



**Miguel Antunes da
Fonseca Ribeiro**

**Desenvolvimento dos Sistemas Sensorial e Motor
Para Um Robô Humanóide**



**Miguel Antunes da
Fonseca Ribeiro**

**Desenvolvimento dos Sistemas Sensorial e Motor
Para Um Robô Humanóide**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Dr. Filipe Miguel Teixeira Pereira da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Prof. Dr. Vítor Manuel Ferreira dos Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Dr. Armando José Formoso de Pinho
professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. António Manuel Ferreira Mendes Lopes
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Filipe Miguel Teixeira Pereira da Silva
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Vítor Manuel Ferreira dos Santos
professor associado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Apresento aqui os meus agradecimentos a todos os que fizeram parte da minha formação académica e não-académica. De uma forma ou de outra, esse contributo foi importante na concretização deste trabalho.

De uma forma mais individual, pretendo agradecer ao Prof. Dr. Filipe Silva e ao Prof. Dr. Vítor Santos. Primeiro, por encabeçarem um projecto tão desafiante como este que vem de encontro aos meus gostos profissionais. Em segundo, por me terem dado a possibilidade de fazer parte deste desafio. E por último, mas pessoalmente mais importante, me permitirem concluir esta formação académica com segurança para encarar a vida profissional.

Um agradecimento a todos os profissionais e alunos, que diariamente compõem o Laboratório de Automação e Robótica, em especial ao David Gameiro e ao Emanuel Ávila, cujas ajudas foram e serão bastante importantes para o concretizar deste “sonho”.

Agradecer aos órgãos do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática e do Departamento de Engenharia Mecânica por me facultarem a formação académica essencial para o meu futuro.

Como não poderia deixar de ser, um agradecimento especial aos meus pais por me possibilitarem uma formação académica superior, às minhas irmãs por me alertarem e aconselharem e à minha namorada por me aturar nos momentos mais difíceis.

Um agradecimento aos meus amigos. Aos de sempre e aos que me acompanharam nesta caminhada universitária.

Por último, agradecer aos elementos da escola de formação não-formal, o Agrupamento 141 de Santa Eulália de Águeda do Corpo Nacional de Escutas, a disponibilidade para formar jovens como eu.

palavras-chave

Robótica, robô humanóide, sistema motor, sistema sensorial, arquitectura distribuída, cinemática inversa, centro de pressão.

resumo

Esta dissertação é a continuação do Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro, que recentemente iniciou o desenvolvimento de uma segunda plataforma humanóide. Após a sua construção surgiu a necessidade de iniciar a concepção da arquitectura de controlo distribuída idealizada.

Esta tese aborda o desenvolvimento das unidades de controlo que constituem a arquitectura mencionada, desde as interfaces necessárias ao desempenho do microcontrolador associado. Pretende-se que a cada unidade de controlo estejam associados actuadores activos e passivos, sendo que os primeiros são servomotores que foram exaustivamente testados durante esta dissertação.

O passo seguinte passou pela simulação e realização de movimentos com uma perna real do robô humanóide. O simulador utilizado efectua a conversão da posição no espaço Cartesiano do elemento terminal (neste caso, a anca) para a posição angular de cada uma das juntas da perna, com base no algoritmo de cinemática inversa.

Por último, fez-se alguns ensaios com os sensores de força, tendo-se inclusive calculado o centro de pressão com base na informação sensorial de força adquirida.

keywords

Robotics, humanoid robot, inverse kinematic, direct kinematic, center of pressure, control system, sensorial system, distributed architecture.

abstract

This dissertation continues the Humanoid Project of Aveiro University which recently started developing the second humanoid platform. After its construction, the design of the distributed control architecture was initiated.

This thesis approaches the development of control units which constitute the mentioned architecture, their interfaces and microcontroller's performance.

It's intended that each control unit has active and passive actuators associated. The first ones are servomotors that have been exhaustively tested during this work.

The next step was the simulation and motion of a humanoid robot's real leg. The used simulator converts the terminal element's position on the Cartesian space into the joints' angular position based on the inverse kinematics algorithm.

Finally, some tests were realized with force sensors which were concluded with the estimation of the centre of pressure from the sensorial data obtained.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivações e Objectivos	2
1.2	Organização da Dissertação	2
2	Estado de Arte	5
2.1	Introdução	5
2.2	O Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro	7
2.2.1	O primeiro protótipo	8
2.2.2	A plataforma humanóide actual	10
3	Microcontrolador e Actuadores	13
3.1	Introdução	13
3.2	Unidade <i>Slave</i>	13
3.2.1	CAN vs. ECAN	14
3.2.2	Escolha do MCU	15
3.2.3	Componentes Adicionais	16
3.3	Servomotores digitais	21
3.3.1	Modos de Comunicação	21
3.3.2	Ligação Eléctrica	24
3.3.3	Controlo de Posição e Memórias	25
3.3.4	Testes	27
3.3.4.1	Protocolo de Comunicação	28
3.3.4.2	Desempenhos estático e dinâmico	28
3.3.4.3	Partilha do barramento	31
3.4	Discussão de Resultados	33
4	Integração dos Sistemas Sensorial e Motor	35
4.1	Introdução	35
4.2	Modelação de uma perna	35
4.2.1	Cinemática Directa	36
4.2.2	Cinemática Inversa	37
4.2.3	<i>Software</i> desenvolvido	39
4.3	Controlo experimental de uma perna	40
4.4	Sensores de Força	45
4.4.1	Testes	46
4.4.2	Centro de Pressão	48

4.5	Discussão de Resultados	50
5	Conclusões	51
5.1	Discussão de Resultados	51
5.2	Perspectivas de Trabalho Futuro	52

Lista de Figuras

1.1	Membros inferiores da nova plataforma humanóide	2
2.1	Protótipos da Universidade de Waseda	5
2.2	Testes de equilíbrio (projecto WABOT)	6
2.3	Protótipo da Honda: o ASIMO [11]	7
2.4	Movimentos do HRP-2 evitando obstáculos [10]	7
2.5	Primeiro protótipo construído na UA [3]	8
2.6	Componentes usados no primeiro protótipo	9
2.7	Arquitectura distribuída de controlo [2]	9
2.8	Unidade de controlo local (<i>Slave</i>)	10
2.9	Desenhos do pé com o CATIA 3D	11
3.1	Diagrama funcional das unidades <i>Master</i> e <i>Slave</i>	14
3.2	<i>dsPIC33FJ128GP706</i> da Microchip	16
3.3	Componentes adicionais	17
3.4	Modelo <i>EAGLE</i> do SN65HVD232	18
3.5	Placa de Circuito Impresso	18
3.6	Ambiente de teste	19
3.7	Esquema Eléctrico	20
3.8	Servomotores da Hitec [13]	21
3.9	Correspondência entre a largura de pulso e posição [15]	22
3.10	Demonstração do modo <i>Extended Pulse</i>	22
3.11	Esquema de ligação de vários servomotores	25
3.12	Controlo de Posição	26
3.13	Leituras de posição do servomotor	28
3.14	Análise da Velocidade Máxima	29
3.15	Acessórios para ensaios	30
3.16	Ensaio com cargas diferentes	31
3.17	<i>Feedback</i> de posição quando o barramento de comunicação é partilhado	32
4.1	Modelo da perna com 3 GdL	36
4.2	Diagrama de blocos da estrutura de controlo em cascata	38
4.3	Visão Lateral e Frontal do Movimento de Agachamento	41
4.4	Movimento das juntas durante a sequência de movimentos	42
4.5	Coordenadas (mm): X = -150.0; Y = 39.5; Z = 270.0	43
4.6	Coordenadas (mm): X = 95.0; Y = 39.0; Z = 312.0	43

4.7	Coordenadas (mm): X = 95.0; Y = -39.5; Z = 312.0	44
4.8	Coordenadas (mm): X = -150.0; Y = -39.0; Z = 270.0	44
4.9	Coordenadas (mm): X = 0.0; Y =0.0; Z = 331.0	45
4.10	Sensores de força	45
4.11	<i>Setup</i> Experimental	47
4.12	Desempenho dos Sensores	47
4.13	Centro de Pressão	49

Lista de Tabelas

2.1	Distribuição dos Graus de Liberdade [2]	8
2.2	Comparação das dimensões da perna das duas plataformas	10
3.1	<i>CAN vs. ECAN</i>	15
3.2	Características do <i>dsPIC33FJ128GP706</i>	16
3.3	Características do servomotor	21
3.4	Protocolo de Comunicação RS-232	23
3.5	Conjuntos de comandos	24
3.6	<i>Scripts</i> para controlo dos servomotores em <i>Matlab</i>	27
3.7	Análise estatística da partilha do barramento	33
4.1	Parâmetros de Denavit-Hartenberg	36
4.2	Comprimentos dos elos mecânicos e respectivas massas	37
4.3	<i>Device Drivers</i> para MCU	39
4.4	Funções para implementação dos algoritmos de cinemática inversa	40
4.5	Características	46

Acrónimos

CMRR	Relação de Rejeição em Modo Comum
ECAN	Enhanced Controller Area Network
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
FIFO	First-In First-Out
FIRA	Federation of International Robot-soccer Association
GdL	Graus de Liberdade
HMI	Hitec Multi-protocol Interface
IA	Inteligência Artificial
MCU	Microcontrolador
MCU	Microcontrolador
PHUA	Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro
PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RTR	Response to Request (Resposta a Pedido)
SOIC	Small-Outline Integrated Circuit
UA	Universidade de Aveiro
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

Capítulo 1

Introdução

A Robótica Humanóide é um desafio a todos os níveis do conhecimento. Para atingir um objectivo tão exigente com sucesso, é necessária a conjugação de noções de uma vasta gama de áreas, tais como a anatomia, a física, a mecânica e a electrónica, entre muitas outras, de modo a se conseguir superar obstáculos relacionados com a locomoção, a navegação, a manipulação e a percepção. Trata-se portanto de um desafio bastante complexo e que pode ter variadíssimos destinos de aplicação (*e.g.*, industriais, médicos, espaciais ou militares).

Esta área de investigação, juntamente com o avanço da tecnologia e de novas metodologias, atrai muitos investigadores que, conseqüentemente, envolvem entidades públicas e privadas procurando encontrar melhores soluções. Maioritariamente, o tempo dispensado nestas investigações tem como alvo o projecto e concepção de novos robôs humanóides de baixo custo comercial ou a implementação e desenvolvimento de novas competências de alto nível nestes. De modo a facultar o conhecimento das várias experiências realizadas, são organizadas, por todo o mundo, conferências sobre esta temática, tais como a *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* e a *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Para tornar a robótica humanóide ainda mais entusiasmante surgiu, em 1995, a *Federation of International Robot-soccer Association (FIRA)* e, em 1997, a *RoboCup*, onde existe uma categoria para humanóides. Estes torneios têm como objectivo promover o estudo e desenvolvimento da Inteligência Artificial (IA) e da Robótica e, como sonho, criar uma equipa que ganhe à selecção campeã do mundo de futebol humano.

Deste modo, a Universidade de Aveiro (UA) iniciou em 2003 o Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro (PHUA) que conta com a colaboração conjunta do Departamento de Mecânica e do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática. A investigação levada a cabo por este projecto tem-se baseado no desenvolvimento da estrutura mecânica e integração de soluções de *hardware* e *software*. Uma primeira etapa terminou com a construção de uma plataforma humanóide autónoma com uma arquitectura de controlo distribuída utilizando uma rede CAN [1, 2].

No ano lectivo de 2008/09 iniciou-se a projecção e construção de um segundo protótipo mais compacto e leve, com uma estrutura cinemática simplificada e com a inclusão de elementos passivos de actuação. Esta dissertação incide sobre o desenvolvimento dos sistemas de controlo e motor dos membros inferiores, indispensáveis para o início da realização de movimentos tão simples como o agachamento ou o equilíbrio em plataformas irregulares. Este robô seguirá uma estrutura idêntica à do primeiro protótipo construído, com a implementação de uma arquitectura distribuída e conseqüente rede de comunicações, utilização de sensores de força e inerciais, e servomotores.

No início desta dissertação, o estado de construção da nova plataforma era o apresentado na figura

1.1, sendo que actualmente já inclui tronco e membros superiores.

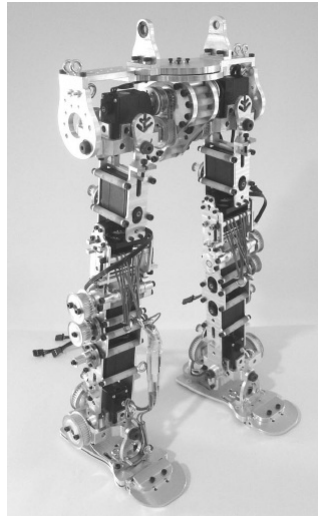


Figura 1.1: Membros inferiores da nova plataforma humanóide

1.1 Motivações e Objectivos

O plano de trabalhos desta dissertação é enquadrado no âmbito do PHUA com o intuito de abordar novos desafios, como a integração de elementos activos e passivos e conjugação de novos métodos de programação e controlo. A aquisição de componentes tecnológicos mais avançados, o desenvolvimento de novas soluções de engenharia e a avaliação do desempenho electromecânico da nova plataforma, são o primeiro passo para ultrapassar os obstáculos mencionados.

Este tipo de projectos envolve alguns anos de dedicação, pelo que seria impraticável querer atingir todos os objectivos que estão inerentes à concepção de uma plataforma humanóide robusta e eficiente. Deste modo, esta dissertação pretende atingir as seguintes metas:

- Estudar e avaliar o desempenho dos componentes adquiridos, como os servomotores digitais e sensores de força;
- Projectar, conceber e testar a unidade de controlo, baseada em microcontrolador PIC, que comandará os actuadores e efectuará a leitura sensorial;
- Efectuar a integração da unidade controladora e de todos os elementos activos e passivos;
- Realizar ensaios experimentais de controlo usando uma perna do robô humanóide para validação das soluções de engenharia propostas.

1.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação é composta por vários capítulos organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 2 - Estado de Arte:** menciona o início e actualidade da robótica humanóide, bem como o historial do Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro;

- **Capítulo 3 - Microcontrolador e Actuadores:** apresenta os critérios de escolha dos componentes para a unidade controladora tal como a sua projecção e avalia os desempenhos dos actuadores activos adquiridos;
- **Capítulo 4 - Integração dos Sistemas Sensorial e Motor:** efectua-se uma apresenta-se dos algoritmos da cinemática, directa e inversa, demonstra os testes do controlo experimental de uma perna do robô humanóide e mostra o desempenho dos actuadores passivos individual e colectivamente, com a aquisição de uma estimativa do centro de pressão;
- **Capítulo 5 - Conclusões:** avalia todas as componentes do trabalho efectuado nesta dissertação e procura dar sugestões para o trabalho futuro.

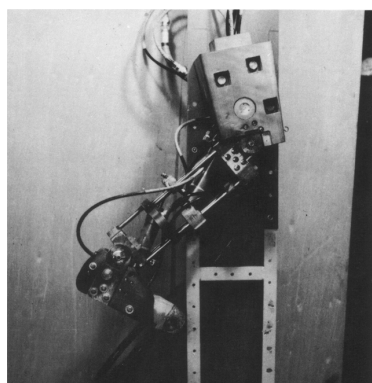
Capítulo 2

Estado de Arte

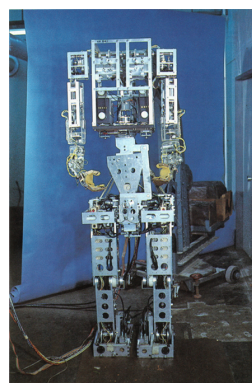
2.1 Introdução

O termo robô¹ foi introduzido pela primeira vez por Karel Chapek no seu livro de ficção “*Rossum’s Universal Robots*” (Os Robôs Universais de Rossum) em 1920. Nesta obra, esta designação foi atribuída aos andróides² criados pela personagem Rossum que tinham como objectivo substituir o ser humano no trabalho [4].

Na realidade, em 1698 foi dado o primeiro passo para atingir essa meta com a invenção da primeira máquina operacional a vapor, por Thomas Savery, que permitiu a drenagem de águas das minas [4], iniciando a substituição do homem em trabalhos pesados. O avanço das últimas décadas nesta área da robótica, deve-se em parte à imaginação de escritores como Isaac Asimov [5], que escreveram livros de ficção científica e fomentaram, porventura, o interesse por esta temática.



(a) WL-1 [7]



(b) WABOT-1 [8]

Figura 2.1: Protótipos da Universidade de Waseda

Uma das questões com certeza mais frequente é o porquê de dar a forma humana aos robôs. A resposta poderá estar no plano afectivo, pois a humanidade tem tendência para interagir com o que é comumente natural e que pode inclusive levar a que os humanóides possam tomar decisões, demonstrar emoções e ter relações afectivas. Outro motivo é a facilidade de adaptação dos humanóides ao ambiente envolvente, visto que este foi construído por e para humanos e, portanto, não seria

¹Proveniente da palavra checa *robota*, cujo significado é “trabalhador”.

²Autómato com figura humana.

necessário alterar infraestruturas para que estes se integrassem. São razões que, do ponto de vista da tecnologia, motivam os investigadores a apostar neste tipo de robôs [6].

Um dos primeiros protótipos de robô humanóide foi desenvolvido na Universidade de Waseda (Tóquio, Japão) no ano de 1967 sendo conhecido por WL-1 (fig. 2.1a). Este protótipo foi criado com o objectivo de estudar a locomoção bípede, tendo originado o desenvolvimento de algoritmos fundamentais [7]. No seguimento da investigação, em 1973, foi apresentado o primeiro robô antropomórfico do mundo, o WABOT-1 (fig. 2.1b).

Este era capaz de andar, interagir com pessoas em Japonês, medir distâncias e direcções em relação aos objectos usando receptores externos, agarrar e transportar objectos com as mãos artificiais que continham sensores de tacto. Considerou-se que teria a capacidade mental de um bebé com um ano e meio [8]. Mais recentemente, foi apresentada uma versão de pequenas dimensões que tem sido submetida a testes de equilíbrio quando assente numa base móvel (fig. 2.2a) ou sujeita a perturbações externas (fig. 2.2b). Esta estrutura apresenta três sensores em cada pé que são usados para assegurar a estabilidade da mesma. É capaz de detectar inclinações mínimas de 3° e máximas de 22° , tanto para a frente como para trás, e reagir de modo a manter o equilíbrio [9].



(a) Movimento com inclinação para trás [9]



(b) Movimento de resposta à força exercida [9]

Figura 2.2: Testes de equilíbrio (projecto WABOT)

A evolução da tecnologia e a diminuição do seu custo tem permitido que diversas companhias, principalmente japonesas, se dediquem à investigação, desenvolvimento e construção de novas plataformas humanóides. Destas, a mais emblemática e com maior potencial deverá ser o ASIMO da Honda (fig. 2.3). Este humanóide é capaz de andar, dançar, correr em linha recta e em círculos, subir e descer escadas e, mais recentemente, reconhecer e aprender novos objectos [11].

Um outro humanóide também reconhecido mundialmente pelo seu excelente desempenho é o HRP-2 (fig. 2.4), criado pela *Kawada Industries, Inc.* em 2002, que mede 1,54 m e pesa 58 kg. Com os seus 30 graus de liberdade, uma das últimas experiências realizadas foi a tentativa, com sucesso, de evitar colisões. Esta plataforma realiza os seus movimentos baseando-se num planeamento de trajectória prévio para evitar as colisões, mas tendo conhecimento do ambiente envolvente [10].



