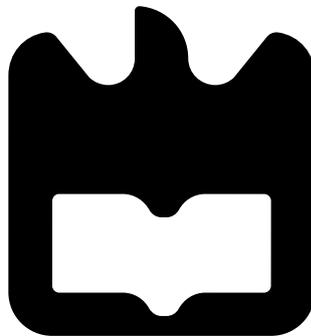




**Telmo Filipe
Jesus Rafeiro**

**Rede de Sensores Inerciais para Equilíbrio de um
Robô Humanoide**





**Telmo Filipe
Jesus Rafeiro**

Rede de Sensores Inerciais para Equilíbrio de um Robô Humanoide

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

O júri / The jury

Presidente / President

Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Professor Doutor Fernão Rodrigues Vístulo de Abreu
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos
Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Em primeiro lugar quero deixar aqui os meus agradecimentos aos meus orientadores, Professor Doutor Vitor Santos e Professor Doutor Filipe Silva por todo o apoio que prestaram e pelo entusiasmo que sempre mostraram e me transmitiram.

Ao futuro Doutorado Jorge Almeida e ao Doutor Ricardo Pascoal, o meu grande obrigado pela disponibilidade e por toda a ajuda prestada no desenvolvimento desta dissertação.

Também quero agradecer a todos os meus colegas e amigos, que me acompanharam neste percurso.

Aos meus pais, quero deixar também o meu profundo agradecimento, por todo o apoio que me dão. Sem vocês, nada disto teria sido possível.

A ti Filipa que estás sempre presente a meu lado, e por todo o apoio que me dás, obrigado.

Palavras-chave

PHUA, rede inercial, acelerómetro, giroscópio, *Arduino*, humanoide

Resumo

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de uma rede de sensores inerciais composta por um conjunto de *Inertial Measurement Units*, constituídos por acelerómetros, giroscópios e magnetómetros (os últimos foram descartados no projeto). É pretendido que esta rede de sensores permita ao robô humanoide do PHUA - Projeto Humanoide da Universidade de Aveiro adquirir informação necessária ao seu equilíbrio.

O primeiro passo deste trabalho passou pela caracterização de dois tipos de unidades inerciais, o *RAZOR - SEN 10736 - 9 gdl* e o *POLOLU - MinIMUv2 - 9 gdl*, com auxílio de um braço robótico antropomórfico. Os resultados desta avaliação são apresentados no trabalho.

De seguida, foi desenvolvida a estrutura da rede inercial com recurso a uma unidade de processamento central, uma plataforma de desenvolvimento *Arduino* com controlo multiplexado de oito unidades assente no protocolo de comunicação *I²C*, acrescido de uma comunicação *RS232* com a nona unidade.

A rede desenvolvida suporta um máximo de nove unidades inerciais, com uma taxa de aquisição de 7 Hz. O funcionamento da rede não está dependente do número de unidades utilizadas, podendo operar com qualquer número de unidades compreendidas entre 1 e 9 unidades.

A rede inercial foi instalada no robô humanoide, e testada durante a execução de movimentos simples, permitindo concluir da viabilidade da rede em diversas situações.

Keywords

PHUA, inertial network, accelerometer, gyroscope, *Arduino*, humanoid

Abstract

The main objective of this dissertation is the development of a network of inertial sensors constituted by a set of *Inertial Measurement Units* consisting of accelerometers, gyroscopes and magnetometers (the latter were discarded in the project). It is intended that this network of sensors enables the humanoid robot PHUA - Projeto Humanoide da Universidade de Aveiro acquire information necessary for its balance.

The first step of this work consisted by characterization of two types of inertial units, the *RAZOR - SEN 10736-9 gdl* and *Pololu - MinIMUv2 - 9 gdl*, with the aid of an anthropomorphic robot arm. The results of this evaluation are presented in the work.

Then, the inertial network structure was developed using a central processing unit, a development platform *Arduino* multiplexed with eight control units based on the communication protocol I^2c , plus a communication *RS232* with the ninth unit.

The developed network supports a maximum of nine units inertial, with an acquisition rate of 7 *Hz*. The network's operation is not dependent on the number of units used and can operate with any number of units between 1 and 9 units.

