Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 771–776.
- BOZZETTI, D., CHIGNOLI, F., COLA, T., D’ALESSIO, E. e GORI, M. (2003). Robotized system for visual inspection inside boiler chambers and no-contact thickness evaluation of waterwall tubes in the steam generators of thermoelectric plants, in G. Muscato and D. Longo (eds), *Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 753–760.
- BROCKMANN, W. (2006). Concept for energy-autarkic, autonomous climbing robots, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), *Climbing and Walking Robots*, Springer, pp. 107–114.
- CACOPARDO, G., LONGO, D. e MUSCATO, G. (2003). Design of the Alicia³ robot – a modular approach, in G. Muscato and D. Longo (eds), *Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 801–808.
- CEPOLINA, F., ZOPPI, M., ZURLO, G. e MOLFINO, R. (2004). A robotic cleaning agency, Proceedings Of IAS’2004 – 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1153 – 1161.
- CHEN, H., SHENG, W., XI, N. e TAN, J. (2005). Motion control of a micro biped robot for nondestructive structure inspection, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 480–485.
- CHEN, S., SHANG, J., ZHAO, Z., SATTAR, T. E BRIDGE, B. (2006). Novel solutions to design problems of industrial climbing robots, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), *Climbing and Walking Robots*, Springer, pp. 139–146.

- CHOI, H. R., RYEW, S. M., KANG, T. H., LEE, J. H. e KIM, H. M. (2000). A wall climbing robot with closed link mechanism, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2006 – 2011.
- DABROWSKI, T., FEJA, K. e GRANOSIK, G. (2001). Biologically inspired control strategy of pneumatically driven walking robot, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 687–694.
- DALTORIO, K. A., GORB, S., PERESSADKO, A., HORCHLER, A. D., RITZMANN, R. E. e QUINN, R. D. (2006). A robot that climbs walls using micro-structured polymer feet, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), Climbing and Walking Robots, Springer, pp. 131–138.
- DALTORIO, K. A., HORCHLER, A. D., GORB, S., RITZMANN, R. E. e QUINN, R. D. (2005). A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intel. Robots and Systems, pp. 4018–4023.
- DALTORIO, K. A., WEI, T. E., GORB, S. N., RITZMANN, R. E. e QUINN, R. D. (2007). Passive foot design and contact area analysis for climbing mini-whegs, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, pp. 1274–1279.
- DEGANI, A., SHAPIRO, A., CHOSSET, H. e MASON, M. T. (2007). A dynamic single actuator vertical climbing robot, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 2901–2906.
- DERRICHE, O. e KOUISS, K. (2002). A cleaning robot for spherical buildings, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 993–1001.
- DOBROCYŃSKI, D., DUTKIEWICZ, P., HERMAN, P. e WRÓBLEWSKI, W. (2001). A climbing robot ‘SAFARI’ for building inspection, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 937–943.
- ELKMANN, N., FELSCH, T., SACK, M., SAENZ, J. E HORTIG, J. (2002). Innovative service robot systems for facade cleaning of difficult-to-access areas, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 756 – 762.
- ELLIOT, M., MORRIS, W. e XIAO, J. (2006). City-climber: A new generation of wall-climbing robots, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA, pp. 4413–4415.
- FERNÁNDEZ, R., AKINFIEV, T. e ARMADA, M. (2002). Control algorithms for an underwater climbing robot, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 985–992.

FERREIRA, A. E FONTAINE, J.-G. (2002). Modelling-based control of an in-pipe micro-machine with pin-type ultrasonic actuators, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 651–658.

FISCHER, W., TACHE, F. e SIEGWART, R. (2007). Inspection system for very thin and fragile surfaces, based on a pair of wall climbing robots with magnetic wheels, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 1216–1221.

FRAUNHOFER IFF (2010). Fraunhofer IFF – SIRIUSc Facade Cleaning Robot, http://www.iff.fraunhofer.de/en/iffdben/Produkt_detail.php?ProduktId=20. Último acesso em 7 de Janeiro de 2010.

FU, Z., ZHAO, Y.-Z., QIAN, Z.-Y. e CAO, Q.-X. (2006). Wall-climbing robot path planning for testing cylindrical oilcan weld based on Voronoi diagram, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2749 – 2753.