Figura 2.3: Protótipo da Honda: o ASIMO [11]

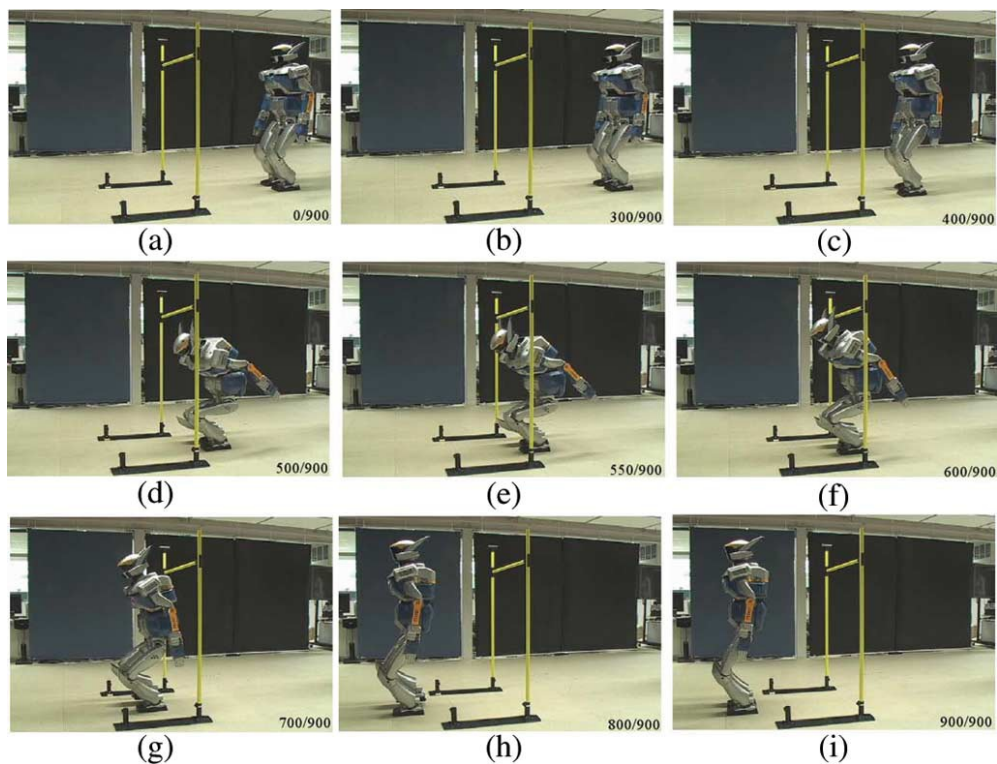


Figura 2.4: Movimentos do HRP-2 evitando obstáculos [10]

O avanço da tecnologia e consequente diminuição do seu custo, tem permitido que outras entidades (institutos, universidades) se dediquem à investigação e desenvolvimento de soluções menos dispendiosas mas cada vez mais avançadas (PINO, Hansan, ...). Foi neste contexto que, em 2003, um grupo de estudantes do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro iniciou a construção de uma plataforma humanóide autónoma de baixo custo.

2.2 O Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro

Em 2004, a Universidade de Aveiro, através do Departamento de Mecânica e do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, iniciou a sua aventura no mundo da robótica humanóide com

o chamado Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro (PHUA). O objectivo principal deste projecto é a realização de estudos avançados nas áreas da locomoção bípede, da navegação autónoma, das arquitecturas de controlo distribuídas, da fusão sensorial e da aprendizagem. Nesta secção apresenta-se, resumidamente, o trabalho desenvolvido desde o início do projecto e o ponto de partida para esta dissertação.

2.2.1 O primeiro protótipo

O primeiro robô humanóide construído na UA assenta numa estrutura em alumínio com eixos de aço, com uma altura de cerca de 60 cm e pesa 6 kg (fig. 2.5).

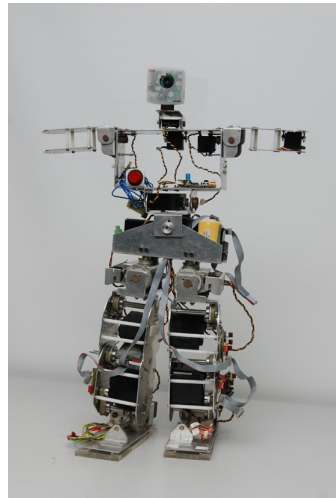


Figura 2.5: Primeiro protótipo construído na UA [3]

Todos os componentes adicionais, como as baterias, as unidades de controlo e os motores, estão colocados entre os módulos que formam o exoesqueleto do robô. No total, esta plataforma tem 22 graus de liberdade com a distribuição apresentada na tabela 2.1.

Articulação	Número
Pé	2 (x2)
Joelho	1 (x2)
Anca	3 (x2)
Tronco	2
Braço	3 (x2)
Cabeça	2
TOTAL	22

Tabela 2.1: Distribuição dos Graus de Liberdade [2]

A cada um destes graus de liberdade (GdL) corresponde um servomotor analógico (fig. 2.6a) que acciona a junta através de polias e correias de transmissão (fig. 2.6b). Do ponto de vista sensorial, esta plataforma está dotada de quatro sensores de força em cada pé, inclinómetros e giroscópios. Os sensores de força (fig. 2.6d) colocados nas extremidades dos pés foram desenvolvidos pelo próprio grupo com base em extensómetros (fig. 2.6c). Quando submetidos a uma força externa, a deformação medida nos quatro cantos do pé permite obter uma estimativa da localização do centro de pressão.

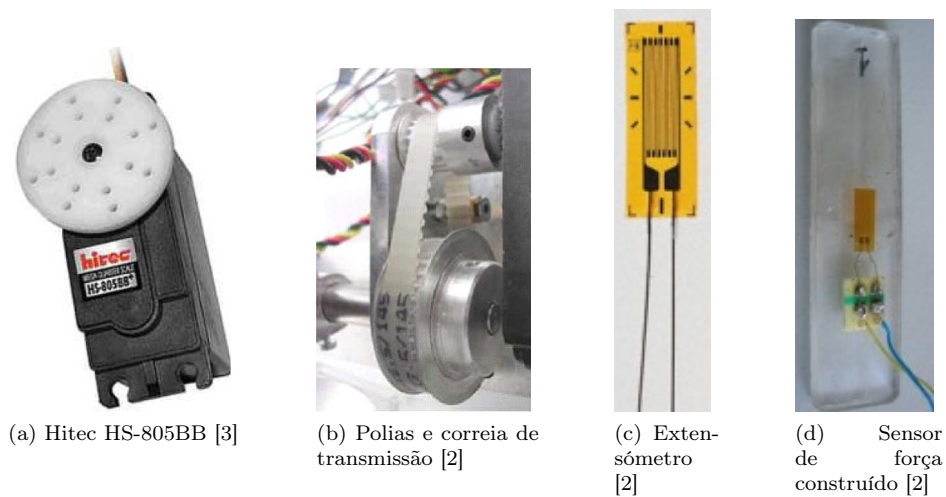


Figura 2.6: Componentes usados no primeiro protótipo

Relativamente ao sistema de controlo, a plataforma assenta numa arquitectura distribuída (fig. 2.7) constituída por uma unidade central de processamento, uma unidade principal (*Master*) e por diversas unidades locais (*Slaves*) distribuídas por toda a plataforma. A unidade central de processamento é baseada numa *embedded motherboard* do tipo PC-104 e a sua comunicação com a unidade *Master* é feita por RS-232. A função da unidade *Master* é assegurar a comunicação entre as restantes unidades, PC-104 e *Slaves*, permitindo a constante actualização do estado do robô e a sua gestão. As unidades locais (*Slaves*), tal como a unidade *Master*, baseiam-se em microcontroladores PIC e têm a seu cargo o controlo dos servomotores, que pelo critério de proximidade lhes são individualmente atribuídos, e as leituras sensoriais.

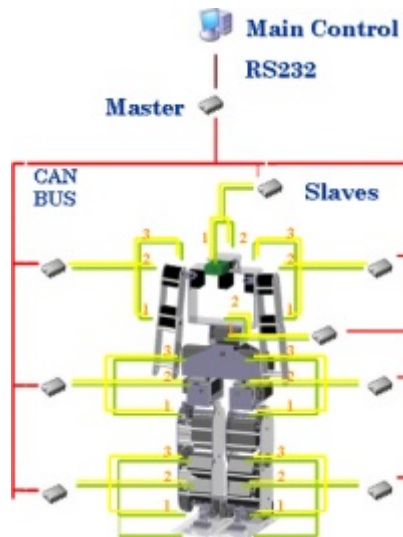


Figura 2.7: Arquitectura distribuída de controlo [2]

Esta arquitectura distribuída, com unidades de controlo modulares (fig. 2.8a), permite fazer uma programação de *software* homogénea, sectionar problemas em caso de avaria e reduzir custos na construção dos circuitos impressos. Ao mesmo tempo, a interface das unidades de controlo locais com circuitos específicos (*e.g.*, sensores especiais ou outras funções) é efectuada através de *piggy-back* (fig.

2.8b). Assim, foi possível reduzir as dimensões destas unidades e adaptá-las mais facilmente à função que lhe compete, que vai da leitura sensorial à comunicação RS-232. [1, 2, 3]

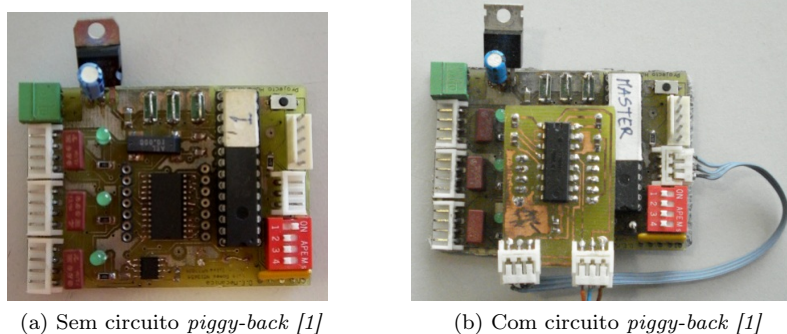


Figura 2.8: Unidade de controlo local (*Slave*)

Os resultados permitiram validar algumas soluções de engenharia preconizadas, mas também foram detectados aspectos menos positivos como as folgas mecânicas, a baixa eficiência energética (associada ao elevado peso da estrutura) e a menor fiabilidade dos sensores de força. Estas deficiências tinham um impacto directo sobre o desempenho da plataforma, em particular, na execução de tarefas de marcha. Apesar destes pontos negativos, a primeira experiência ao nível da Robótica Humanóide teve resultados entusiasmantes que motivaram a construção de uma plataforma mais robusta do ponto de vista mecânico e centrada numa maior aproximação aos mecanismos de locomoção humana [12].

2.2.2 A plataforma humanóide actual

Nesta subsecção, apresentam-se as alterações introduzidas na nova plataforma que estão relacionadas com a inovação no desenho mecânico e na componente tecnológica. Estas evoluções permitem abordar os novos desafios que se avizinham e que incluem a actuação híbrida integrando elementos activos e passivos, o controlo híbrido combinando capacidades reactivas e deliberativas e novos conceitos de programação e controlo baseados em aprendizagem.

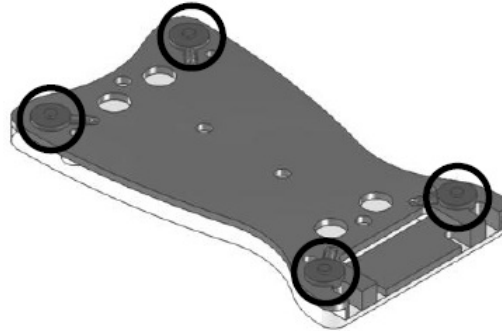
Ao nível da estrutura mecânica deve-se salientar o esforço efectuado para que esta se aproximasse o mais possível da funcionalidade do corpo humano, relativamente a GdL e proporções antropométricas.

Elo		Comprimento (mm)	
		Plataforma 1	Plataforma 2
Pé-tornozelo	L0	47.0	47.0
Tornozelo-joelho	L1	115.0	139.0
Joelho-anca	L2	95.0	143.0
TOTAL		257.0	329.0

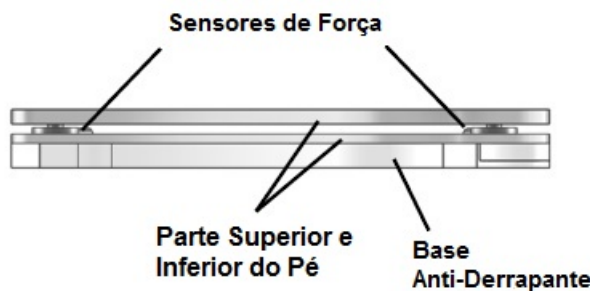
Tabela 2.2: Comparação das dimensões da perna das duas plataformas

Relativamente aos membros inferiores, sobre o qual incide esta dissertação, estes englobam doze GdL actuados e uma articulação passiva nos pés que eleva o calcanhar no movimento de marcha, permitindo que a perna de suporte permaneça esticada. Ainda no pé, existe um particionamento do mesmo, imitando os dedos dos pés tal como num pé humano. Este último pormenor pode vir a ser importante, se se conseguir que seja tão necessário ao robô como a um humano, visto que este depende dos dedos do pé para melhorar o seu equilíbrio.

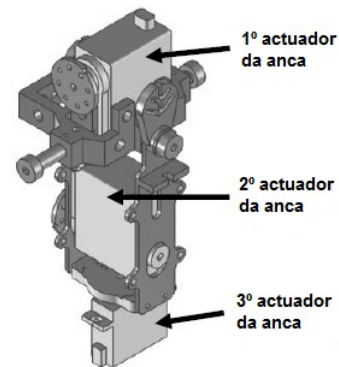
Ao nível da anca, houve uma deslocação dos seus GdL que, anteriormente, estavam colocados em planos transversais diferentes e agora, graças à concepção de uma junta universal, se podem juntar dois GdL no mesmo plano, apesar de pertencerem a eixos diferentes (fig. 2.9c). O terceiro GdL da anca, que possibilita a rotação da perna no eixo longitudinal, foi deslocado para a coxa devido a questões de insuficiência de espaço para a colocação dos servomotores. Apesar da localização deste último apenas permitir o movimento de rotação interna e externa em parte da perna, o eixo de actuação continua ortogonal aos outros dois e o ponto de intersecção dos três eixos de rotação não está muito distante do que seria antropomorficamente desejado.



(a) Identificação do lugar dos sensores de força no pé [12]



(b) Pé completo com sensores de força [12]



(c) Junta Universal na Anca

Figura 2.9: Desenhos do pé com o CATIA 3D

Dois aspectos fundamentais neste projecto são a possibilidade de regulação do comportamento dos sistemas de transmissão (por ajuste da tensão aplicada às correias) e a inclusão de múltiplos pontos de inserção para os elementos de actuação passiva (*e.g.*, molas e elásticos). O primeiro, possibilita gerar ganhos de binário que variam consoante o diâmetro das polias construídas. Actualmente, nas juntas do tornozelo tem-se um ganho de oito para trinta e dois e na junta do joelho um ganho de vinte e dois para trinta. Este dimensionamento permite, segundo o estudo efectuado no momento da planificação da plataforma humanóide [12], que esta tenha as mesmas limitações angulares da perna humana.

Como referido anteriormente, foram efectuadas melhorias ao nível tecnológico. Efectuou-se a aquisição de novos servomotores, mas desta vez digitais, com um binário e velocidade maiores e que permitem obter um *feedback* das posições angulares das juntas e de outras informações relevantes através do protocolo RS-232, tendo em vista o sistema de controlo e a implementação de malhas de realimentação. O novo robô está também dotado de sensores de força para substituir os extensómetros da plataforma antiga, com dimensões bastante reduzidas e adequadas ao novo pé, capazes de dar maior

fiabilidade à leitura sensorial por terem maiores exigências ao nível da sua sensibilidade, linearidade e histerese. Assim, poder-se-à obter uma melhor estimativa do centro de pressão, que poderá influenciar directamente o desempenho dos algoritmos de controlo futuros.

Prevê-se que este humanóide inclua sensores inerciais para reforçar o sistema de controlo da estrutura ao nível do equilíbrio e da locomoção e, portanto, incluirá duas redes ECAN independentes: uma para o sistema sensorial e outro para o sistema motor.

Estes são argumentos que motivam a criação e desenvolvimento de uma nova estrutura, que se deseja que tenha sucesso na implementação e possível investigação de novos algoritmos de controlo, baseados em informação motora, sensorial, visual e quiçá auditiva.

Capítulo 3

Microcontrolador e Actuadores

3.1 Introdução

Este capítulo demonstra o trabalho desenvolvido em torno de dois componentes essenciais: o microcontrolador e os actuadores. Relativamente ao primeiro, relata-se a discussão levada a cabo para a escolha do microcontrolador mais adequado para a unidade de controlo local (*Slave*) que culminou na escolha de um dsPIC da Microchip. Em segundo lugar, apresenta-se as características principais dos servomotores utilizados, o protocolo de comunicação utilizado e os testes realizados para avaliação de desempenho. Ao longo deste capítulo apresenta-se um conjunto de ferramentas *software* para apoio aos ensaios experimentais.

3.2 Unidade *Slave*

O processamento e conjugação de informação, bem como o controlo dos actuadores, tem de ser realizado por uma unidade de controlo que seja eficaz, ou seja, não seja responsável por situações de atraso na emissão de ordens para os seus súbditos. Neste aspecto, com a experiência adquirida da plataforma anterior, decidiu-se escolher um novo microcontrolador mais rápido e com maior memória de programação. No entanto, exige-se que possua todas as interfaces necessárias à adaptação rápida de novos dispositivos para trabalhos futuros. Por forma a não esquecer nenhum pormenor necessário à escolha do microcontrolador, apresenta-se um diagrama funcional (fig. 3.1) com todas as interfaces que se deseja que este contenha, tanto para o *Master* como para os *Slaves*.

Assim, é possível ter-se uma noção de toda a arquitectura desta nova plataforma humanóide. O *Master* controla todos os *Slaves* através de uma rede CAN, enquanto os sensores inerciais serão comandados por uma rede CAN separada. É ainda necessário uma ligação para a PC-104 através da interface UART.

As unidades de controlo *Slave* requerem a ligação de mais dispositivos, logo necessita de mais interfaces. Para além da rede CAN para comunicação com o *Master*, a sua rede UART servirá para controlar os servomotores digitais, enquanto os servomotores analógicos serão comandados por uma porta I/O normal para emissão de *PWM*. A sua ADC terá como função ler a tensão dos amplificadores de instrumentação, que amplificam o sinal dos sensores de força, e ainda terá que configurar o *Slave* com a sua identificação através de um *DIP Switch* externo. A opção deste dispositivo externo deve-se à facilidade de a olho se saber qual é a sua identificação, sem ser necessário verificar o seu

firmware. Existe ainda uma interface que é comum a todos os microcontroladores que são os pinos de programação e alimentação que também devem ser considerados na placa de circuito impresso.

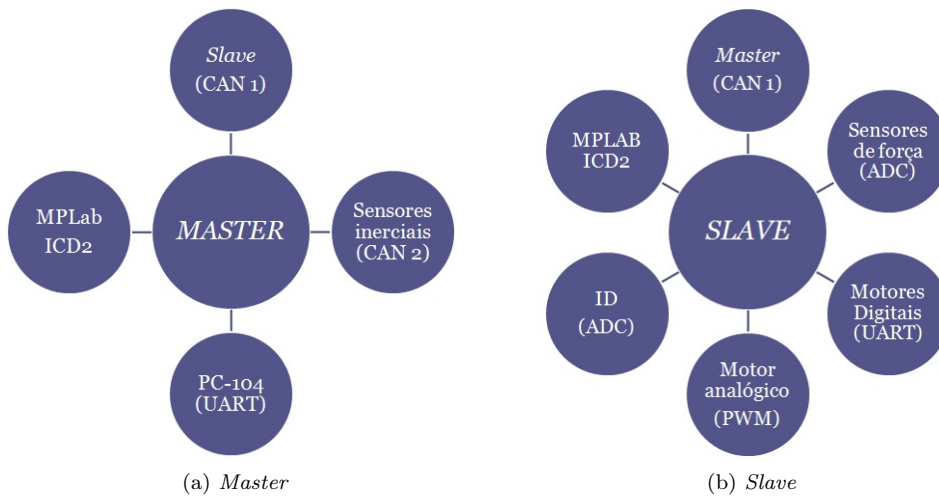


Figura 3.1: Diagrama funcional das unidades *Master* e *Slave*

3.2.1 CAN vs. ECAN

Uma das inovações tecnológicas verificadas nos últimos anos foi ao nível do protocolo de comunicação CAN. Este manteve as mesmas características, mas surgiu um protocolo mais recente denominado ECAN (*Enhanced Controller Area Network*) que visou melhorar a comunicação em ambientes com muito tráfego. As principais melhorias do ECAN em relação ao CAN são:

- Suporte para filtro de dados *DeviceNet™* ;
- Compatível com módulos CAN para PIC18XX8;
- Três modos de operação:
 - Modo 0: modo *Legacy*;
 - Modo 1: modo *Legacy* melhorado com suporte para *DeviceNet™* ;
 - Modo 2: modo FIFO com suporte para *DeviceNet™* ;
- Suporte para tramas remotas com manipulação automatizada;
- Melhorias ao nível de *buffers*.