The network was installed in inertial humanoid robot, and tested during the execution of simple movements, allowing to conclude the feasibility of the network in various situations.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	v
Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos	3
1.4 <i>Robot Operating System</i>	4
1.5 Estado de Arte	4
1.5.1 <i>Inertial Navigation System</i> - INS	5
1.5.2 Acelerómetros	6
1.5.3 Giroscópios	8
1.5.4 Magnetómetros	9
1.5.5 <i>Micro Electro-Mechanical System</i> - MEMS	10
1.5.6 Algoritmos para Cálculo de Orientação	12
1.5.7 IMU na Robótica Humanoide	14
1.6 Estrutura da dissertação	18
2 Caraterização de Sensores	19
2.1 Sensores Disponíveis	19
2.2 Modo de Ligação	21
2.3 Calibração dos Sensores	22
2.4 Testes dos Sensores	23
2.4.1 Braço Robótico - <i>Setup</i>	23
2.4.2 Módulo de Comunicação e Aquisição dos Dados	25
2.4.3 Movimentos a realizar	26
2.5 Resultados dos Giroscópios	26
2.5.1 Posição estática	27
2.5.2 Movimentos de Translação	30
2.5.3 Movimentos de Rotação	34
2.6 Resultados de Acelerómetros	37
2.6.1 Posição estática	37

2.6.2	Movimentos de Translação	40
2.6.3	Movimentos de Rotação	43
2.6.4	Inclinação dos acelerómetros	46
2.7	Resultados dos Magnetómetros	54
2.7.1	Posição estática	54
2.7.2	Movimentos de Translação	55
3	Rede de Sensores Inerciais	59
3.1	Componentes da Rede	59
3.1.1	Unidades inerciais - IMU	59
3.1.2	Unidade de Controlo - <i>Arduino</i>	60
3.1.3	<i>Multiplexer</i>	60
3.2	Arquitetura da Rede	62
3.3	Placa de Circuito Impresso	64
3.4	Fixação da Rede de Sensores ao humanóide	66
3.5	Receção dos Dados dos Sensores	67
3.6	Posicionamento da Rede no Robô humanóide	68
4	Experiencias e Resultados	71
4.1	Montagem Experimental	71
4.2	Movimentos Realizados	72
4.3	Grandezas a Avaliar	77
4.3.1	Cinemática Direta da Perna do Robô humanóide	78
4.3.2	Métodos Numéricos Comparativos	83
4.4	Avaliação dos resultados	85
4.4.1	Agachamento	85
4.4.2	Flexão do Joelho	100
4.4.3	Movimento Lateral	107
4.5	Discussão dos Resultados	115
5	Conclusões e trabalho futuro	117
5.1	Conclusões	117
5.2	Trabalho futuro	118
	Referências	121
A	Suportes Desenvolvidos para Atividade Experimental de Caraterização	125
B	Suportes Desenvolvidos para Fixação da Rede de Sensores no Robô	131
C	Esquema de Ligações da Rede	137
D	Pag informativa	141

Lista de Tabelas

2.1	Desvio padrão e valor médio dos giroscópios - experiência com braço robótico imóvel.	30
2.2	Desvio padrão para movimentos de translação - Giroscópio.	33
2.3	Desvio padrão e valores médios para braço robótico imóvel - acelerômetro.	39
2.4	Resultados de "inclinômetros", para $roll = 0^\circ$ e $pitch = 0^\circ$	49
2.5	Resultados de "inclinômetros", para $roll = 50^\circ$ e $pitch = 0^\circ$	51
2.6	Resultados de "inclinômetros", para $roll = 30^\circ$ e $pitch = 0^\circ$	53
2.7	Resultados de "inclinômetros", para $roll = 35^\circ$ e $pitch = 0^\circ$	53
2.8	Resultados das inclinações obtidas.	53
4.1	Juntas movimentadas em cada tipo de movimento.	73
4.2	Tabela de <i>Denavit-Hartenberg</i> para as pernas do robô humanóide PHUA.	79
4.3	Parâmetros de avaliação para as curvas de velocidade angular no agachamento.	90
4.4	Parâmetros de avaliação para as curvas de aceleração linear no agachamento.	93
4.5	Parâmetros de avaliação para as curvas de inclinação no agachamento.	98
4.6	Parâmetros de avaliação para análise de redundância sensorial.	100
4.7	Parâmetros de avaliação para as curvas de velocidade angular na flexão do joelho.	103
4.8	Parâmetros de avaliação para as curvas de aceleração linear na flexão do joelho.	105
4.9	Parâmetros de avaliação para as curvas de inclinação na flexão do joelho.	107
4.10	Parâmetros de avaliação para as curvas de velocidade angular no movimento lateral.	110
4.11	Parâmetros de avaliação para as curvas de aceleração linear no movimento lateral.	113
4.12	Parâmetros de avaliação para as curvas de inclinação no movimento lateral.	115