FUJIKI, N., MAE, Y., UMETANI, T., ARAI, T., TAKUBO, T. e INOUE, K. (2005). Limb-mechanism robot with winch mechanism, in M. A. Armada and P. G. de Santos (eds), Climbing and Walking Robots, Springer, pp. 305–312.

GAO, X. e KIKUCHI, K. (2004). Study on a kind of wall cleaning robot, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2004.

GIMENEZ, A., ABDERRAHIM, M. e BALAGUER, C. (2001). Lessons from the ROMA I inspection robot development experience, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 913–920.

GRADETSKY, V., SOLOVTSOV, V., KNIAZKOV, M., RIZZOTO, G. G. e AMATO, P. (2003). Modular design of electro-magnetic mechatronic microrobots, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 651–658.

GRADETSKY, V., VESHNIKOV, V., KRAVCHUK, L., KALINICHENKO, S., KNIAZKOV, M. e SOLOVTSOV, V. (2002). Miniature robot control motion inside of tubes, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 643–650.

HERTZBERG, J., CHRISTALLER, T., KIRCHNER, F., LICHT, U. e ROME, E. (1998). Sewer Robotics. Proceedings of the 5th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior; pp. 427 – 436.

HIROSE, S. e ARIKAWA, K. (2000). Coupled and decoupled actuation of robotic mechanisms, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, California, USA, pp. 33–39.

- HIROSE, S., NAGAKUBO, A. E TOYAMA, R. (1991). Machine that can walk and climb on floors, walls and ceilings, Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Robotics, Pisa, Italy, pp. 753–758.
- HOSOKAI, H. e HARA, F. (2001). Manoeuvrability passing over obstacles on a pipeline by a pipeline inspection, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 883–889.
- INOUE, K., TSURUTANI, T., TAKUBO, T. e ARAI, T. (2006). Omni-directional gait of limb mechanism robot hanging from grid-like structure, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intel. Robots and Systems, Beijing, China, pp. 1732–1737.
- JATSUN, S., ZAHAROV, I. e DISHENKO, S. (2003). Two-section climbing robot, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 817–823.
- JATSUN, S., ZAHAROV, I. E JATSUN, S. (2002). Interaction of a moving climbing robot with obstacles, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 979–984.
- KALRA, L. P. e GU, J. (2006). An autonomous self contained wall climbing robot for nondestructive inspection of above-ground storage tanks, Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots, Brussels, Belgium, pp. 183–188.
- KANEKO, M., MIZUNO, A. E HARADA, K. (2002). Torque Distribution for Achieving a Hugging Walk. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; pp. 2613 – 2618.
- KANG, T., KIM, H., SON, T. e CHOI, H. (2003). Design of quadruped walking and climbing robot, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 619 – 624.
- KENNEDY, B., OKON, A., AGHAZARIAN, H., BADESCU, M., BAO, X., BAR-COHEN, Y., CHANG, Z., DABIRI, B. E., GARRETT, M., MAGNONE, L. e SHERRIT, S. (2006). Lemur iib: a robotic system for steep terrain access, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), Climbing and Walking Robots, Springer, pp. 1077–1084.
- KOZLOWSKI, K., DUTKIEWICZ, P., LAWNICZAK, M., MICHALSKI, M. e MICHALEK, M. (2002). Measurement and control system of the climbing robot SAFARI, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1003–1012.
- KROSURI, S. P. e MINOR, M. A. (2003). A multifunctional hybrid hip joint for improved adaptability in miniature climbing robots, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan.