Na tabela 3.1, pode-se verificar em que situações cada um deles é mais aconselhável. Analisando a comparação efectuada, conclui-se que para ambientes de elevado tráfego, que deverá ser o caso dos sistemas sensorial e motor, a melhor solução passará pela utilização do protocolo ECAN nesta plataforma humanóide, porque é normal que a utilização dos *buffers* seja superior a 10%.

Transmissão		
Tráfego	Baixo (<i>duty</i> < 10%)	Elevado (<i>duty</i> > 10%)
CAN	Bom - Excelente na decisão	Tempos de processamento elevados e possíveis atrasos devido a inversões de prioridade
ECAN	Tempo de processamento quase inexistente mas o tempo de processamento depende do tamanho do código e das técnicas adoptadas	Bom - Até 9 <i>buffers</i> de transmissão nos modos 1 e 2 e baixa probabilidade de atrasos devido a inversões de prioridade

Recepção		
Tráfego	Baixo (<i>duty</i> < 10%)	Elevado (<i>duty</i> > 10%) incluindo mensagens RTR
CAN	Bom - Excelente na decisão	Tempos de processamento elevados e possível sobrecarga devido a um baixo número de <i>buffers</i> (2) filtragem baseada em <i>firmware</i>
ECAN	Tempo de processamento quase inexistente mas o tempo de processamento depende do tamanho do código e das técnicas adoptadas	Bom - Até 8 <i>buffers</i> de recepção nos modos 1 e 2. Sem sobrecarga no modo normal de operação e tratamento automático de mensagens RTR (não é baseado no <i>firmware</i>)

Tabela 3.1: CAN vs. ECAN

3.2.2 Escolha do MCU

Após se conhecerem todas as necessidades deste protótipo, estão reunidos todos os elementos necessários à escolha de um microcontrolador que satisfaça as exigências deste projecto.

No mercado existe uma variedade enorme de microcontroladores e de marcas, tais como a Microchip e a ATMEL, provavelmente os mais conhecidos neste âmbito, pelo que foi necessário estipular alguns requisitos que obedeceram à seguinte ordem decrescente de prioridade:

- Mais memória para programação, devido ao *feedback* que se obteve do protótipo anterior;
- Dois módulos ECAN, para criação de duas redes de comunicação independentes (uma para os sensores inerciais e outra para comunicação entre o *Master* e os *Slaves*);
- Dois módulos UART, para minimizar o tempo de comunicação com os servomotores digitais;
- Tensão de alimentação de 3.3V.

Estes foram os requisitos mínimos para reduzir a extensa lista de microcontroladores disponíveis. Dos restantes, optou-se pelo que tinha menos pinos por dois motivos: facilitar a montagem dos componentes na placa de circuito impresso, atendendo às condições disponíveis, e nenhum dos outros continha alguma característica que de momento interessasse a este projecto no presente ou no futuro.

O resultado final desta selecção levou a quatro “finalistas”, dos quais se escolheu o que possuía maior memória de programação e que não fosse uma solução industrial. Assim, o eleito foi o *dsPIC33FJ128GP706* da Microchip (fig. 3.2).



Figura 3.2: *dsPIC33FJ128GP706* da Microchip

Apresenta-se agora as características deste poderoso MCU na tabela 3.2. Devido à sua designação, *dsPIC*, significa que este microcontrolador é especializado em processamento digital de sinal, deixando uma sensação de descanso quando no futuro for necessário implementar funções matemáticas de elevado grau computacional. A Microchip disponibiliza, inclusive, bibliotecas que maximizam o desempenho deste MCU na execução dessas tarefas matemáticas, como o cálculo de funções trigonométricas.

Características MCU	
Pinos	64
Pinos E/S	53
<i>Programa Memory</i> (KByte)	128
RAM (KByte)	16
16-bit <i>Timer</i>	9
<i>Input Capture</i>	8
<i>Output Compare Std. PWM</i>	8
<i>Codec Interface</i>	1
ADC	2 módulos, 18 canais
UART	2
SPI	2
I ² C™	2
ECAN™	2
<i>Package</i>	TQFP

Tabela 3.2: Características do *dsPIC33FJ128GP706*

3.2.3 Componentes Adicionais

Para efectuar a interacção da melhor maneira possível com os principais dispositivos deste trabalho, era imperativo a escolha de outros componentes para gerar as tensões de alimentação necessárias, amplificar os sinais dos sensores ou criar interface para comunicação através do protocolo de comunicação ECAN.

Os principais objectivos associados ao desenho da placa de circuito impresso foram a criação de uma placa com dimensões reduzidas e com uma tensão de alimentação de 3.3V. Assim, na escolha dos componentes de interface para os dois módulos UART e os dois módulos ECAN do microcontrolador, optou-se no primeiro caso, pelo MAX3223 (fig. 3.3a), que contém dois conversores de nível TTL-RS232 incorporados num só circuito integrado, e no segundo caso por dois SN65HVD232 (fig. 3.3b), que para além de obedecerem aos dois critérios mencionados, já foi utilizado em projectos anteriores e com sucesso.

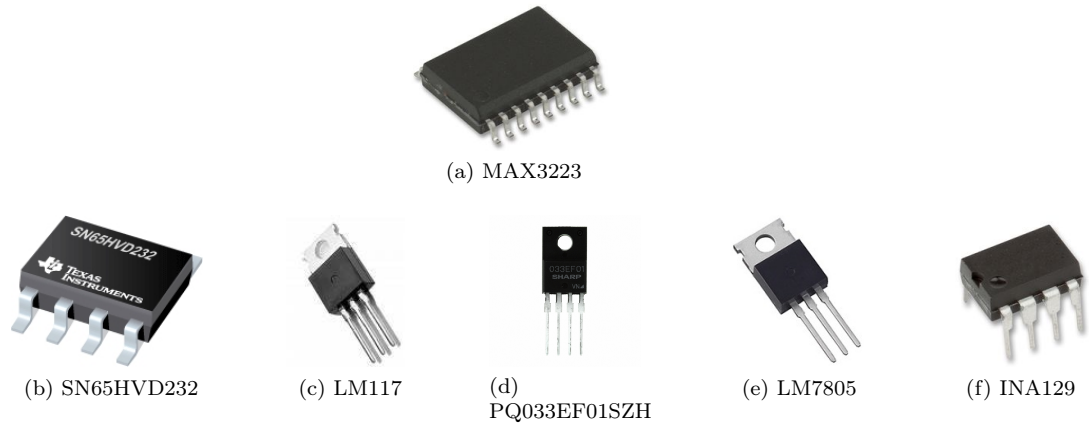


Figura 3.3: Componentes adicionais

Após a escolha de todos os componentes para a placa de circuito impresso, passou-se à idealização da placa branca para testes. Esta terá de incluir os restantes dispositivos que, apesar de não terem sido implementados na placa de circuito impresso, são essenciais para a realização dos ensaios. De resto, esta escolha foi bastante mais simples porque se tentou utilizar componentes existentes no laboratório. Desta pesquisa surgiram os seguintes circuitos integrados:

- LM117 (fig. 3.3c) - regulador de tensão regulável para gerar a tensão de alimentação para os servomotores digitais;
- PQ033EF01SZH (fig. 3.3d) - regulador de tensão 3.3V para alimentação da placa de circuito impresso.

Juntamente com os componentes passivos (conectores, resistências, condensadores), obteve-se todos os componentes para a construção do *hardware* de teste em placa de circuito impresso e placa branca.

A placa de circuito impresso foi desenhada no *software* grátis *Eagle*. Esta foi concebida principalmente por causa do microcontrolador que apenas existe no *package* TQFP. Assim, para além deste, a placa incluiu:

- 1 *transceiver* para os dois módulos UART (MAX3223);
- 2 *transceivers* para as duas redes ECAN (SN65HVD232);
- conectores para outras interfaces.

Os pacotes originais do *EAGLE* não incluem todos estes componentes pelo que foi necessário adquiri-los, sendo que havia duas hipóteses: recorrer à base de dados do *website* do *EAGLE* [18], donde se pode efectuar o *download* de várias bibliotecas disponíveis, ou criar um novo modelo do componente pretendido neste mesmo programa. De todos os necessários, apenas se teve de desenhar o modelo do *transceiver* ECAN, SN65HVD232, em que o resultado é apresentado na figura 3.4a.

Neste processo, começou-se por ler o *datasheet* do componente e verificar qual seria o *package* disponível e mais adequado às necessidades. A única versão existente era do tipo SOIC (*Small-Outline Integrated Circuit*), que também é usado para montagem de superfície. Juntamente com esta informação, retirou-se as suas características físicas, dimensões da cápsula e largura e espaçamento entre pinos. O segundo passo foi desenhar o *package* SOIC usando a ferramenta disponibilizada pelo *EAGLE* que possibilita a criação de bibliotecas de componentes próprios.

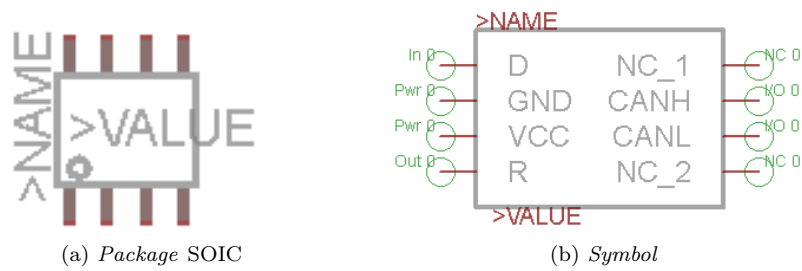
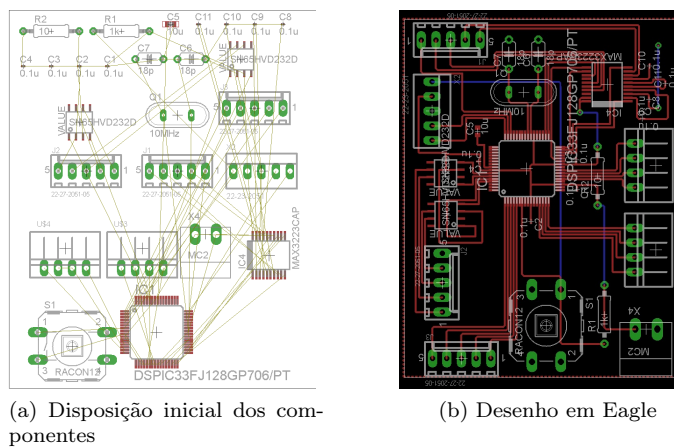


Figura 3.4: Modelo *EAGLE* do SN65HVD232

De modo a se poder utilizar nos esquemas eléctricos, foi necessário criar um outro modelo denominado *Symbol*, diferente do seu aspecto real, mas que facilitasse as ligações nos desenhos eléctricos (fig. 3.4b). Como é possível verificar, esta facilidade advém do facto de a cada pino se poder associar a sua função, desde que bem explícita. Existe ainda a capacidade de se poder trocar a ordem dos pinos, sem que na realidade haja qualquer problema nas ligações, permitindo um esquema eléctrico mais organizado.

O modo como estes dois desenhos se correlacionam é efectuado através duma plataforma do *EAGLE* que permite atribuir a cada pino do modelo *Package* um pino virtual do modelo *Symbol*. Deste modo, enquanto se concebe o esquema eléctrico, não existem preocupações com a disposição física na placa. Com estas duas criações finaliza-se o modelo *EAGLE* do SN65HVD232.



(c) Real

Figura 3.5: Placa de Circuito Impresso

Por conseguinte, pode-se agora iniciar a concepção da placa de circuito impresso, começando pelo esquema eléctrico. Este é baseado em tudo o que já se referenciou anteriormente, ou seja, inclui o microcontrolador e *transceivers* para os módulos UART e ECAN e conectores, para permitir o acesso a outras interfaces do microcontrolador. O resultado é apresentado na figura 3.7.

Utilizando o comando do *EAGLE* “*Switch to board*”, passou-se automaticamente para o ambiente de trabalho onde se escolhe a disposição dos componentes e respectivas ligações na placa real. Neste espaço é necessário estar atento a alguns pormenores como a dimensão dos componentes, a sobreposição de ligações e a tentativa de facilitar a posterior assemblagem, posicionando-os da forma mais conveniente.

Inicialmente, os componentes aparecem desorganizados de acordo com a figura 3.5a. Mas existem duas maneiras de os organizar, automática ou manualmente. No primeiro caso, é necessário a obtenção de uma licença da *EAGLE* que, obviamente, tem custos. Resta portanto a opção que dá mais trabalho, mas que poderá ser a mais eficiente quando o objectivo é reduzir dimensões, para além do facto de se poderem evitar situações que, em assemblagem manual, são difíceis de concretizar. O resultado é apresentado nas figuras 3.5b e 3.5c, sendo que esta última é o “produto” final.

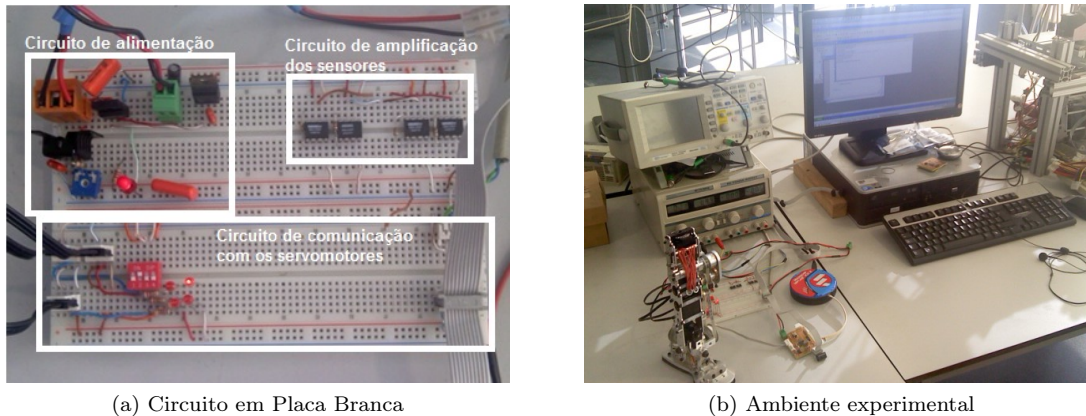


Figura 3.6: Ambiente de teste

Após a concepção da placa de circuito impresso, falta incluir os restantes componentes DIP numa placa branca para completar o sistema idealizado. Na figura 3.6a pode-se verificar a presença dos reguladores que disponibilizam as duas tensões de alimentação necessárias (3.3V e 7.4V) e o canal de comunicações para os servomotores.

Deste modo, fica completo o *hardware* idealizado para os testes dos componentes adquiridos.

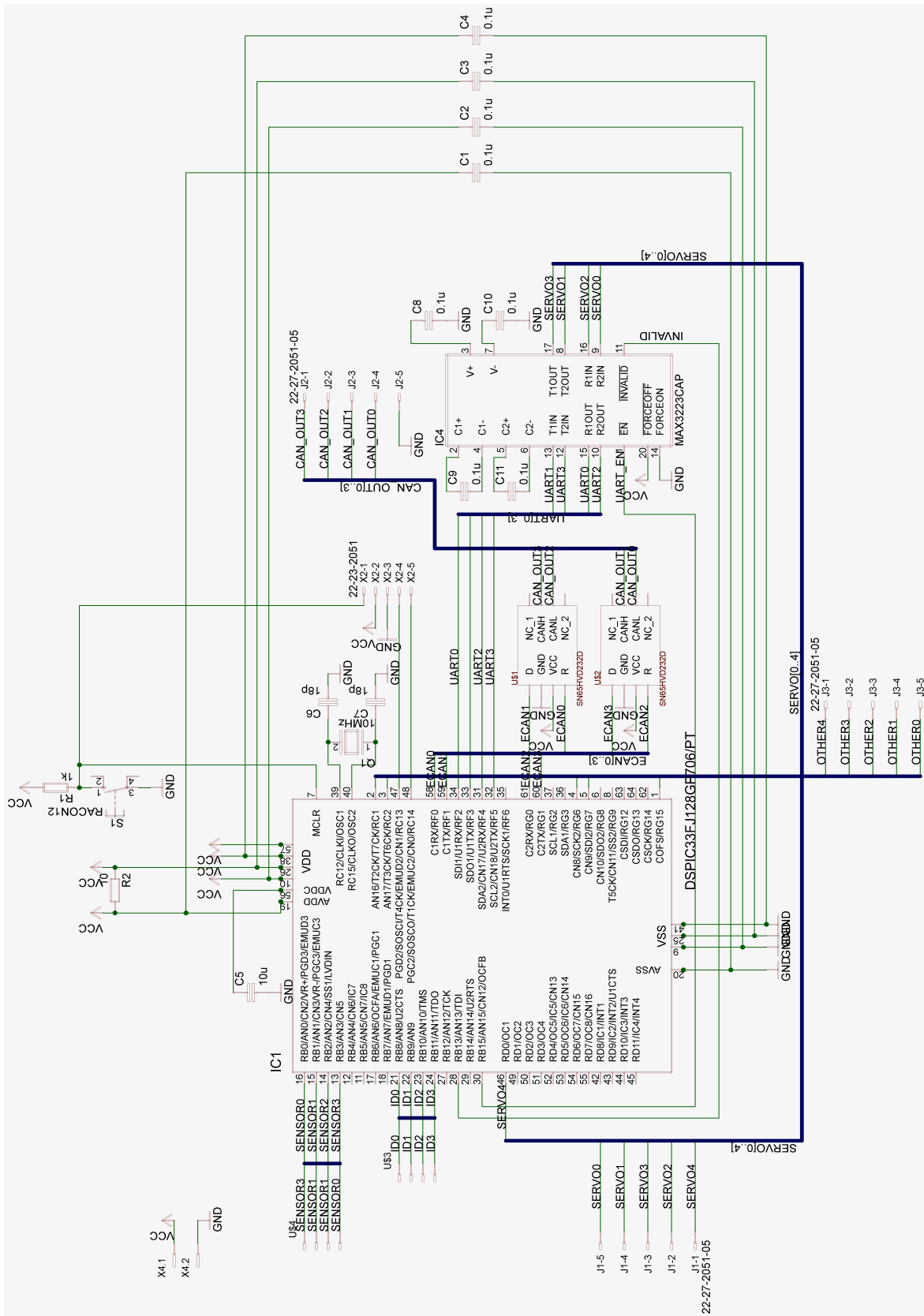


Figura 3.7: Esquema Eléctrico

3.3 Servomotores digitais

Os movimentos realizados por esta plataforma basear-se-ão em actuadores activos. Estes são servomotores maioritariamente digitais, mas também engloba dois motores analógicos.

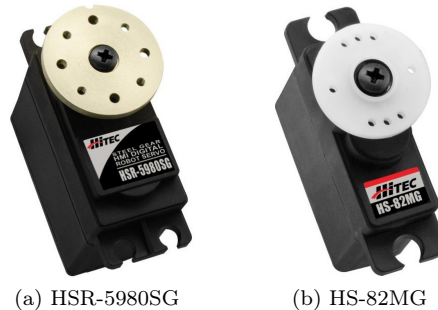


Figura 3.8: Servomotores da Hitec [13]

Os servomotores digitais foram escolhidos devido à facilidade de comunicação nos dois sentidos e pela relação binário-volume. Os analógicos (fig. 3.8b) tiveram como único motivo o seu pequeno tamanho, essencial para a estrutura desenvolvida. A sua localização, que permite a rotação sobre o eixo longitudinal, não exige grandes esforços pelo que apresentam um binário relativamente mais pequeno que os restantes. Este último não terá lugar nesta dissertação por ainda não ter havido necessidade de explorar as suas capacidades.

O servomotor digital escolhido foi o HSR-5980SG da Hitec (fig. 3.8a) porque apresenta uma boa relação entre três exigências que se impunham: binário, dimensões e custo. Este motor não tem núcleo e as suas engrenagens são de metal, o que representa uma desvantagem quando este não contém um dissipador de calor. Logo, é necessário ter precauções na sua utilização, principalmente no seu sobreaquecimento. Algumas características técnicas fornecidas pelo fabricante são apresentadas na tabela 3.3. Esta demonstra os resultados obtidos pelo fabricante em testes efectuados ao servo com tensões de alimentação de 6.0V e 7.4V. Numa secção à frente, demonstrar-se-ão os testes efectuados em laboratório para corroborar estes dados.