- LI, Y., TIAN LI, M. E NING SUN, L. (2007). Design and passable ability of transitions analysis of a six legged wall-climbing robot, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, pp. 800–804.
- LINDER, S. P., WEI, E. e CLAY, A. (2005). Robotic rock climbing using computer vision and force feedback, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 4696–4701.
- LIU, R., ZONG, G., ZHANG, H. e LI, X. (2003). A cleaning robot for construction out-wall with complicated curve surface, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 825–832.
- LONGO, D. e MUSCATO, G. (2002). Design of a climbing robot for wall exploration – a neural network approach for pressure control onboard the Alicia II prototype, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1021–1028.
- LONGO, D. e MUSCATO, G. (2003). CLAWAR WP3 applications – edutainment and service robots, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1033–1042.
- LONGO, D. e MUSCATO, G. (2004^a). Design of a single sliding suction cup robot for inspection of non porous vertical wall, Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics, Paris, France.
- LONGO, D. e MUSCATO, G. (2004^b). A modular approach for the design of the alicia³ climbing robot for industrial inspection, *Industrial Robot: An International Journal* 31(2): 148–158.
- LONGO, D. e MUSCATO, G. (2008). Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental considerations, in L. Marques, A. de Almeida, M. O. Tokhi and G. S. Virk (eds), *Advances in Mobile Robotics*, World Scientific, pp. 6–28.
- MENON, C. e SITTI, M. (2005). Biologically inspired adhesion based surface climbing robots, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 2726–2731.
- MENON, C., MURPHY, M. e SITTI, M. (2004). Gecko inspired surface climbing robots, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 2004.
- MINOR, M., DULIMARTA, H., DANGHI, G., MUKHERJEE, R., TUMMALA, R. L. e ASLAM, D. (2000). Design, implementation, and evaluation of an under-actuated miniature biped climbing robot, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1999–2005.

- MONDAL, S., SATTAR, T. P. e BRIDGE, B. (2002). TOFD inspection of V-groove butt welds on the hull of a container ship with a magnetically adhering wall climbing robot, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), *Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 955–961.
- MONTES, H., NABULSI, S. e ARMADA, M. (2005). Design and implementation of force sensor for ROBOCLIMBER, in M. A. Armada and P. G. de Santos (eds), *Climbing and Walking Robots*, Springer, pp. 219–227.
- MURPHY, M. P., TSO, W., TANZINI, M. e SITTI, M. (2006). Waalbot: An agile small-scale wall climbing robot utilizing pressure sensitive adhesives, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intel. Robots and Systems*, Beijing, China, pp. 3411–3416.
- MYERS, D. (2001). Pipe and duct applications for CLAWAR machines, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), *Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing, pp. 1045–1052.
- NARDELLI, M., JARDÓN HUETE, A., STAROVEROV, P., GIMÉNEZ FERNÁNDEZ, A. e BALAGUER BERNALDO DE QUIRÓS, C. (2003). System identification and control of the climbing robot ROMA II, in G. Muscato and D. Longo (eds), *Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 809–816.
- NISHI, A. (1991). A wall climbing robot using propulsive force of propeller, *Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Robotics*, Pisa, Italy, pp. 320–325.
- PACK, R. T., CHRISTOPHER JR., J. L. e KAWAMURA, K. (1997). A rubbertuator-based structure-climbing inspection robot, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 1869–1874.
- PARK, S., JEONG, H. D. e LIM, Z. S. (2003). Design of a mobile robot system for automatic integrity evaluation of large size reservoirs and pipelines in industrial fields, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 2618–2623.
- PRIETO, M., UQUILLAS, M. e ARMADA, M. (2001). Compliance torque control of a multi-legged climbing robot, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), *Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing, pp. 891–898.
- RACHKOV, M., MARQUES, L. e ALMEIDA, A. T. de (2002). Climbing robots for porous and rough surfaces, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), *Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1013–1020.
- REINFELD, D. e ILLINGWORTH, L. (2002). VORTEX GENERATOR – patent:EP1224396, <http://www.freepatentsonline.com/EP1224396A1.html>. Último acesso em 7 de Janeiro de 2010.

RESINO, J. C., JARDN, A., GIMENEZ, A. E BALAGUER, C. (2006). Analysis of the direct and inverse kinematics of roma ii robot, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), Climbing and Walking Robots, Springer, pp. 869–874.

ROBOSOFT (2010). Glass roof cleaning – customised automatic glass-roof cleaning robots, http://www.robosoft.com/eng/sous_categorie.php?id=1017. Último acesso em 7 de Janeiro de 2010.

RODRIGUEZ, H. L., BRIDGE, B. e SATTAR, T. P. (2008). Climbing ring robot for inspection of offshore wind turbines, in L. Marques, A. de Almeida, M. O. Tokhi and G. S. Virk (eds), Advances in Mobile Robotics, World Scientific, pp. 555–562.

ROSA, G. La e SINATRA, R. (2003). Design of an end-effector of a climbing robot for vertical surfaces, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 793–800.

SÁNCHEZ, J., VÁZQUEZ, F. e PAZ, E. (2006). Machine vision guidance system for a modular climbing robot used in shipbuilding, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), Climbing and Walking Robots, Springer, pp. 893–900.

SATTAR, T. P., BRIDGE, B., CHEN, S. E ZHAO, Z. (2003). Development of CLAWAR systems that combine the tasks of monitoring, mobility, manipulation, and measurement for industrial inspection tasks, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 699–706.

SATTAR, T. P., RODRIGUEZ, H. E. L. e SHANG, J. (2008). Amphibious inspection robot, in L. Marques, A. de Almeida, M. O. Tokhi and G. S. Virk (eds), Advances in Mobile Robotics, World Scientific, pp. 613–620.

SATTAR, T. P., RODRIGUEZ, H. E. L., SHANG, J. e BRIDGE, B. (2006). Automated NDT of floating production storage oil tanks with a swimming and climbing robot, in M. O. Tokhi, G. S. Virk and M. A. Hossain (eds), Climbing and Walking Robots, Springer, pp. 935–942.

SATTAR, T. P., ZHAO, Z., FENG, J., BRIDGE, B., MONDAL, S. e CHEN, S. (2002). Internal in-service inspection of the floor and walls of oil, petroleum, and chemical storage tanks with a mobile robot, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 947–954.

SAVALL, J., AVELLO, A. e BRIONES, L. (1999). Two compact robots for remote inspection of hazardous areas in nuclear power plants, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics And Automation, Detroit, Michigan, USA, pp. 1993–1998.

SCHRAFT, R. D., SIMONS, F., SCHÄFER, T., KEIL, W. E ANDERSON, S. (2003). Concept of a low-cost, window-cleaning robot, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 785–792.

- SHENG, W., CHEN, H., CHEN, H. e XI, N. (2005). Optimal planning of a mobile sensor for aircraft rivet inspection, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 3192–3197.
- SHORES, B. E. e MINOR, M. A. (2005). Design, kinematic analysis, and quasi-steady control of a morphic rolling disk biped climbing robot, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 2732–2737.
- SRI INTERNATIONAL (2010). Electroadhesive robots – enabling wall-climbing robots for security/military, inspection, and service applications, <http://www.sri.com/rd/electroadhesion.html>. Último acesso em 7 de Janeiro de 2010.
- SUPERMAGNETE (2010). Supermagnete – FTN-25 Gancho magnético 16 kg Força magnética, <http://www.supermagnete.de/por/FTN-25>. Último acesso em 7 de Janeiro de 2010.
- SUN, L., LU, L., QIN, X. e GONG, Z. (2003). Micro robot for detecting wall cracks of pipe, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 643–650.
- TØRRISSEN, B. C. (Last Accessed: October 1, 2009). http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gecko_foot_on_glass.JPG.
- TUMMALA, R. L., MUKHERJEE, R., XI, N., ASLAM, D., DULIMARTA, H., XIAO, J., MINOR, M. e DANGHI, G. (2002). Climbing the walls, IEEE Robotics and Automation Magazine 9(4): 10–19.
- UNVER, O., UNERI, A., AYDEMIR, A. e SITTI, M. (2006). Geckobot: A gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA, pp. 2329–2335.
- VINCZE, M., AYROMLOU, M., PONWEISER, W., ZILICH, M., HOFFGAARD, S., MADSEN, O., BELTRAN, C. e GASTERATOS, A. (2001). A system to navigate a robot into a ship structure, in K. Berns, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 953–960.
- VIRK, G. S. (2003). CLAWAR modularity – the guiding principles, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1025–1031.
- WARREN, H. A. (2002). CLAWAR Task 19 – barriers to commercial exploitation of mobile robotics, in P. Bidaud and F. B. Amar (eds), Climbing and Walking Robots – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 917–930.
- WARREN, H. A. (2003). Economic prospects for mobile robots – a CLAWAR perspective – Work Package 6 (WP6) year 1, May 2003, in G. Muscato and D. Longo (eds), Climbing and Walking Robots – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing Limited, pp. 1057–1070.