Característica Técnica		Mínimo	Máximo
Temperaturas de Operação	°C	-20	+60
Tensão de Alimentação de Teste	V	6.0	7.4
Velocidade	seg/60º	0.17	0.14
Torque máximo	N.m	2.35	2.94
Consumo de corrente (parado)	mA	8	10
Consumo de corrente (em movimento, sem carga)	mA	300	380
Consumo de corrente máximo (com carga)	mA	4200	5200
Dimensões	mm	40x32x37	
Peso	g	70	
Amplitude	º	-90±1	+90±1

Tabela 3.3: Características do servomotor

3.3.1 Modos de Comunicação

O servomotor inclui uma interface criada pela HITEC, denominada *Hitec Multi-protocol Interface* (HMI), que permite a comunicação em três modos de acordo com a duração dos pulsos enviados:

Standard Pulse

O primeiro modo consiste no envio de sinais típicos de PWM (*Pulse-Width Modulation*) com uma duração entre 550µs e 2450µs. Este modo apenas permite mover o servo para uma determinada posição de acordo com a correspondência da fig. 3.9. Fora desta gama de largura de pulso, o servo não efectua qualquer movimento.

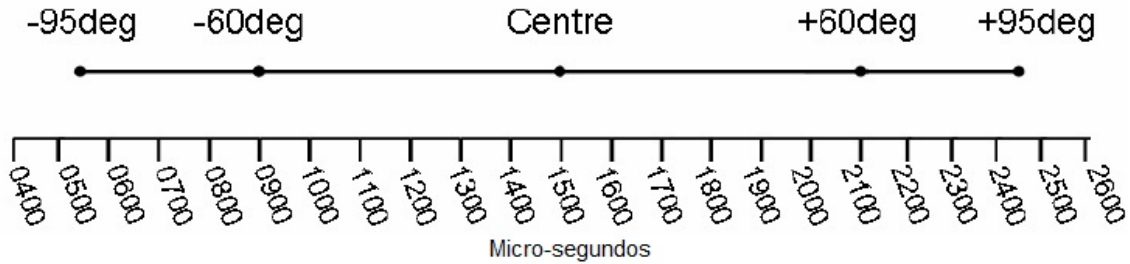


Figura 3.9: Correspondência entre a largura de pulso e posição [15]

É de notar que este modo permite que o servo atinja amplitudes de 190º, contradizendo a folha técnica do fabricante [14]. No entanto, o facto de este modo não permitir obter nenhum tipo de *feedback*, tornou-o inútil para este projecto de acordo com os objectivos pretendidos.

Extended Pulse

O modo *Extended Pulse*, tal como o próprio nome indica, tem um alargamento da modulação do pulso que permite obter uma resposta do servomotor. A comunicação bidireccional processa-se como é ilustrado pela fig. 3.10.

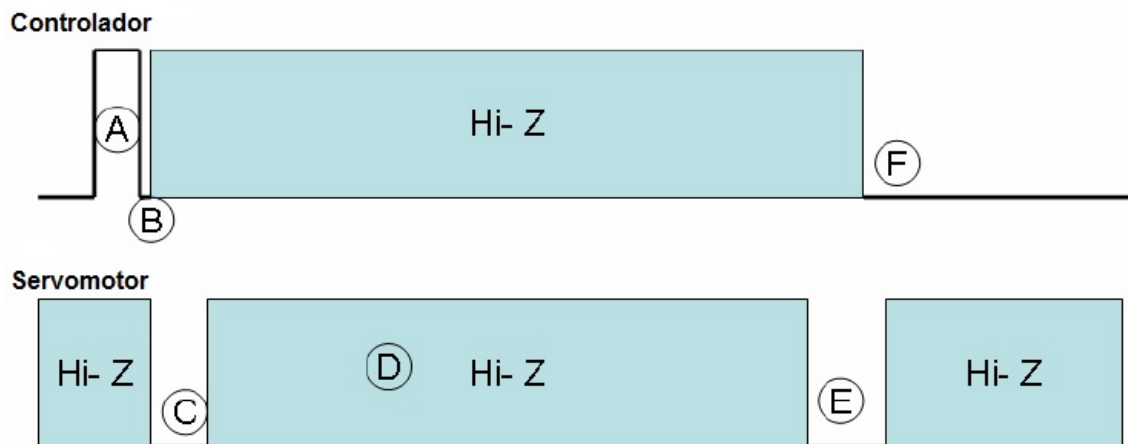


Figura 3.10: Demonstração do modo *Extended Pulse*

As letras representadas na figura têm a seguinte designação:

- A - O controlador envia pulso de 50µs;
- B - O controlador envia *low* durante 2-20µs;
- C - O servomotor reconhece o pulso e põe-se no estado *low* durante 125µs;

D - O servomotor responde com a posição (pulso de 550 a 2450 μ s);

E - Servo envia *low* durante 125 μ s;

F - O controlador reconhece fim da sequência e posiciona-se em *low*.

É ainda possível alterar alguns parâmetros do servomotor, como os ganhos do controlador interno PD (Proporcional-Derivativo) ou a amplitude da banda-morta, sendo apenas necessário que o pulso A tenha para isso os valores 100, 150 ou 200 μ s, consoante se pretende o conjunto de parâmetros 1, 2 ou 3, respectivamente. A informação acerca deste modo é escassa relativamente à alteração deste conjunto de parâmetros e sobre a sua pré-definição.

Embora possibilite algum tipo de *feedback*, este modo apresenta algumas desvantagens, tal como a redução de velocidade e torque máximos que o servomotor pode atingir quando se pede que sejam feitas leituras de posição consecutivas.

Bidirectional Serial Interface

Por último, o modo *Bidirectional Serial Interface* que utiliza o protocolo mais conhecido, o RS-232. Os parâmetros de comunicação são os apresentados na tabela 3.4a e a trama usada é composta por 7 *bytes* (tabela 3.4b).

Parâmetro	Valor
<i>Baudrate</i>	19200
Bits de dados	8
<i>Stopbits</i>	2
Paridade	<i>none</i>
<i>Handshake</i>	<i>none</i>

(a) Parâmetros de Comunicação

<i>byte:</i>	1	2	3	4	5	6	7
controlador:	<i>Startbyte</i>	Comando	Parâmetro 1	Parâmetro 2	<i>Checksum</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>
servomotor:	Alta-Impedância					Retorno1	Retorno2

(b) Trama de comunicação

Tabela 3.4: Protocolo de Comunicação RS-232

O primeiro, *Startbyte*, permite ao controlador do servomotor iniciar a sequência de comandos para recepção de dados e o seu valor está pré-definido como sendo *0x80*. O segundo, Comando, corresponde à tarefa que se pretende que o servomotor desempenhe. O terceiro e quarto bytes são os parâmetros de entrada necessários à realização da tarefa pedida. O quinto, *Checksum*, tem como objectivo a detecção de erros de transmissão e é calculado através da equação 3.1. Por último, o sexto e sétimo *bytes* são utilizados para obter uma resposta do servomotor.

$$\text{Checksum} = 256 - (\text{Startbyte} + \text{Comando} + \text{Parâmetro1} + \text{Parâmetro2}) \% 256 \quad (3.1)$$

Mais à frente explicar-se-á porque é que o servomotor se encontra em alta-impedância nos primeiros 5 *bytes* e a razão do envio dos sexto e sétimo bytes com *0x00*.

Com este modo, é possível, para além do *feedback* de posição, efectuar pelo menos 13 acções conhecidas, dos quais se destacam a oportunidade de estabelecer um número de identificação para

cada servomotor, que possibilita a utilização de vários servomotores num mesmo barramento de comunicação, e de controlar a velocidade instantânea desejada, essenciais para a implementação dos algoritmos desejados. A tabela 3.5 apresenta o conjunto de tarefas conhecidas que podem ser efectuados com a implementação deste protocolo.

Os factos apresentados justificam a escolha deste modo como o protocolo de comunicação com os servomotores.

Comando	Parâmetro1	Parâmetro2	Retorno1	Retorno2	Descrição
<i>id</i> (<i>0..0x7F</i>)	<i>pos_high</i>	<i>pos_low</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>	Indicar posição do servomotor identificado por <i>id</i> , composta por <i>pos_high</i> e <i>pos_low</i>
<i>0xE1</i>	<i>addr</i>	<i>0x00</i>	<i>data</i>	<i>0x03</i>	Ler endereço <i>addr</i> da EEPROM; <i>data</i> é o conteúdo da posição lida
<i>0xE2</i>	<i>addr</i>	<i>data</i>	<i>0x03</i>	<i>0x03</i>	Escrever no endereço <i>addr</i> da EEPROM
<i>0xE3</i>	<i>addr</i>	<i>0x00</i>	<i>data</i>	<i>0x03</i>	Ler endereço <i>addr</i> da RAM volátil; <i>data</i> é o conteúdo da posição lida
<i>0xE4</i>	<i>addr</i>	<i>data</i>	<i>0x03</i>	<i>0x03</i>	Escrever no endereço <i>addr</i> da RAM volátil
<i>0xE5</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>	<i>pos_high</i>	<i>pos_low</i>	Ler posição, composta por <i>pos_high</i> e <i>pos_low</i>
<i>0xE6</i>	<i>pos_high</i>	<i>pos_low</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>	Indicar a posição de todos os servomotores no barramento, composta por <i>pos_high</i> e <i>pos_low</i>
<i>0xE7</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>	<i>version</i>	<i>id</i>	Ler a versão do <i>firmware</i> (<i>version</i>) e a identificação do servomotor (<i>id</i>)
<i>0xE8</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>	<i>pulse-width</i>	<i>voltage</i>	Ler a largura de pulso (<i>pulsewidth</i>) e a tensão aplicada (<i>voltage</i>)
<i>0xE9</i>	<i>id</i> (<i>0..0x7F</i>)	<i>speed</i>	<i>pos_high</i>	<i>pos_low</i>	Indicar velocidade do servomotor identificado por <i>id</i> e ler posição, composta por <i>pos_high</i> e <i>pos_low</i>
<i>0xEA</i>	<i>0x00</i>	<i>1 / 2 / 3</i>	<i>0x03</i>	<i>0x06</i>	Indicar conjunto de parâmetros de controlo
<i>0xEB</i>	<i>0x00</i>	<i>0 / 1</i>	<i>0x03</i>	<i>0x06</i>	Parar / Avançar
<i>0xEF</i>	<i>0x00</i>	<i>0x00</i>	<i>0x03</i>	<i>0x06</i>	Libertar; pára mecanismo de controlo de posição

Tabela 3.5: Conjuntos de comandos

3.3.2 Ligação Eléctrica

O servomotor apresenta apenas uma linha de comunicação, quer para entrada quer para saída de dados. Na sua concepção, optou-se por utilizar uma solução *open-collector*, muito utilizada em circuitos integrados, que substitui as tradicionais saídas em tensão ou corrente. O fabricante não disponibiliza o esquema eléctrico do HSR-5980SG, pelo que se admite que este seja muito idêntico ao do servomotor HSR-8498HB também da Hitec (ver Apêndice A).

Verifica-se que a saída 3 do dispositivo SV1 é a base e o colector de dois transístores bipolares independentes. O pin RX do controlador interno do servomotor encontra-se ligado ao colector do transístor bipolar, que é activado ou desactivado consoante o sinal externo conectado à sua base. No modo de transmissão, invertem-se os papéis, sendo o pin TX do controlador interno a “comandar” o transístor, cujo colector está disponível para o exterior. Externamente, é ainda necessário separar a única linha de comunicação disponível, para conseguir distinguir os dados de entrada e saída. A integração de uma resistência de *pull-up* resolve esse problema, permitindo ao controlador externo funcionar como *master* e, apenas quando este envia um sinal *low*, é que o controlador interno consegue enviar dados fiáveis. Deste modo, os controladores interno e externo, conseguem comunicar através dos seus módulos UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).

Como referido anteriormente na escolha do modo de comunicação, é permitido ligar até 256 (2^8) servomotores a um mesmo barramento devido à possibilidade de lhes atribuir individualmente um número de identificação próprio. Esta ligação é efectuada em paralelo como é representado na figura 3.11.

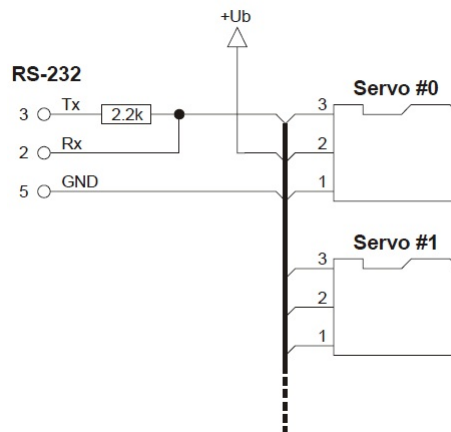


Figura 3.11: Esquema de ligação de vários servomotores

3.3.3 Controlo de Posição e Memórias

O controlador do servo inclui um sistema de controlo de posição permitindo que, ao contrário dos servomotores analógicos, apenas seja necessário enviar um comando para que este se mova e permaneça no lugar desejado. Assim, a figura 3.12 exemplifica como a informação sobre a posição final enviada é tratada. É efectuado um planeamento de trajectória de acordo com a velocidade instantânea estipulada, de modo a que este chegue o mais depressa possível ao destino. A posição é mantida efectuando a leitura interna da posição e actuando em conformidade. O erro máximo de posição é de 1° .

O controlo de posição depende da posição lida anteriormente pelo que é exigido um lugar onde esta possa ser armazenada. Para isso, este controlador inclui duas memórias, uma volátil (do tipo RAM) e outra não-volátil (do tipo EEPROM). A primeira permite salvaguardar dados como a posição e velocidade actuais, posição final e ainda ter uma cópia de uma gama relevante de endereços da EEPROM. A segunda, apenas é acedida quando o motor é inicialmente alimentado, porque o seu acesso é mais lento, e guarda informação sobre as variáveis dos parâmetros de controlo, limitações físicas e identificação do motor.

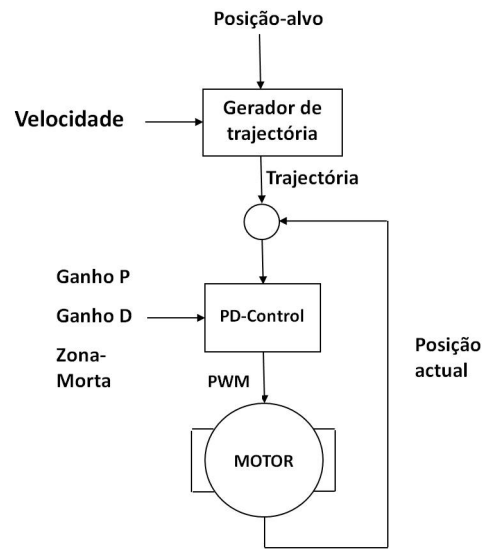


Figura 3.12: Controlo de Posição

3.3.4 Testes

Funções	Parâmetros de Entrada	Parâmetros de Saída	Descrição
<i>initCom.m</i>	<i>void</i>	<i>H</i>	Inicializa a porta para comunicação via RS-232, disponibilizando o objecto da porta <i>H</i>
<i>killCom.m</i>	<i>H</i>	<i>void</i>	Fecha a porta de comunicação <i>H</i>
<i>resetCom.m</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	Reinicializa a porta de comunicação <i>H</i>
<i>setPosId.m</i>	<i>id, pos</i>	<i>return</i>	Indica a posição final (<i>pos</i>) do servomotor identificado por <i>id</i> ; <i>return</i> é o estado da operação
<i>readEeprom.m</i>	<i>addr</i>	<i>data</i>	Lê o endereço <i>addr</i> da EEPROM; <i>data</i> é o conteúdo lido
<i>writeEeprom.m</i>	<i>addr, data</i>	<i>return</i>	Escreve na posição <i>addr</i> da EEPROM; <i>return</i> é o estado da operação
<i>readMem.m</i>	<i>addr</i>	<i>data</i>	Lê o endereço <i>addr</i> da memória volátil; <i>data</i> é o conteúdo lido
<i>writeMem.m</i>	<i>addr, data</i>	<i>return</i>	Escreve na posição <i>addr</i> da memória volátil; <i>return</i> é o estado da operação
<i>readPos.m</i>	<i>void</i>	<i>pos</i>	Lê a posição (<i>pos</i>) do servomotor
<i>setPosAll.m</i>	<i>pos</i>	<i>return</i>	Indica a posição final (<i>pos</i>) para todos os servomotores no barramento; <i>return</i> é o estado da operação
<i>readVersionId.m</i>	<i>void</i>	<i>version, id</i>	Lê a versão do <i>firmware</i> e identificação do servomotor
<i>readPwV.m</i>	<i>void</i>	<i>pw, v</i>	Lê a largura de pulso e tensão aplicadas
<i>setSpeedReadPos.m</i>	<i>id, speed</i>	<i>pos</i>	Indica ao servomotor <i>id</i> a velocidade pretendida (<i>speed</i>); lê a posição actual (<i>pos</i>)
<i>ctrlParamSet.m</i>	<i>param</i>	<i>return</i>	Indica o conjunto de parâmetros pretendidos
<i>goStop.m</i>	<i>set</i>	<i>return</i>	Avança/Pára
<i>release.m</i>	<i>void</i>	<i>return</i>	Liberta; pára mecanismo de controlo de posição

Tabela 3.6: *Scripts* para controlo dos servomotores em *Matlab*

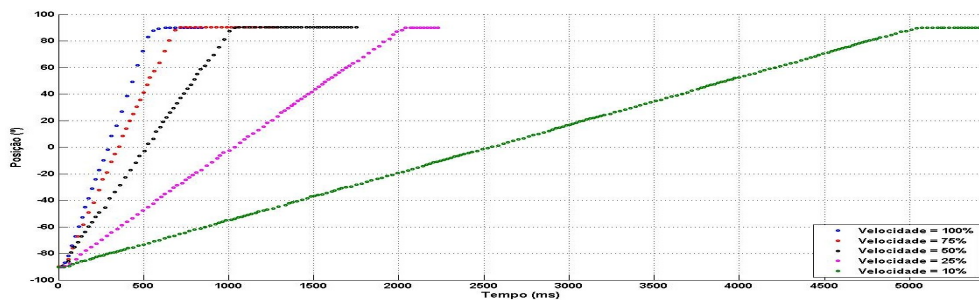
Por forma a validar as informações técnicas facultadas pelo fabricante e verificar se o desempenho dos servomotores correspondia às necessidades da plataforma, decidiu-se efectuar algumas experiências.

Estas seguiram uma ordem de validação em que primeiro se testou o protocolo de comunicação, a execução dos comandos e o *feedback* adquirido. Seguiram-se os testes à sua velocidade e binário fornecidos, tanto no seu desempenho estático como dinâmico, sempre com apenas um servomotor. Por último, incluiu-se múltiplos motores no mesmo barramento e voltou-se a efectuar os mesmos testes. As experiências efectuadas foram realizadas tendo uma ligação directa entre o servomotor e o programa *MATLAB* ou tendo o microcontrolador como intermediário, de modo a efectuar o armazenamento dos dados do movimento e, posteriormente, enviá-los para o programa referido a correr num computador. A tabela 3.6 apresenta os *scripts* desenvolvidos para actuação directa sobre os servomotores e a tabela 4.3 mostra os *device drivers* criados para a comunicação com as várias interfaces.

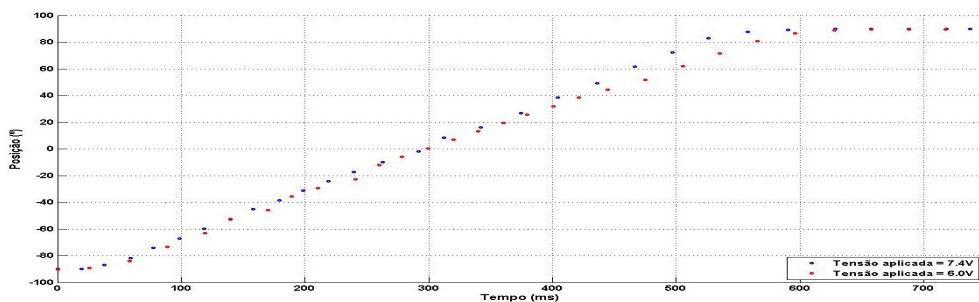
3.3.4.1 Protocolo de Comunicação

Os primeiros testes não apresentaram grandes dúvidas quanto ao seu sucesso. Conseguiu-se efectivamente estabelecer um “diálogo” com o controlador do servomotor digital através do protocolo de comunicação RS-232 seguindo a trama e os parâmetros pré-definidos na tabela 3.4. Uma única excepção foi detectada, relativamente ao comando *0xEF* cuja execução nunca foi bem sucedida. No entanto, este problema não é crítico nem apresenta, para já, alguma utilidade. Ainda é de salientar que a informação relativa à largura de pulso, fornecida através do comando *0xE8*, apesar de aparentar ser válida, não se conseguiu determinar exactamente qual a sua correspondência neste contexto.

3.3.4.2 Desempenhos estático e dinâmico



(a) Com variação da velocidade

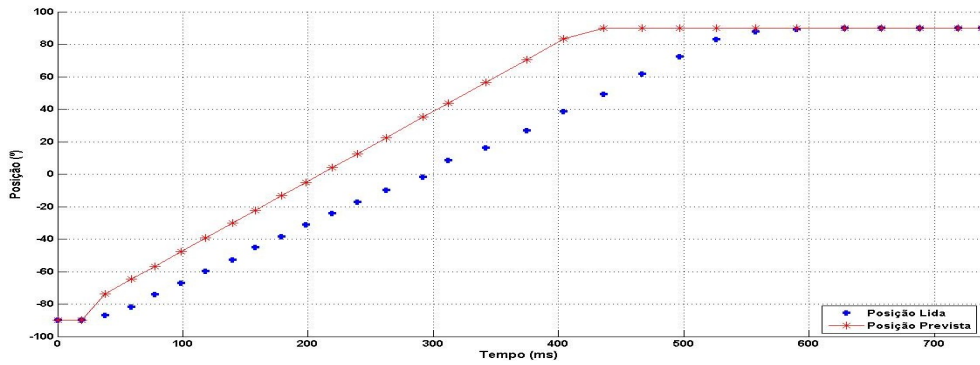


(b) Com variação da tensão de alimentação

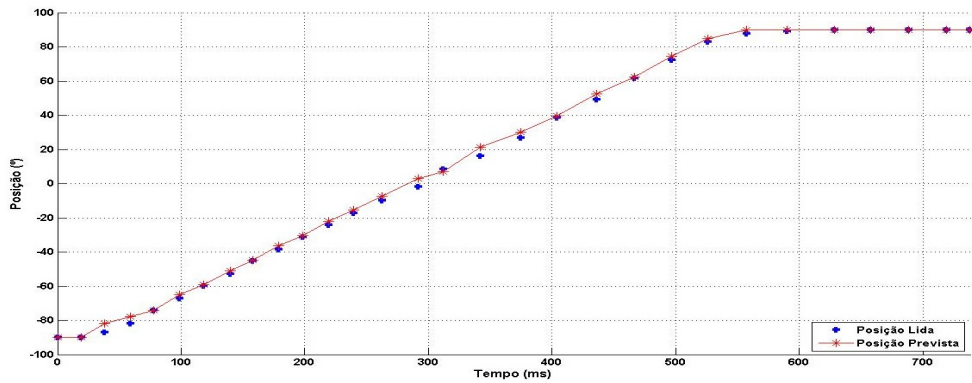
Figura 3.13: Leituras de posição do servomotor

Seguiram-se os testes de desempenho da leitura dos dados relativos à sua posição. As figuras 3.13a e 3.13b representam o movimento do motor, desde a posição -90° até à posição final 90° , com variação da velocidade (100, 75, 50, 25 e 10%) e da tensão de alimentação (6.0 e 7.4V), respectivamente. Uma nota a ter em conta é que a variação da velocidade é efectuada em percentagem pois é assim que o controlador do servomotor recebe a mensagem. Se os valores enviados forem maiores que 100, o controlador interpretará como sendo 100%.

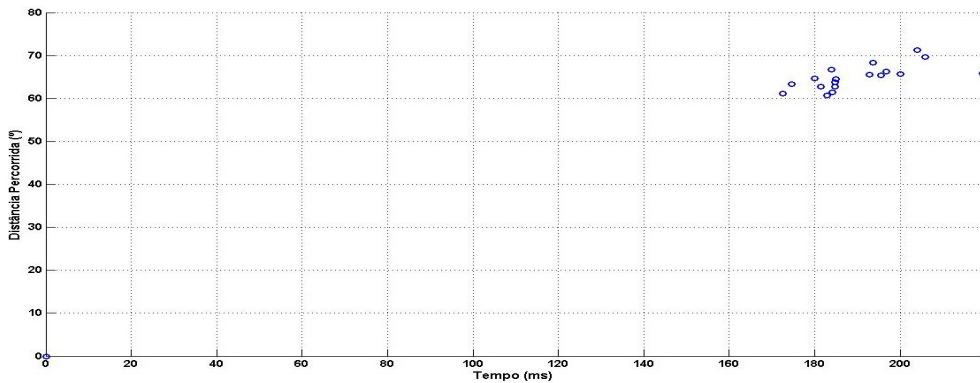
Analisando as figuras, verifica-se que a posição final é a desejada e que quando a velocidade pedida ou a tensão de alimentação diminuem, o tempo de execução do movimento aumenta, como de resto seria de esperar. Pode-se então concluir que o servomotor cumpre a execução dos comandos desejados, quer relativamente à posição final desejada quer em termos do tempo de execução do movimento que varia consoante a velocidade e tensão aplicadas. No entanto, ainda não se pode concluir nada acerca da velocidade máxima.



(a) Comparação com previsão a partir da posição inicial



(b) Comparação com previsão a cada iteração



(c) Tempo para cada 60° percorridos

Figura 3.14: Análise da Velocidade Máxima

Por forma a testar a velocidade máxima, admitiu-se que 100% corresponde à velocidade máxima fornecida pelo fabricante (0.14seg/60° @ 7.4V) e fez-se o planeamento da trajectória baseada nesse dado. Nas figuras 3.14a, 3.14b e 3.14c, verifica-se que o servomotor não cumpre exactamente com o que é estipulado pelo fabricante.

A primeira, pretende fazer a comparação entre a trajectória efectuada pelo servomotor real e a trajectória pretendida segundo a velocidade máxima teórica desde que o movimento é iniciado na posição -90°. A segunda, demonstra a posição em que o servomotor deveria estar, baseando-se na posição lida do servomotor real na iteração exactamente anterior e na diferença de tempo entre iterações. Estas duas figuras, já demonstram que existe um erro associado à velocidade máxima, mas ainda nada se pode concluir, quantitativamente. Se se analisar com cuidado, pode-se descortinar que

o movimento não é linear no seu arranque e na chegada à posição final. Esta constatação significa, como esperado, que o planeamento de trajectória do controlador interno do servomotor inclui um tempo de aceleração e desaceleração no seu movimento. Este facto justifica parte da discrepância nas trajectórias. Por último, apresenta-se um gráfico onde é de todo evidente que o servomotor não cumpre os requisitos máximos. Este confronta a distância percorrida, em graus, e o tempo que demorou a percorrê-la, onde é possível concluir que a velocidade máxima teórica de $0.14 \text{ seg}/60^\circ$ nunca chega a ser atingida, sendo que o menor erro é de aproximadamente 30 ms.

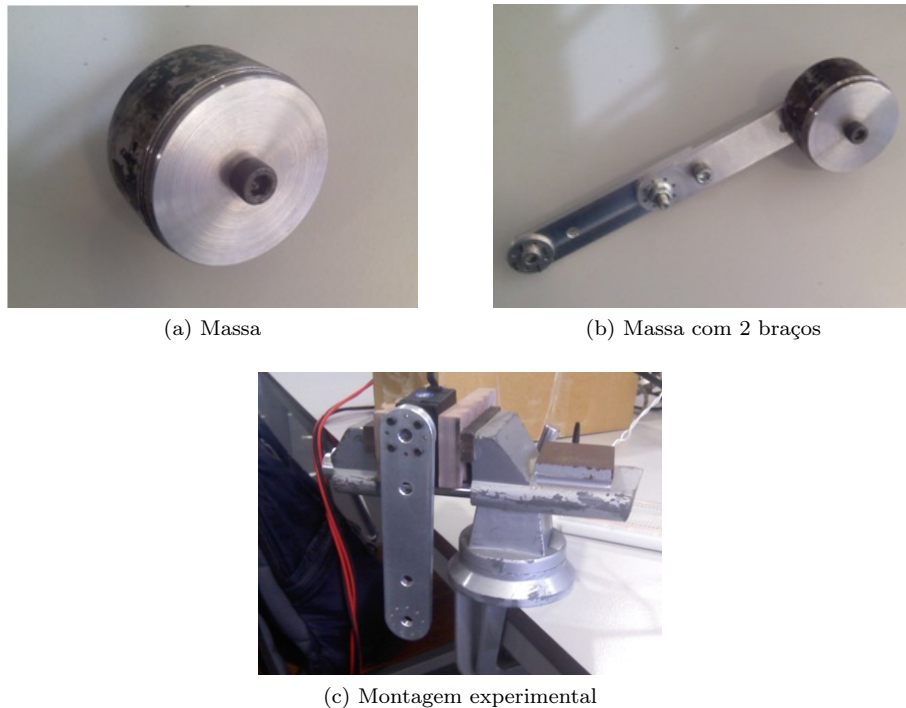
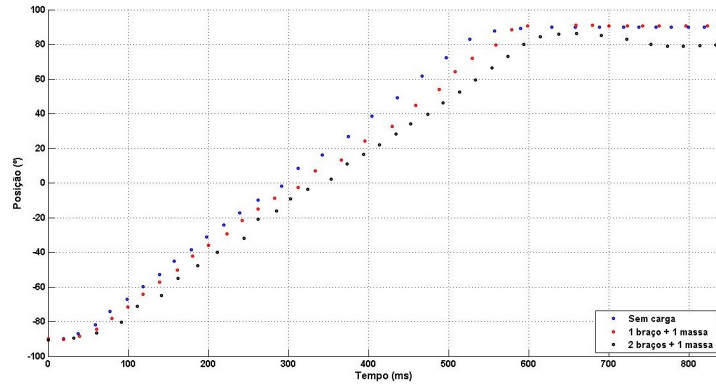


Figura 3.15: Acessórios para ensaios

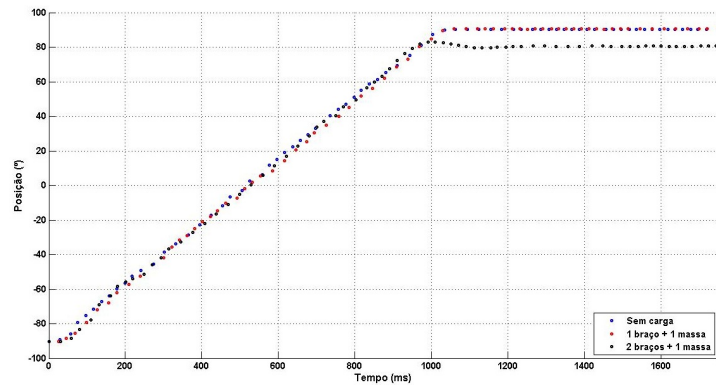
De seguida, apresenta-se os ensaios efectuados para testar o binário disponível. Relembra-se que o fabricante indica como máximos os seguintes binários: $2,35 \text{ N.m @ } 6,0\text{V}$ e $2,94 \text{ N.m @ } 7,4\text{V}$. Esta experiência teve como acessórios dois braços de 10 cm e uma massa de 400g (fig. 3.15). A conjugação destes três acessórios permite que se obtenham forças superiores sobre o eixo de rotação do servomotor sem ser necessário massas com valor superior. Fez-se então alguns testes com o servomotor nas seguintes condições: sem carga, com um braço e uma massa, e com dois braços e uma massa, originando momentos de força de 0 N.m, 0,39 N.m e 0,68 N.m, respectivamente (fig. 3.16).

Por análise da figura 3.16a, cujo ensaio foi efectuado à velocidade máxima, verifica-se que com o aumento da carga o movimento é ligeiramente retardado. Logo, prova-se que o aumento da força sobre o eixo implica a redução da velocidade. É necessário referir que na última experiência, ou seja, no ensaio realizado com 2 braços e uma massa, optou-se por apenas pedir que a posição final fosse 80° em vez dos 90° pedidos nos restantes testes. Esta alteração surgiu de modo a precaver possíveis danos se se forçasse a posição extrema à velocidade máxima e com uma carga algo elevada. É de resto observável na comparação efectuada, que existe um aumento da percentagem de sobre-elevação e do tempo de estabelecimento da posição final. Tal facto deve-se à força inercial exercida pela massa que impede a paragem repentina do movimento de rotação.

No entanto, na figura 3.16b nenhum dos problemas anteriormente apontados se verifica, que significa que, com a redução da velocidade, não é perceptível qualquer tipo de problema no movimento efectuado. Este é um dado importante porque a plataforma necessita que os servomotores executem movimentos suaves sem grandes oscilações que pode ser conseguido com velocidades ligeiramente abaixo dos limites máximos.



(a) À velocidade máxima



(b) A 50% da velocidade máxima

Figura 3.16: Ensaios com cargas diferentes

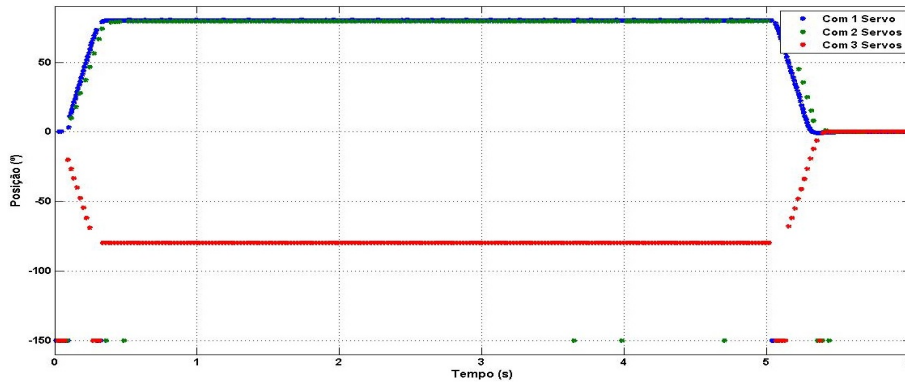
3.3.4.3 Partilha do barramento

Para finalizar os testes aos servomotores digitais, falta confirmar o seu bom desempenho quando o barramento de comunicações é partilhado por vários servomotores. Esta experiência é crucial para o sucesso dos futuros algoritmos a serem implementados, se estes se basearem no *feedback* de posição do servomotor, ou seja, se se pretender desenvolver um sistema de controlo em malha fechada.

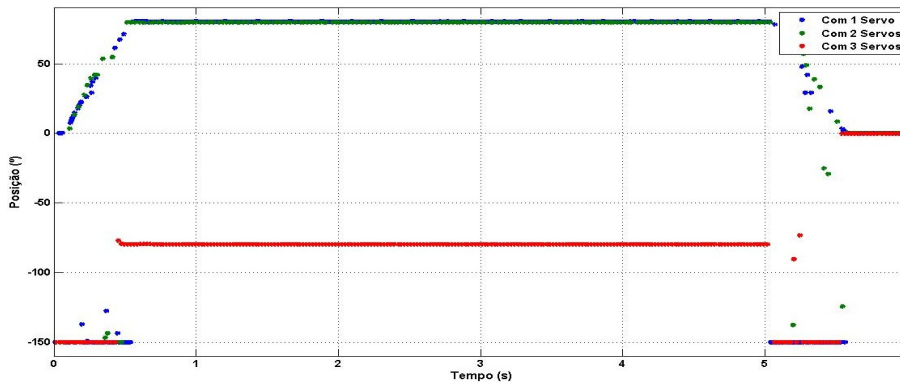
Os servomotores foram interligados de acordo com o circuito eléctrico apresentado na figura 3.11. Como referido anteriormente, os servomotores têm uma memória EEPROM que permite atribuir e salvar, previamente, uma identificação única. Teoricamente, tal possibilidade permitirá que não haja sobreposição de mensagens de resposta desde que estas não sejam gerais, ou seja, não indiquem explicitamente a quem são dirigidas.

De modo a validar este critério, foi-se aumentando o número de servomotores no barramento até três, número máximo de actuadores activos que se pretende que estejam atribuídos a cada unidade controladora, e executou-se um movimento ascendente e descendente com várias velocidades. Os resultados apresentados na figura 3.17 foram obtidos com os servomotores embutidos na perna do humanóide, ou seja, sujeitos às forças de atrito e inerciais das polias e correias de transmissão.

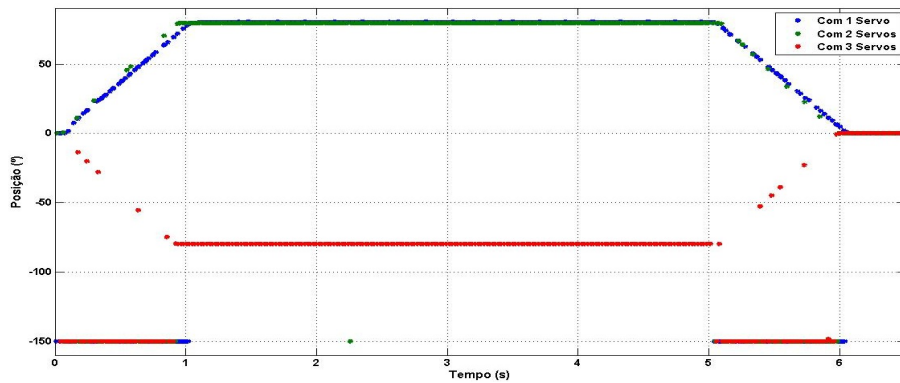
Nos ensaios anteriores não se notou qualquer tipo de problema nas respostas do servomotor aos pedidos efectuados, pelo que era expectável mais um teste bem sucedido. Tal não sucedeu como é possível concluir da análise das figuras 3.17a, 3.17b e 3.17c. Estas figuras representam o movimento de um servomotor de 0° até $-80^\circ/80^\circ$ e o seu retorno a 0° , sozinho e quando partilha o barramento com outros e com variação da velocidade.



(a) Velocidade a 100%



(b) Velocidade a 50%



(c) Velocidade a 25%

Figura 3.17: *Feedback* de posição quando o barramento de comunicação é partilhado

Um acontecimento comum a todos os ensaios foi o facto de haver bastantes pontos a -150° que significam a falha da resposta dos servomotores. Este valor apenas pode ser obtido quando a resposta é o conjunto de dois bytes nulos, situação que não pode acontecer quando se pede a posição actual, porque esta varia entre 600 e 2400 no conjunto dos dois bytes, como referido na secção 3.2.2.. Se

se adicionar o facto de estes pontos serem mais recorrentes quando é efectuada a rotação, pode-se sugerir uma justificação para estes resultados: o controlador interno do servomotor funciona com prioridades, dando prioridade ao mecanismo de controlo de posição em detrimento da resposta ao pedido externo. Esta sugestão não é possível de corroborar sem conhecer o seu *firmware*. No entanto, por análise estatística da tabela 3.7 conclui-se que para os três casos a percentagem de sucesso é bastante semelhante o que vai contra a teoria de que o erro aumenta com o acréscimo de servomotores no barramento. Esta é uma situação que terá de ser melhor analisada, pois poderá ser apenas uma questão eléctrica.

Servos no Barramento	Pedidos de Leitura	Leituras Falhadas	Percentagem de Sucesso
1	871	190	78,19
2	439	109	75,17
3	292	70	76,03

Tabela 3.7: Análise estatística da partilha do barramento

Para além deste acontecimento, pode-se verificar que, por vezes, surgem outros erros de leituras, como na figura 3.16b. Isto pode-se tornar um problema grave se se tornar frequente, porque alguns algoritmos que se pretendem implementar dependem da posição em cada iteração.

Este último e decisivo ensaio não correu como esperado, no entanto, com o decorrer do trabalho poder-se-ão tirar outras conclusões e determinar se estes servomotores foram uma boa escolha.

3.4 Discussão de Resultados

Neste capítulo apresentou-se os componentes adquiridos e respectivos ensaios para esta nova plataforma humanóide, sendo que os resultados obtidos foram satisfatórios.