- WEI, T. E., DALTORIO, K. A., GORB, S. N., SOUTHARD, L., RITZMANN, R. E. e QUINN, R. D. (2006). A small climbing robot with compliant ankles and multiple attachment mechanisms, Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots, Brussels, Belgium, pp. 579–585.
- WEISE, F., KÖHNEN, J., WIGGENHAUSER, H., HILLENBRAND, C. e BERNIS, K. (2001). Non-destructive sensors for inspection of concrete structures with a climbing robot, in K. Bernis, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 945–952.
- WIKIPEDIA (ed.) (Last Accessed: October 1, 2009). [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gecko foot on glass.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gecko_foot_on_glass.JPG).
- XIAO, J., XI, N., XIAO, J. e TAN, J. (2003). Multi-sensor referenced gait control of a miniature climbing robot, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intel. Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 3656 – 3661.
- XIAO, J., XIAO, J., XI, N. e SHENG, W. (2004). Fuzzy system approach for task planning and control of micro wall climbing robots, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5033 – 5038.
- YAN, W., SHULIANG, L., DIANGUO, X., YANZHENG, Z., HAO, S. e XUESHAN, G. (1999). Development & application of wall-climbing robots, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, USA, pp. 1207–1212.
- YANO, T., NUMAO, S. e KITAMURA, Y. (2001). Two-legged self-contained wall climbing robot with scanning type suction cups, in K. Bernis, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 899–906.
- YONEDA, K., OTA, Y., HIRANI, K. e HIROSE, S. (2001). Design of a light-weight wall climbing quadruped with reduced degrees of freedom, in K. Bernis, and R. Dillmann (eds), Climbing and Walking Robots – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Professional Engineering Publishing, pp. 907–912.
- ZAGLER, A. e PFEIFFER, F. (2003). "MORITZ" a Pipe Crawler for Tube Junctions. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation; pp. 2954 – 2959.
- ZHANG, H., ZHANG, J., LIU, R. e ZONG, G. (2004). A novel approach to pneumatic position servo control of a glass wall cleaning robot, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intel. Robots and Systems, Sendai, Japan, pp. 467–472.
- ZHU, J., SUN, D. e TSO, S.-K. (2003). Application of a service climbing robot with motion planning and visual sensing, Journal of Robotic Systems 20(4): 189–199.

Anexos

Devido às suas dimensões, e para não aumentar desnecessariamente o tamanho deste relatório escrito, os anexos encontram-se no CD fornecido juntamente com este documento escrito.

De seguida descreve-se a forma como se encontra organizada toda a informação no CD em questão.

Anexo A. Esquemas Mecânicos

Neste anexo encontram-se os seguintes desenhos/esquemas mecânicos:

- Esquema Mecânico Geral
- Desenho da Unidade de Adesão
- Processo de ajuste dinâmico das Unidades de Adesão à superfície de locomoção

Anexo B. Esquemas Eléctricos

Neste anexo encontram-se os seguintes esquemas eléctricos:

- Sistema de Controlo dos Motores com as saídas do PLC
- Fontes de Alimentação
- Geral Controlo dos Motores
- Controlo dos Motores do Sistema de Adesão
- Controlo dos Motores do Sistema de Locomoção
- Interface Manual Local
- Top Board – Fontes de Alimentação (PSU)
- Botton Board – Fontes de Alimentação (PSU)
- Top Board – Controlo dos Motores do Sistema de Adesão
- Botton Board – Controlo dos Motores do Sistema de Adesão
- Top Board – Controlo dos Motores do Sistema de Locomoção
- Botton Board – Controlo dos Motores do Sistema de Locomoção
- Dimensões das várias PCI
- Configuração do AP Wi-Fi

Anexo C. Programas do PLC e do SCADA/HMI

Neste anexo é possível encontrar, nas pastas indicadas, os seguintes programas:

- \\PLC\ML1100_TEDI2010-1900166
- \\SCADA_HMI\TEDI_2010-1900166

Anexo D. Bibliografia

Por último, neste anexo encontra-se toda a bibliografia que foi consultada para a realização do trabalho, estando esta organizada, por pastas, da forma que se segue:

- \\Componentes Mecânicos\
- \\Componentes Electrónicos\
- \\Sensores\
- \\Motores\
- \\Comunicações\
- \\PLC\
- \\SCADA_HMI\