A placa de circuito impresso e a placa branca, bem como os componentes integrados, não têm criado qualquer tipo de problemas resultantes da sua concepção. No entanto, um pequeno detalhe tem que ser salientado que é o facto de ser necessário a utilização de fontes independentes para alimentar os servomotores e os restantes componentes. Quando o servomotor efectua qualquer tipo de movimento, gera picos de consumo de corrente eléctrica para o qual as fontes de laboratório não estão preparadas, roubando energia aos restantes componentes e provocando o seu reinício.

Quanto aos servomotores, estes demonstraram boa definição de posição não excedendo o erro referido pelo fabricante de 1^o. Quanto à sua velocidade máxima, este não parece respeitar o que foi teoricamente dado como correcto, no entanto, não é de modo algum uma contrariedade para este projecto. Já o facto de a percentagem de erro de leituras andar em torno dos 25% poderá ser um contratempo na implementação de algoritmos de realimentação de posição.

Capítulo 4

Integração dos Sistemas Sensorial e Motor

4.1 Introdução

O trabalho descrito até agora foi efectuado com o propósito de implementar algoritmos de controlo para locomoção da plataforma humanóide. Neste capítulo aborda-se a integração dos diversos componentes desenvolvidos, definindo assim os sistemas sensorial e motor. Em primeiro lugar, derivam-se os modelos matemáticos que suportam um simulador do movimento e levaram à implementação de módulos de *software* executados no microcontrolador. Depois descreve-se os testes experimentais efectuados com uma perna do protótipo com apenas três GdL, que validam as soluções de engenharia propostas. De seguida, apresenta-se os sensores de força adquiridos e avalia-se o seu desempenho estático e dinâmico, bem como a obtenção de uma estimativa do centro de pressão, que se pretende que sejam usados em algoritmos de controlo mais avançados com realimentação de força.

4.2 Modelação de uma perna

Nesta secção descrevem-se os modelos cinemáticos derivados no âmbito desta dissertação que permitem a simulação da perna do robô humanóide. O simulador utilizado foi anteriormente realizado, tendo as suas ferramentas computacionais sido validadas [3], permitindo actualmente a adaptação e integração de modelos matemáticos. A perna simulada está de acordo com a realidade, sendo composta por três elos mecânicos rígidos (pé-tornozelo, tornozelo Joelho e Joelho-anca) interligado por juntas rotacionais do tornozelo (junta esférica em que os eixos se intersectam no mesmo ponto) e Joelho. A figura 4.1 ilustra o modelo da perna com 3 GdL e a atribuição do sistema de coordenadas cartesianas (x_e, y_e, z_e) e dos restantes sistemas de eixos até ao elemento terminal, coincidente com a anca.

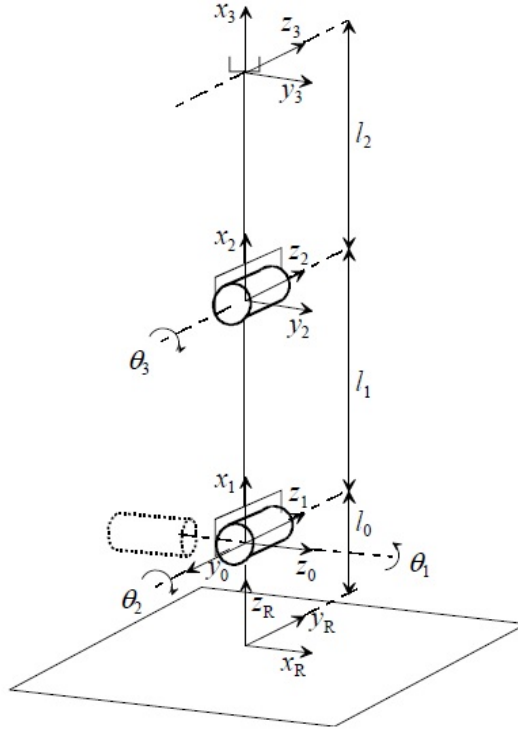


Figura 4.1: Modelo da perna com 3 GdL

4.2.1 Cinemática Directa

A cinemática directa calcula a posição no sistema de coordenadas cartesianas de referência em função das posições angulares das juntas. A simplicidade deste modelo levou à escolha do procedimento sistemático que se baseou na convenção de Denavit-Hartenberg [19], sendo que os seus parâmetros são representados na tabela 4.1.

Elo i	θ_i	d_i	l_i	a_i
1	θ_1	0	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	l_1	0
3	θ_3	0	l_2	0

Tabela 4.1: Parâmetros de Denavit-Hartenberg

O cálculo das equações da cinemática directa assenta num procedimento recursivo obtido a partir de produtos das contribuições de cada grau de liberdade. Neste caso concreto, a derivação da cinemática directa de posição resulta na expressão 4.1 que usa a notação simplificada s_i e c_i para $\sin(\theta_i)$ e $\cos(\theta_i)$, respectivamente.

$$p^3 = \begin{bmatrix} l_1 s_2 + l_2 s_{23} \\ -l_1 s_1 c_2 - l_2 s_1 c_{23} \\ l_0 + l_1 c_1 c_2 + l_2 c_1 c_{23} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

O passo seguinte foi avançar para a derivação da cinemática diferencial que estabelece a relação entre a velocidade nas juntas e a correspondente velocidade linear do elemento terminal. Este mapeamento pode ser descrito por uma matriz designada por matriz do Jacobiano que depende, em cada

momento, da configuração do robô. O Jacobiano é uma ferramenta muito importante para caracterizar o sistema articulado e será usado mais adiante (Secção 4.3) para obter uma solução para a cinemática inversa. O cálculo da matriz 4.2 foi realizado pela diferenciação das equações de cinemática directa em ordem às variáveis das juntas.

$$J_{ET} = \begin{bmatrix} 0 & l_1 c_2 + l_2 c_{23} & l_2 c_{23} \\ -l_1 c_1 c_2 - l_2 c_1 c_{23} & l_1 s_1 s_2 + l_2 s_1 s_{23} & l_2 s_1 s_{23} \\ -l_1 s_1 c_2 - l_2 s_1 c_{23} & -l_1 c_1 s_2 - l_2 c_1 s_{23} & -l_2 c_1 s_{23} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Finalmente, calcularam-se as coordenadas do centro de massa da estrutura e a respectiva matriz do Jacobiano, apresentadas nas expressões 4.3 e 4.4, respectivamente, em que m_0 , m_1 e m_2 são as massas de cada elo, r_1 , r_2 , CM_{0x} e CM_{1y} as diversas componentes do centro de massa e M_t a massa total da perna do robô humanóide.

$$COG = \frac{1}{M_t} \begin{bmatrix} m_0 CM_{0x} + m_1 r_1 s_2 + m_2 (l_1 s_2 + r_2 s_{23}) \\ -m_1 (r_1 s_1 c_2 + CM_{1y} c_1) - m_2 (l_1 s_1 c_2 + r_2 s_1 c_{23}) \\ m_0 CM_{0x} + m_1 (l_0 + r_1 c_1 c_2 + CM_{1y} s_1) + m_2 (l_0 + l_1 c_1 c_2 + r_2 c_1 c_{23}) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$J_{COG} = \frac{1}{M_t} \begin{bmatrix} 0 & m_1 r_1 c_2 + m_2 (l_1 c_2 + r_2 c_{23}) & m_2 r_2 c_{23} \\ -m_1 (r_1 c_1 c_2 + CM_{1y} s_1) - m_2 (l_1 c_1 c_2 + r_2 c_1 c_{23}) & m_1 r_1 s_1 s_2 + m_2 (l_1 s_1 s_2 + r_2 s_1 s_{23}) & m_2 r_2 s_1 s_{23} \\ -m_1 (r_1 s_1 c_2 - CM_{1y} c_1) - m_2 (l_1 s_1 c_2 + r_2 s_1 c_{23}) & -m_1 r_1 c_1 s_2 - m_2 (l_1 c_1 s_2 + r_2 c_1 s_{23}) & -m_2 r_2 c_1 s_{23} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Os parâmetros usados no simulador, incluindo os centros de massa, foram obtidos a partir de um modelo realista desenvolvido em CATIA¹ [12]. A tabela 4.2 resume os valores usados para os comprimentos dos elos mecânicos e as respectivas massas.

Elo i	l_i (cm)	m_i (kg)
1	5.0	0.440
2	13.9	0.343
3	14.3	0.409

Tabela 4.2: Comprimentos dos elos mecânicos e respectivas massas

4.2.2 Cinemática Inversa

Por sua vez, o problema da cinemática inversa consiste na determinação do vector das juntas correspondentes a uma dada posição e orientação do elemento terminal. Para o robô com 3 GdL, as equações de cinemática inversa de posição foram obtidas, na forma fechada, por manipulação das equações de cinemática directa. O problema da redundância na junta do joelho foi resolvido uma vez que não é permitida a inversão do movimento. A solução deste problema é muito importante porque permite transformar as especificações de movimento definidas no espaço Cartesiano para os correspondentes movimentos no espaço das juntas onde são executados os movimentos desejados. Tendo em vista as tarefas de planeamento e controlo do movimento, é importante relembrar que os servomotores incluem um algoritmo de planeamento de trajectórias que geram as referências de entrada (nas juntas) para o sistema de controlo interno. O problema do controlo no espaço das juntas é articulado em dois passos: (1) calcula-se a cinemática inversa para transformar os requisitos de movimento no

¹Computer Aided Three Dimensional Interactive Application

espaço operacional (e.g., elemento terminal ou centro de massa) para o espaço das juntas, e (2) o controlador de baixo nível permite o seguimento das referências de entrada. Contudo, esta solução apresenta duas limitações essenciais. Por um lado, um esquema baseado no espaço das juntas não influencia as variáveis do espaço Cartesiano que são controladas em “malha aberta”, o que implica perda de precisão. Por outro lado, o desempenho dos servos.

Deste modo, foi levada em linha de conta a necessidade de controlo de trajectória no espaço Cartesiano cuja implementação *software* difere do controlo ponto-a-ponto em que apenas interessa a posição final. Nesta linha de ideias, foram explorados vários algoritmos de cinemática inversa em malha fechada que, uma vez combinados em cascata com os controladores de baixo nível proporcionados pelos servomotores, devem permitir dotar o sistema de maior robustez. A figura 4.2 ilustra a ideia de introduzir uma malha externa de controlo que fecha através da unidade slave.

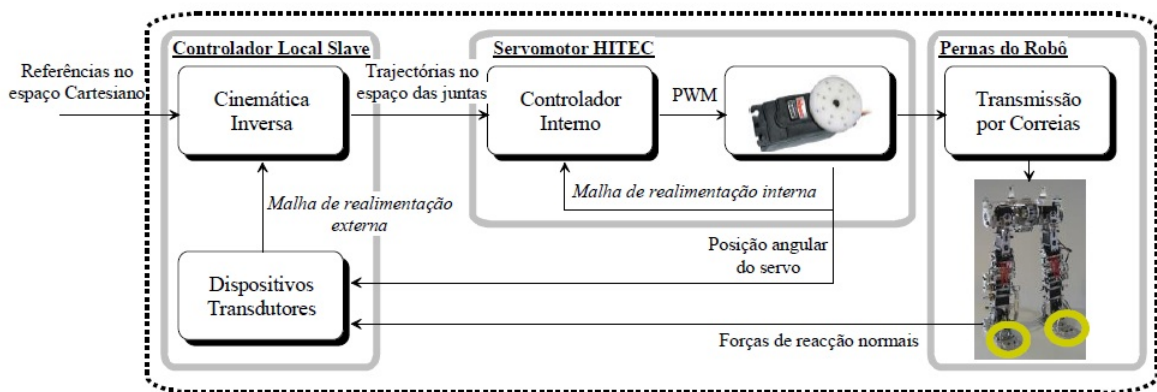


Figura 4.2: Diagrama de blocos da estrutura de controlo em cascata

De seguida, apresentam-se os algoritmos de cinemática inversa implementados e que transformam o espaço Cartesiano no espaço das juntas através de uma malha de realimentação. Naturalmente, existem inúmeras soluções possíveis que podem ser derivadas a partir do esquema geral da figura 4.2. Mais concretamente, a relação entre a velocidade nas juntas e o erro entre a posição desejada e actual do elemento terminal e permitem obter algoritmos com diferentes desempenhos [19]. Entre os métodos implementados destaque para a utilização do Jacobiano inverso e a aproximação baseado no Jacobiano transposto. O algoritmo de cinemática inversa com o Jacobiano inverso é expressa pela expressão 4.5:

$$\dot{q} = J^{-1}(x_d + Ke) \quad (4.5)$$

em que J^{-1} é a matriz inversa do Jacobiano, x_d a velocidade desejada da variável cartesiana especificada (elemento terminal ou centro de massa) e K é uma matriz diagonal de ganhos que asseguram a estabilidade do algoritmo. Um algoritmo computacionalmente mais eficiente é baseado no Jacobiano transposto (expressão 4.6):

$$\dot{q} = J^T Ke \quad (4.6)$$

em que J^T é o transposto da matriz Jacobiano e K é uma matriz diagonal escolhida de forma a assegurar a estabilidade. Um outro método alternativo é proposto em que a transformação para o espaço das juntas é realizada tendo em conta o erro entre a posição desejada e a actual do centro de pressão (COP) nas direcções x e y e o erro entre a altura desejada e a actual do centro de massa. A

lei de controlo pode ser escrita na forma apresentada na expressão 4.7:

$$\dot{q} = J_{COG}^T K \begin{bmatrix} COP_d^x - COP^x \\ COP_d^y - COP^y \\ COP_d^z - COP^z \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A especificação do movimento envolve agora o planeamento de trajectória do centro de pressão desejado e, ao mesmo tempo, é necessário estimar a sua localização actual. Apesar dos resultados preliminares já obtidos, são necessários estudos adicionais para demonstrar a convergência do algoritmo. De referir ainda que, nesta dissertação, não se procederam aos estudos de avaliação do melhor compromisso entre a precisão do modelo cinemático e o peso computacional (tempo real).

4.2.3 Software desenvolvido

De modo a se poder produzir os ensaios necessários para comparação com os resultados do simulador, foi necessário desenvolver *device drivers* e código fonte adequado para introduzir a unidade controladora, de modo a também esta ser testada. Assim, desenvolveu-se código para algumas interfaces do microcontrolador que se sabia serem necessárias (tabela 4.3).

Módulo	Cabeçalho da Função ($x = 1,2$)
ADC	<pre>void configADCx(unsigned int andigport, unsigned int scanport, unsigned int con1cfg, unsigned int con2cfg, unsigned int con3cfg, unsigned int con4cfg); void openADCx(void); void convertADCx(void); boolean busyADCx(void); void closeADCx(void); unsigned int readADCx(unsigned char buffIndex); void setChADCx(unsigned int ch123, unsigned int ch0); void configIntADCx(unsigned int adcprior);</pre>
DMA	<pre>void initDMA0(unsigned int address); void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _DMA0Interrupt(void);</pre>
TIMER 1	<pre>void openTmr1(unsigned int config, unsigned int period); void configIntTmr1(unsigned int config); void closeTmr1(void); unsigned int readTmr1(void); void writeTmr1(unsigned int timer); void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _T1Interrupt(void);</pre>
UART	<pre>void openUARTx(unsigned long fcy, unsigned int baud, unsigned int config); void closeUARTx(void); void configIntUARTx(unsigned int rxprior, unsigned int txprior); boolean busyUARTx(void); boolean dataRdyUARTx(void); void getsUARTx(unsigned char * buffer); void putsUARTx(unsigned char * buffer); unsigned char readUARTx(void); void writeUARTx(unsigned char data); unsigned int getIntUARTx(void); void putIntUARTx(unsigned int val); unsigned int getHexUARTx(void); void putHexUARTx(unsigned int val);</pre>

Tabela 4.3: *Device Drivers* para MCU

Para testar a implementação dos algoritmos de cinemática na perna real também foi necessário conceber código que interpretasse as expressões da Secção anterior e cujos cabeçalhos das funções são

apresentados na tabela 4.4. Nem todas as funções foram para já utilizadas, mas ainda assim foram criadas para facilitar o trabalho futuro.

Cabeçalho da Função	Descrição
<code>unsigned char invKin3dof(double xe, double ye, double ze, double * q0, double * q1, double * q2);</code>	Calcula posição angular das juntas com base nas coordenadas cartesianas da anca
<code>void invKinDiff3dof(double q0, double q1, double q2, double dr0, double dr1, double dr2, double * dq0, double * dq1, double * dq2);</code>	Calcula velocidade a aplicar às juntas
<code>void dirKin3dof(double * x, double * y, double * z, double q0, double q1, double q2);</code>	Calcula as coordenadas cartesianas da anca com base nas posições angulares das juntas
<code>void polyTrajGenerator(clock_t t, clock_t tf, double posi, double posf, double veli, double velf, double * pos, double * vel, double * ace);</code>	Efectua o planeamento da trajectória
<code>void robCOG(double q0, double q1, double q2, double * COGx, double * COGy, double * COGz);</code>	Calcula o centro de massa

Tabela 4.4: Funções para implementação dos algoritmos de cinemática inversa

4.3 Controlo experimental de uma perna

Como referido anteriormente, os algoritmos que se pretendem implementar nesta plataforma humanóide baseiam-se na cinemática do movimento humano. No entanto, nesta dissertação apenas houve lugar para testar uma das pernas da estrutura com um primeiro e simples algoritmo, que se baseia na implementação directa de uma variante da cinemática, a cinemática inversa.

Os maiores receios prendiam-se exactamente com a resolução da fórmula matemática inerente à cinemática inversa, que inclui expressões complexas, ao nível do controlador local. Foi precisamente neste aspecto que se validou a utilização deste microcontrolador, que para além de apresentar soluções de *software* eficazes, como a possibilidade de resolver quaisquer funções trigonométricas, não demonstrou qualquer tipo de comportamento temporal defeituoso na sua execução.

Para se ter um termo de comparação entre o movimento real da perna e o que esta deveria realizar, utilizou-se um simulador [3] já existente em *Matlab*, criado com o objectivo de simular os movimentos da primeira plataforma humanóide, onde apenas foi necessário alterar alguns parâmetros físicos e isolar o membro pretendido, ou seja, a perna. Assim já é possível fazer uma previsão do movimento que é suposto ser observado na realidade.

Neste ensaio efectuou-se primeiro um simples movimento de agachamento. Lembra-se que na Secção 2.2.2 “A plataforma humanóide actual” se referiu a existência de um sistema de transmissão que gera ganhos de binário, mas que retira amplitude no movimento angular das juntas. Apesar de estar de acordo com as limitações físicas do ser humana, a utilização deste tipo de servomotores, com 180° de amplitude máxima, em conjugação com este sistema de transmissão, restringe os movimentos da perna. O exemplo mais óbvio é no movimento de agachamento, onde através da cinemática inversa se consegue alcançar alturas da anca mais baixas do que as da figura 4.3b. Esta representa a altura mínima da anca num movimento de agachamento puramente longitudinal, o que é manifestamente pouco. Esta limitação é principalmente causada pela junta do tornozelo que apenas permite um movimento angular de $22,5^\circ$, relativamente ao eixo longitudinal.

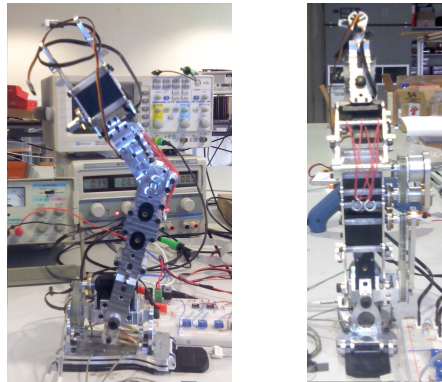
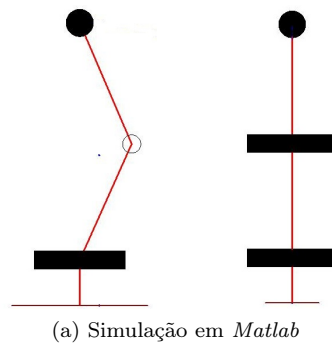
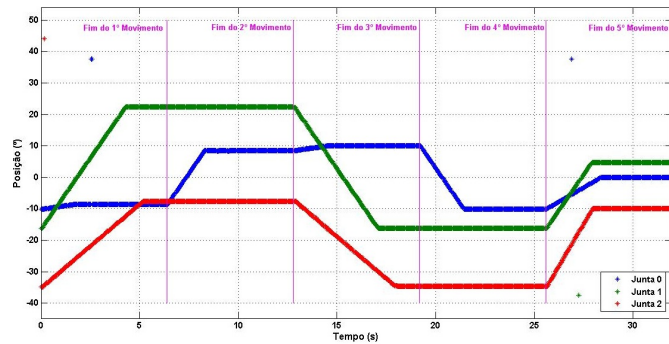


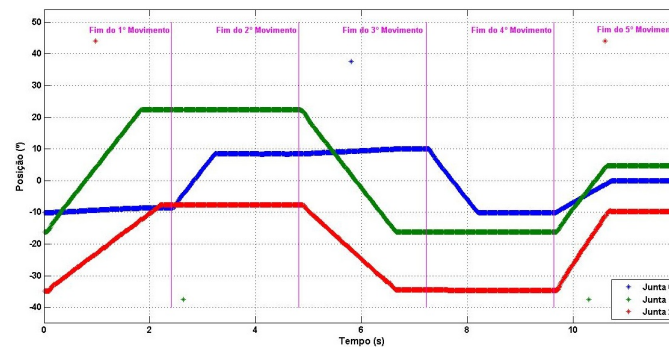
Figura 4.3: Visão Lateral e Frontal do Movimento de Agachamento

Continuando a fazer uso do algoritmo de cinemática inversa, apresenta-se de seguida uma sequência de movimentos que demonstram os limites de estabilidade da perna simulada. Na realidade, a perna nem sempre se susteve na vertical, podendo os motivos serem o excesso de velocidade de execução do movimento e/ou irregularidades na mecânica da perna não contempladas na simulação. No entanto, este ensaio teve como principal objectivo demonstrar a correspondência entre o movimento simulado e o movimento real. Este ensaio retirou 200 pontos das 3 juntas em cada movimento, não querendo significar que a junta respectiva não tenha terminado a sua rotação à mais tempo.

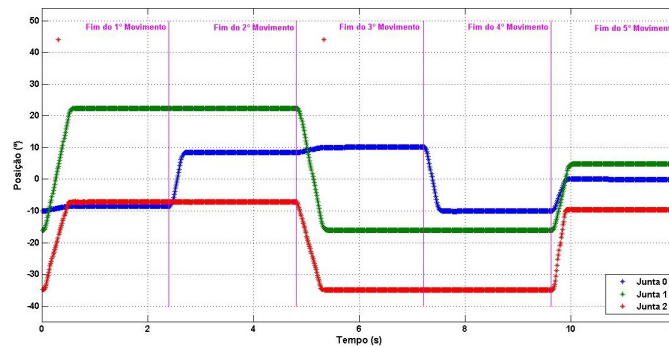
As figuras 4.4a, 4.4b e 4.4c representam as trajectórias efectuadas por cada uma das juntas na sequência dos movimentos mencionados com diferentes velocidades máximas. Este ensaio serve para demonstrar que apesar de o algoritmo utilizado estar preparado para tentar obter algum sincronismo entre o movimento das juntas, permitindo que estas iniciem e terminem idealmente ao mesmo tempo, este objectivo não é completamente satisfeito. Se a grandes velocidades essa exigência é minimamente atingida, sem que o olho humano se aperceba da falta de sincronismo, para velocidades mais baixas torna-se um problema. Observando a figura 4.4a, conclui-se facilmente que não existe sincronismo, verificando-se mesmo um tempo de conclusão de movimento entre juntas superior a dois segundos.



(a) Velocidade máxima a 10%



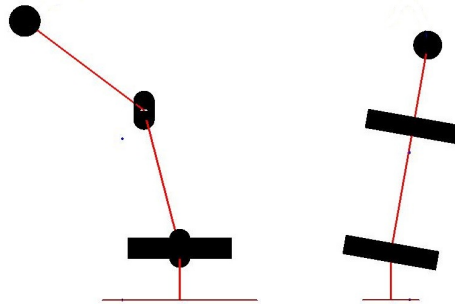
(b) Velocidade máxima a 25%



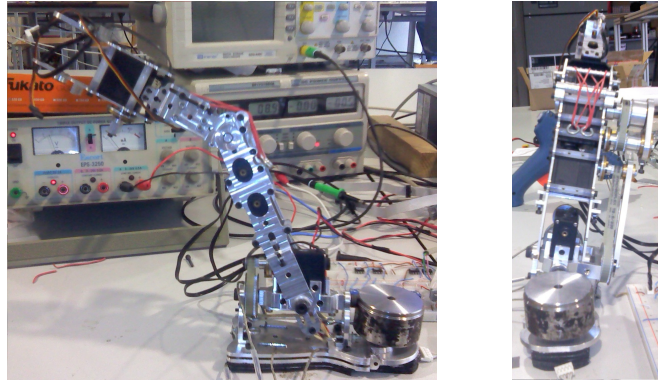
(c) Velocidade máxima a 100%

Figura 4.4: Movimento das juntas durante a sequência de movimentos

Este facto é causado pela forma como os servomotores digitais interpretam a velocidade que lhes é pedida. Eles apenas aceitam inteiros entre 1 e 100, impondo assim 100 níveis de velocidade, ou seja, a sua resolução é de 100. O algoritmo implementado exige uma velocidade máxima que é atribuída ao servomotor que tem de percorrer a trajectória maior, sendo as velocidades do restantes servomotores calculado proporcionalmente, consoante a trajectória a ser percorrida. Consequentemente, quanto menor for a velocidade máxima pedida, menor resolução se obterá, logo menos níveis de velocidade haverá para atribuir aos restantes. Quer dizer que a atribuição proporcional de velocidades neste caso não será a melhor solução porque, para velocidades baixas, eles terminarão sempre desfasados. Este foi mais um problema que foi descoberto ocasionalmente e que, futuramente, poderá influenciar todos os movimentos efectuados, se não se fizer uma adaptação dos algoritmos às características dos servomotores.

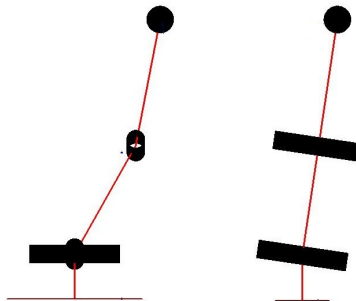


(a) Simulação em *Matlab*

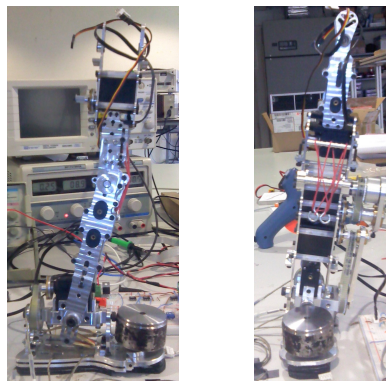


(b) Perna Real

Figura 4.5: Coordenadas (mm): $X = -150.0$; $Y = 39.5$; $Z = 270.0$

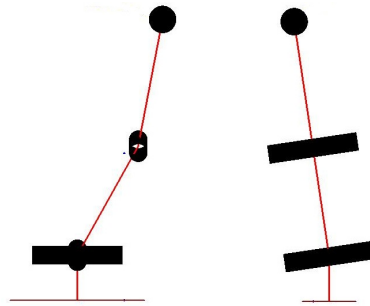


(a) Simulação em *Matlab*

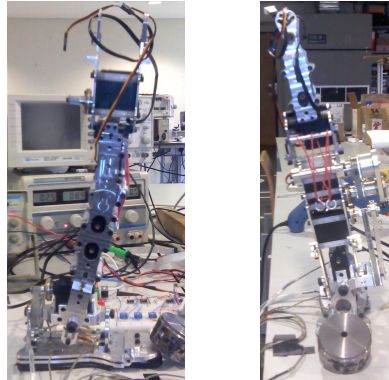


(b) Perna Real

Figura 4.6: Coordenadas (mm): $X = 95.0$; $Y = 39.0$; $Z = 312.0$

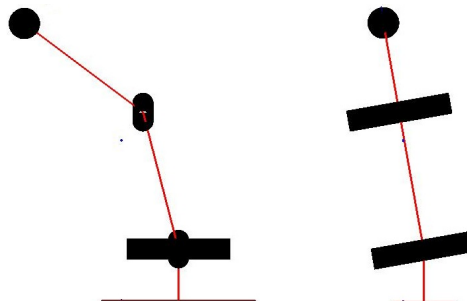


(a) Simulação em *Matlab*

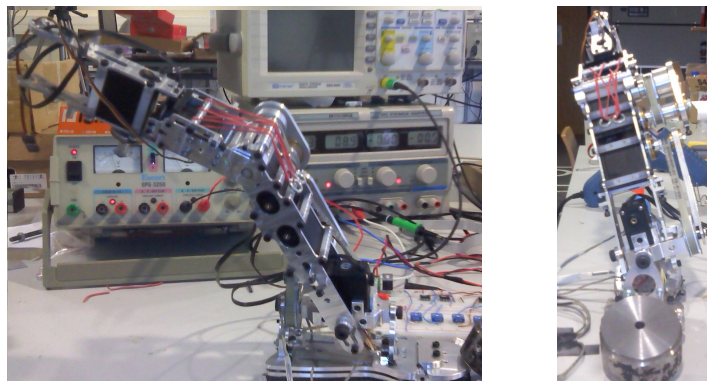


(b) Perna Real

Figura 4.7: Coordenadas (mm): $X = 95.0$; $Y = -39.5$; $Z = 312.0$



(a) Simulação em *Matlab*



(b) Perna Real

Figura 4.8: Coordenadas (mm): $X = -150.0$; $Y = -39.0$; $Z = 270.0$

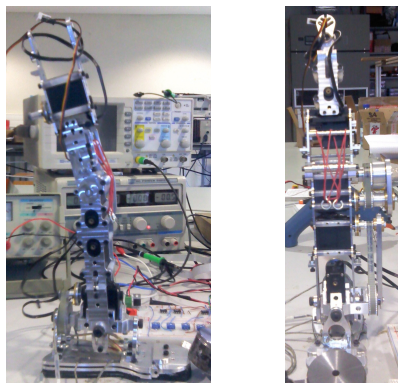
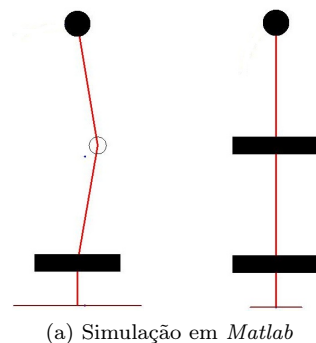


Figura 4.9: Coordenadas (mm): $X = 0.0$; $Y = 0.0$; $Z = 331.0$

As figuras acima representam a posição final dos movimentos demonstrados nas figuras anteriores e comprovam a existência de correspondência entre o programa de simulação e a perna real. Por análise das mesmas, facilmente se percebe a semelhança entre as posições simuladas e reais, de uma perspectiva lateral e frontal. Ainda assim, é possível verificar, por exemplo na figura 4.9, a existência de uma pequena inclinação lateral da perna, quando esta deveria estar na vertical. Esta situação é originada por pequenas folgas mecânicas existentes, devido a uma certa elasticidade das correias de transmissão e ao pequeno diâmetro das polias dos servomotores do tornozelo.

4.4 Sensores de Força

O sistema sensorial é projectado para incluir dois tipos de sensores, os inerciais e os de força. No entanto, esta dissertação só abordará os sensores de força que são os mais importantes no imediato, para implementação dos algoritmos de controlo desejados, pois têm como finalidade o cálculo do centro de pressão na planta do pé. Nesta secção, serão apresentadas as características dos sensores de força adquiridos e será feita a análise dos testes realizados com estes.



Figura 4.10: Sensores de força

Os sensores de força são o modelo LBS-5 da Interface. Para além de serem mais pequenos do que uma moeda de 5 cêntimos, como se pode constatar pela figura 4.10, têm ainda a particularidade de o seu ponto de contacto ser curvo, maximizando a sensibilidade. De resto, as suas dimensões são apresentadas na tabela 4.5a, tal como outras características essenciais.

A escolha dos sensores de carga com tão pouca capacidade, deve-se à necessidade de se ter uma resolução suficiente para obter bons resultados. Como a estrutura está dimensionada para pesar aproximadamente 5 Kg, mesmo assente em apenas uma perna, cada sensor não chegará ao seu limite máximo, sendo que estes são dos que possuem capacidade mais pequena no mercado. Os sensores funcionam como uma ponto de Wheatstone com a resistência de entrada referida na tabela 4.5a e, portanto, o sinal fornecido é a diferença de potencial entre dois pontos.

Característica		Valor
Altura	mm	3,00
Diâmetro	mm	9,60
Tensão de Alimentação	V	[5,0; 7,0]
Sensibilidade de Saída	mV/V	2,0
Capacidade	kg.f	2,27
Sobrecarga permitida	%	150
Resistência	Ω	350
Tem compensação de temperatura		

(a) Sensores de Força

Massa	Peso (g)
Placa	
1	700
2	1350
3	2850
4	400
5	1575
6	1900
7	1250

(b) Peso das Massas

Tabela 4.5: Características

Com estes novos elementos foi necessário adaptar a placa branca para que fossem incorporados. De acordo com as características dos sensores, estes são alimentados a 5.0V e têm uma sensibilidade de apenas 2mV/V, logo é necessário escolher um regulador de tensão e um amplificador de instrumentação que permitam fornecer energia e amplificar o sinal de saída, respectivamente. Deste modo, dando preferência aos componentes existentes em laboratório, optou-se pelo LM7805 e pelo INA129. Os potenciômetros presentes na placa branca são utilizados para dimensionar o ganho dos amplificadores de instrumentação de acordo com o pretendido.

Os INA129 têm um ganho variável entre 1 e 10000, sendo que neste trabalho se optou por um ganho de 150 para testes. Esta escolha baseou-se no seguinte facto: a alimentação dos sensores de força é de 5.0V, logo o sinal de saída máxima é de 10mV (ver sensibilidade de saída na tabela 4.5a); como estes sensores aguentam uma sobrecarga de segurança de 150%, significa que o sinal de saída pode atingir os 25mV; assim, o valor de ganho a 150 permite uma gama razoável para amostragem de dados de 1.5V sem sobrecargas e ainda dá margem para a obtenção de valores quando o sensor de força estiver em sobrecarga. Lembra-se que a gama de amostragem da ADC do microcontrolador é de 0 a 3.3V. O ganho dos amplificadores de instrumentação é apenas provisório até se determinar qual o valor mais adequado a este sistema. Conclui-se assim a explicação sobre a placa branca final apresentada na figura 3.6a.

4.4.1 Testes

Na realização dos ensaios para verificar a validade destes sensores, foi necessário a utilização de alguns acessórios extra: uma placa de acrílico plana e quadrada, e algumas massas com pesos diferentes, o mais homogêneas possível (tabela 4.5b). Para se efectuar a aquisição de um bom sinal, era imperativo

aumentar a amplitude do sinal e, portanto, utilizou-se os amplificadores de instrumentação INA129, que possuem uma boa margem de ganho e um excelente CMRR (Relação de Rejeição em Modo Comum), e a ADC do microcontrolador, possibilitando um sinal com amplitude máxima de 1,5V.

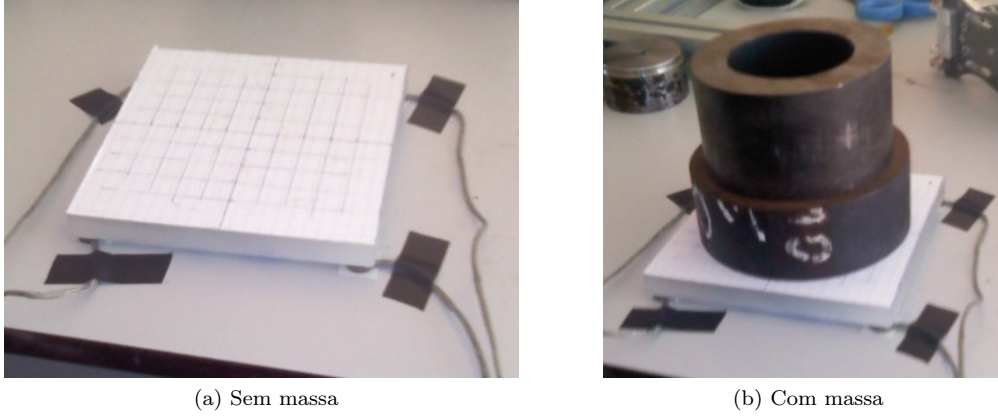


Figura 4.11: *Setup* Experimental

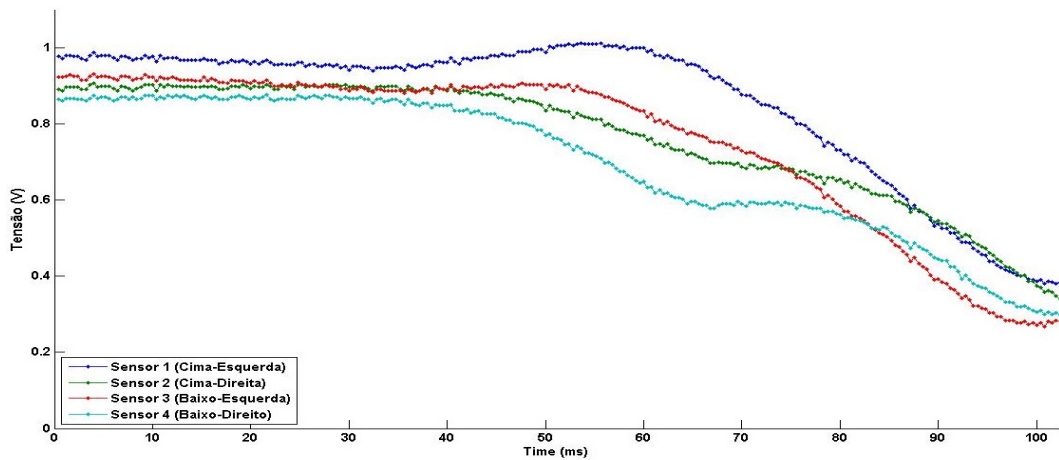
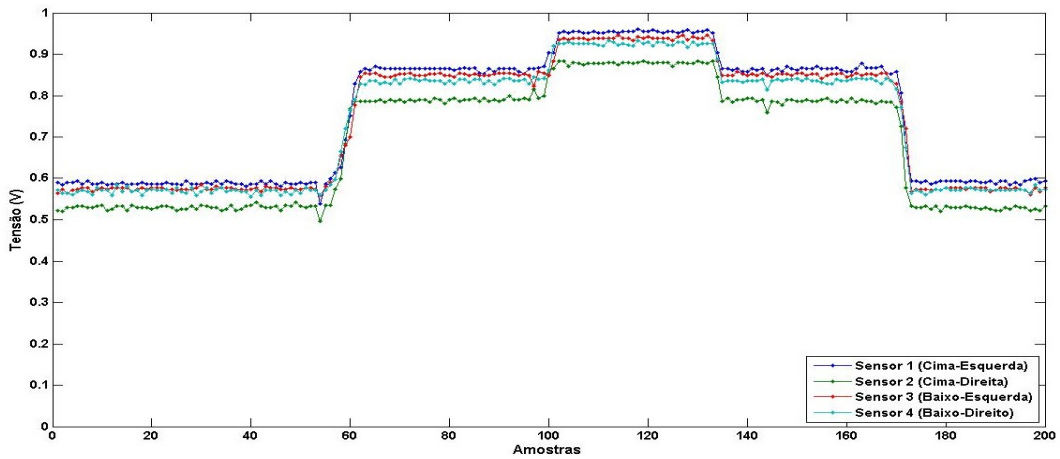


Figura 4.12: Desempenho dos Sensores

Nos ensaios efectuados, os sensores encontravam-se debaixo da placa quadrada de acrílico, junto a cada vértice da mesma. A massa era posta por cima o mais centrada possível, de modo a dividir de igual modo o peso pelos quatro sensores. Durante os testes, verificou-se que a placa não era realmente plana, situação que se tentou minimizar, e as massas também não eram totalmente homogéneas. Tais factos juntamente com o erro associado ao posicionamento da massa, justificam a diferença de valores entre dois sensores que se encontram em extremos opostos e que se pode verificar nas figuras 4.12a e 4.12b. A primeira pretende demonstrar o desempenho estático dos sensores, quer-se com isto dizer que, mesmo variando a força exercida sobre os sensores, estes não sofrem de histerese, obtendo-se um bom resultado neste ensaio. Esta mesma figura, representa a acumulação e posterior remoção das massas 3, 2 e 4, ao longo do tempo. É fácil de ver que quando se remove uma das massas, os valores assumem valores idênticos aos verificados antes de se introduzir essa mesma massa. A segunda figura representa o desempenho dinâmico, ou seja, o comportamento do sensor de modo associado à remoção ou inclusão de uma força. Este teste foi realizado retirando a massa da placa à mão e num curto espaço de tempo. A mão humana certamente introduziu forças extra aos dados, que justifica algumas variações anormais na figura. No entanto, o objectivo de ensaio foi cumprido, verificando-se um bom tempo de resposta desde a retirada da massa, que se situa aproximadamente num declive de 17,2 mV/ms.

Estes resultados não poderiam ter sido obtidos sem a utilização do unidade controladora mencionada na Secção 3.2. devido ao facto de os sensores não disponibilizarem uma interface de comunicação digital, pelo que se tornou obrigatório utilizar a ADC do microcontrolador para se obter os dados apresentados. Na tabela 4.3 pode-se ver os *device drivers* desenvolvidos para operação das diversas interfaces do MCU.

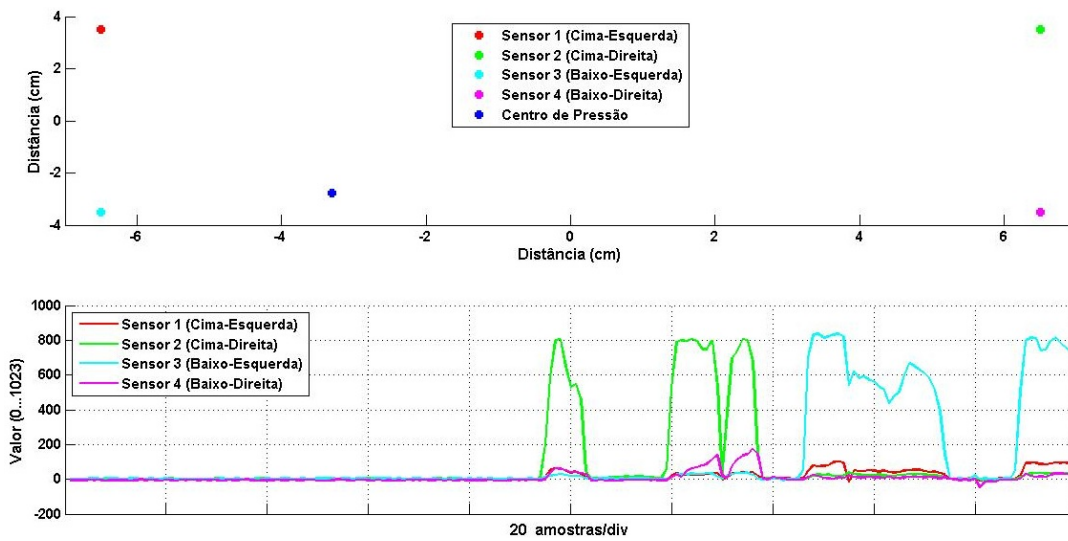
4.4.2 Centro de Pressão

O propósito de utilização dos sensores de pressão foi o facto de se poder calcular o centro de pressão a partir da disposição estratégica destes. Antes de serem incorporados na estrutura foram sujeitos a ensaios para verificar a sua fiabilidade no cálculo do centro de pressão, através das equações 4.8 e 4.9, respectivamente no eixo das abcissas e no eixo das ordenadas. O método utilizado anteriormente na análise estática e dinâmica é o mesmo para este ensaio com os sensores de força posicionados por baixo duma placa de acrílico, junto dos seus vértices.

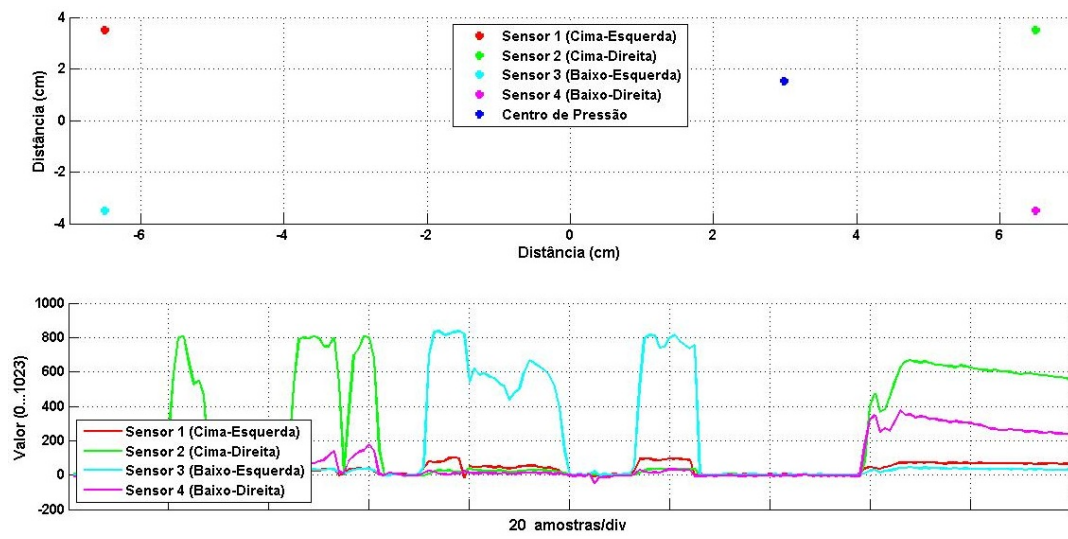
$$COP_x = \frac{\sum_i \vec{f}_i d_x^i}{\sum_i f_i} \quad (4.8)$$

$$COP_y = \frac{\sum_i \vec{f}_i d_y^i}{\sum_i f_i} \quad (4.9)$$

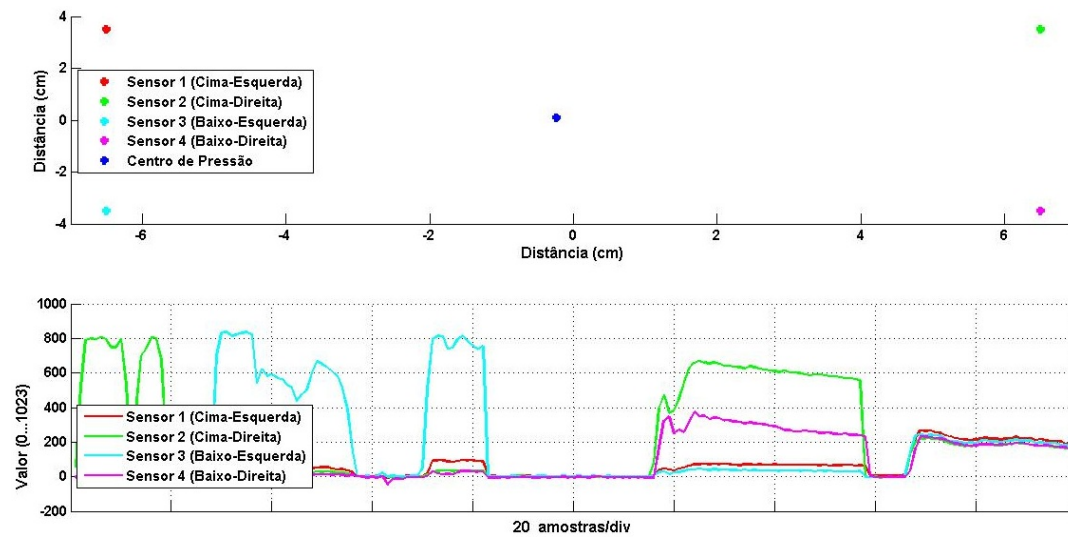
Pretendia-se obter um bom compromisso entre a variação do centro de pressão e o cálculo do mesmo, objectivo que foi satisfatoriamente cumprido. Conforme se exercia uma pressão sobre a placa, a representação no ecrã do monitor condizia com o esperado. Esta conclusão pode-se verificar por análise das figuras 4.13a, 4.13b e 4.13c, correspondentes a força exercida sobre o canto inferior esquerdo, superior direito e no centro, respectivamente. As figuras referidas incluem cada uma dois gráficos, em que o primeiro corresponde ao movimento do centro de pressão pela placa simulada com a posição dos sensores de força, e o segundo é o valor lido da ADC relativamente a cada sensor.



(a) Situado junto ao canto inferior esquerdo



(b) Situado junto ao canto superior direito



(c) Situado aproximadamente do centro

Figura 4.13: Centro de Pressão

4.5 Discussão de Resultados

Neste capítulo tentou-se apresentar alguns resultados preliminares do que esta plataforma poderá oferecer como resposta aos algoritmos de locomoção que se pretende implementar.

Relativamente ao algoritmo escolhido para validar a perna robótica, baseia-se na implementação da fórmula da cinemática inversa, sem qualquer necessidade de realimentação, logo é um sistema em malha aberta. O objectivo de verificar as limitações físicas da plataforma foi conseguido, tendo-se avaliado a importância do sistema de transmissão neste sistema. Utilizou-se um simulador em *Matlab* para comparar os resultados reais obtidos e, como esperado, estes foram coerentes.

Quanto aos sensores de força apresentam um bom desempenho estático e dinâmico mesmo sem a aplicação de qualquer tipo de filtro. O facto de não se ter efectuado um teste a toda a sua capacidade, inclusive à sua capacidade de *overload* referenciada, não apresenta qualquer problema, pois foram testadas as gamas previstas de maior probabilidade de funcionamento. Por último, testou-se a obtenção do centro de pressão a partir dos sensores de força, teve como objectivo avaliar o desempenho destes quando for necessário incluí-los na plataforma. A avaliação global foi satisfatória porque foi de encontro ao esperado.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Discussão de Resultados

Esta dissertação foi a estaca zero de uma nova plataforma humanóide e, portanto, foi a oportunidade de corrigir possíveis erros cometidos anteriormente. Deste modo, começou-se por analisar o primeiro humanóide concebido e detectar as melhorias que se poderiam efectuar. Dessa análise, surgiu a aquisição de sensores de força inteiramente dedicados para o efeito, em vez dos extensómetros adaptados, e servomotores digitais, substituindo os analógicos. Estes dois componentes permitiram uma aceleração de processos relativamente ao tempo de trabalho anteriormente dedicado aos seus homólogos, resultado de um avanço tecnológico evidente.

Quanto aos componentes adquiridos, destaca-se o microcontrolador *dsPIC33FJ128GP706* da Microchip. Este MCU já se sabia ser robusto, mas a facilidade de cálculo de fórmulas matemáticas merece destaque nesta dissertação. Não se tornará certamente uma dor de cabeça quando se implementarem algoritmos de controlo mais complexos.

Relativamente aos servomotores digitais, estes vieram facilitar a comunicação com as unidades de controlo permitindo a utilização do protocolo RS-232, em detrimento do habitual PWM. Este é talvez o aspecto de maior relevância, visto que o *feedback* obtido já não é apenas de posição mas também de outros factores como a tensão aplicada, número de identificação e velocidade, algo impossível em servomotores analógicos. Outra característica que se provou ser suficientemente boa, relativamente às necessidades da plataforma, foi o binário disponível face ao seu volume. Os movimentos de agachamento efectuados não denotaram qualquer tipo de problema mesmo com a inclusão de actuadores passivos.

Os sensores de força não comprometeram até agora a aposta feita neles. Tanto nos ensaios aos desempenhos estático e dinâmico como no cálculo do centro de pressão, demonstraram grande fiabilidade nas medições efectuadas, mesmo com os erros detectados devido aos factores referenciados. Assim, não se prevê quando for efectuada a sua inclusão na estrutura da planta do pé, que estes venham a falhar no objectivo para o qual foram adquiridos.

Dos objectivos assumidos no início desta dissertação, lamenta-se o facto de dois algoritmos de controlo não terem sido implementados, devido a ter surgido um problema inesperado para o qual já não houve tempo, nesta dissertação, de solucionar. No entanto, o único algoritmo implementado teve o desempenho esperado, abrindo boas perspectivas para a implementação dos futuros.

Para concluir, uma referência ao excelente desempenho do exoesqueleto nos movimentos até agora efectuados, permitindo verificar um excelente compromisso entre os servomotores e os movimentos

mecânicos.

5.2 Perspectivas de Trabalho Futuro

No desenrolar do trabalho efectuado nesta dissertação foram-se clarificando algumas ideias e a margem de progressão é enorme, pelo que perspectivas para trabalho futuro não são escassas e passa-se a sugerir:

- terminar a validação das placas de teste e conceber a placa de circuito impresso final das unidades de controlo;
- incluir potenciómetros digitais para facilitar a regulação do ganho dos amplificadores de instrumentação, permitindo deste modo alterar o ganho consoante as necessidades do momento através do microcontrolador;
- integrar os sensores inerciais numa rede ECAN isolada;
- reavaliar a dimensão das polias do tornozelo, de modo a diminuir a existência de algumas folgas;
- conceber a melhor solução para integrar, de forma homogénea, os sensores de força nos respectivos locais na planta do pé;
- implementar novos algoritmos baseados na cinemática, com e sem realimentação de força proveniente dos sensores de força.

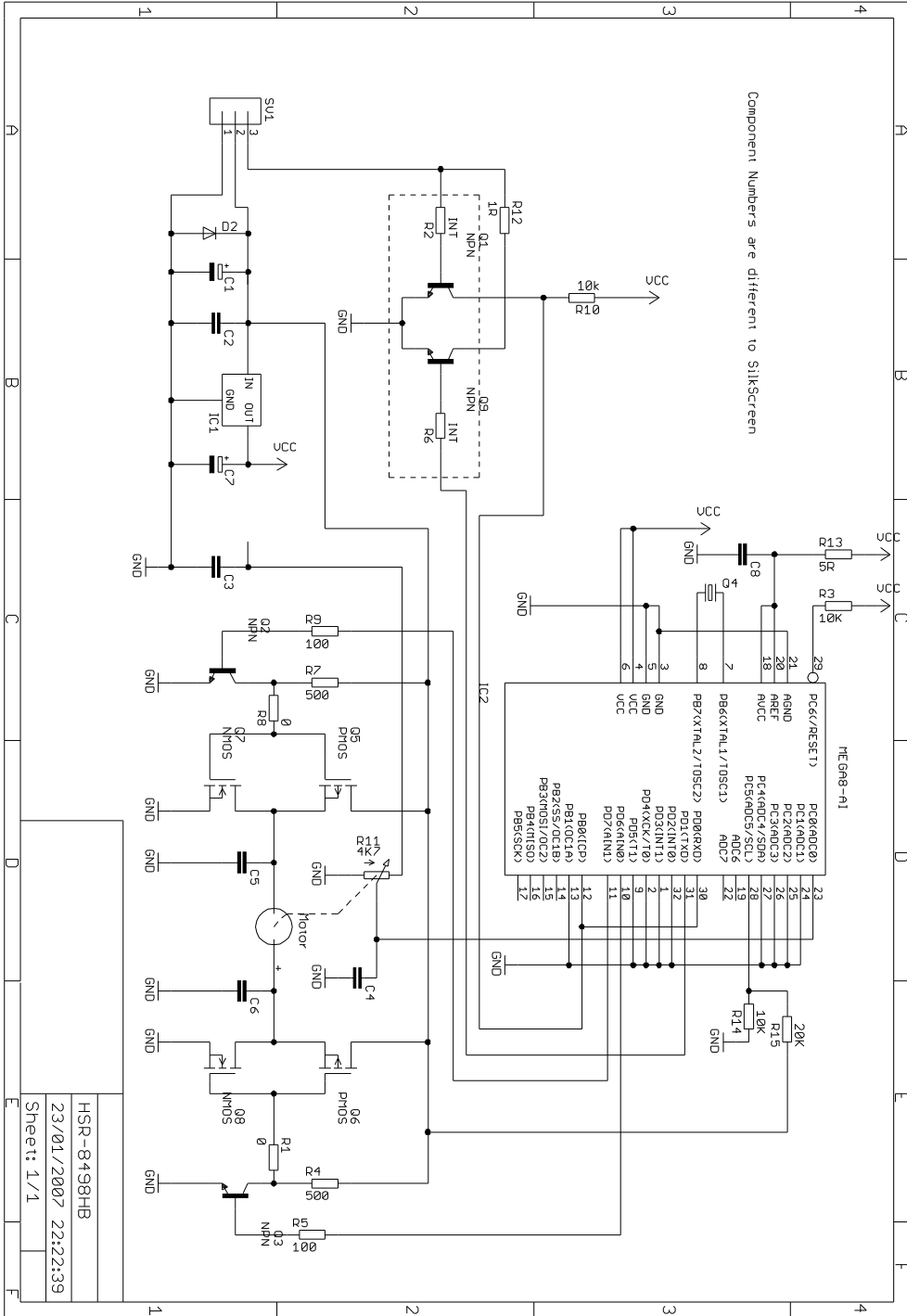
Bibliografia

- [1] Mauro Rodrigues, “Unidade de Processamento e Sistema de Visão para um Robô Humanóide”, Dissertação, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.
- [2] Milton Ruas, “Sistemas de Comunicação e Controlo para uma Plataforma Humanóide”, Dissertação, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.
- [3] Pedro Ferreira, “Ajudas Computacionais para Aplicação a um Robô Humanóide”, Dissertação, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.
- [4] Lexicoteca, ”Moderna Enciclopédia Universal”, Lisboa, Círculo de Leitores, Tomo XVI, Novembro, 1987.
- [5] Lexicoteca, ”Moderna Enciclopédia Universal”, Lisboa, Círculo de Leitores, Tomo II, Setembro, 1984.
- [6] *Idaho National Laboratory, U. S. Department of Energy*, “*Humanoid Robotics - Introduction*”. [ONLINE]. Disponível em: <https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt/community/introduction/536> [Último acesso: Outubro, 2010].
- [7] *Humanoid Research Institute, Waseda University*, “*Biped Walking Robot*”. [ONLINE]. Disponível em: http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_4.html [Último acesso: Outubro, 2010].
- [8] *Humanoid Research Institute, Waseda University*, “*WABOT - WAseda roBOT*”. [ONLINE]. Disponível em: http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html [Último acesso: Outubro, 2010].
- [9] K. Suwanratchatamane e M. Matsumoto, “*Balance Control of Robot and Human-Robot Interaction with Haptic Sensing Feet*”, *2nd. International Conference on Human System Interaction, University of Catania, Catania, Italy, May 21-23, 2009*.
- [10] K. Harada, S. Hattori, H. Hirukawa, M. Morisawa, S. Kajita e E. Yoshida, “*Two-Stage Time-Parametrized Gait Planning for Humanoid Robots*”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 15, No. 5, October, 2010.
- [11] Honda, “*The Honda Humanoid Robot Asimo*”. [ONLINE]. Disponível em <http://world.honda.com/ASIMO/> [Último acesso: Outubro, 2010].
- [12] Rémi Sabino, “Estrutura Híbrida de Locomoção para um Robô Humanóide”, Dissertação, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2009.

- [13] *Hitec RCD*, “*Servos*”. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.hitecrd.com/products/servos/index.html> [Último acesso: Novembro, 2010].
- [14] *Hitec RCD Korea Inc.*, “*General Specification of HSR-5980SG Coreless Digital Robot Servo*”. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.hitecrd.co.jp/RC/servo/pdf/HSR5980SG.pdf> [Último acesso: Outubro, 2010].
- [15] *RoboSavvy*, “*Hitec HSR-8498HB Digital Servo Operation and Interface*”. [ONLINE]. Disponível em: <http://robosavvy.com/Builders/i-Bot/HSR8498HB%20Servo.pdf> [Último acesso: Outubro, 2010].
- [16] V. Santos, R. A. S. Moreira, M. Ribeiro, F. Silva, “*Development of a Hybrid Humanoid Platform and Incorporation of The Passive Actuators*”, *International Conference IEEE on Robotics and Biomimetics*, 14-18 Dezembro, Tianjin, China, 2010.
- [17] INTERFACE, “LBS Load Button Load Cell”. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.interfaceforce.com/lbs-miniature-compression-load-button-p-40.html> [Último Acesso: Novembro, 2010].
- [18] *CadSoft Online*, *Eagle*. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.cadsoftusa.com/>. [Último Acesso: Novembro, 2010].
- [19] L. Sciavicco, B. Siciliano, “*Modeling and Control of Robot Manipulators*”, McGraw-Hill Inc., 1996.

Apêndice A

Schematic



HSR-8498HB
 23/01/2007 22:22:39
 Sheet: 1/1