Lista de Figuras

1.1	Plataformas do PHUA.	2
1.2	Tipos de atuação existentes no robô humanoide.	3
1.3	Exemplo de um acelerômetro piezoelétrico.	7
1.4	Exemplo de um acelerômetro piezoresistivo.	7
1.5	Exemplo de um acelerômetro capacitivo.	8
1.6	Exemplo de um giroscópio de rotor com um grau de liberdade.	8
1.7	Exemplo de um giroscópio de vibração para um grau de liberdade.	9
1.8	Esquema de uma montagem de um magnetômetro <i>Search-Coil</i> de apenas uma espira.	10
1.9	Acelerômetro capacitivo, produzido segundo tecnologia MEMS.	11
1.10	Giroscópio de vibração, produzido segundo tecnologia MEMS.	11
1.11	Esquema de Funcionamento EKF.	13
1.12	Exemplo implementação filtro complementar com giroscópios e acelerômetros.	14
1.13	Demonstração do fato com implementação de sensores IMU.	15
1.14	Robô Humanoide <i>Nao</i> , o qual apresenta a implementação de um IMU.	16
1.15	Robô Humanoide <i>Tao-Pie-Pie</i> , no qual foram implementados dois giroscópios.	16
1.16	Robô Humanoide <i>Jupp</i> , no qual foram implementados um giroscópio e um acelerômetro.	17
1.17	Robô Humanoide <i>TWNHR-IV</i> , no qual foi implementado um acelerômetro.	17
1.18	Robô Humanoide, no qual foi implementado um acelerômetro.	18
2.1	IMU Razor 9 gdl	19
2.2	minIMU-v2 Pololu 9gdl	20
2.3	Esquema montagem e ligação sensor A - PC	21
2.4	Esquema montagem e ligação sensor B - PC	21
2.5	Braço robótico antropomórfico de 6 graus de liberdade - <i>Fanuc M-6iB 6s</i>	24
2.6	Suporte de fixação dos sensores para braço robótico.	24
2.7	Funcionamento do programa de obtenção de dados durante testes realizados.	25
2.8	À esquerda - ilustração dos movimentos de translação ; à direita - ilustração movimentos de rotação.	26
2.9	Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor A - Eixo X.	27
2.10	Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor A - Eixo Y.	27
2.11	Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor A - Eixo Z.	28
2.12	Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor B - Eixo X.	28

2.13	Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor B - Eixo Y.	29
2.14	Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor B - Eixo Z.	29
2.15	Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor A - Eixo X. . . .	30
2.16	Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Y. . . .	31
2.17	Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Z.	31
2.18	Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor B - Eixo X.	32
2.19	Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Y.	32
2.20	Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Z.	33
2.21	Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor A - Eixo X.	34
2.22	Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Y.	34
2.23	Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Z.	35
2.24	Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor B - Eixo X.	35
2.25	Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Y.	36
2.26	Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Z.	36
2.27	Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor A - Eixo X.	37
2.28	Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Y.	37
2.29	Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Z.	38
2.30	Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor B - Eixo X.	38
2.31	Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Y.	39
2.32	Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Z.	39
2.33	Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo X. . . .	40
2.34	Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Y. . . .	40
2.35	Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Z. . . .	41
2.36	Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo X. . . .	41
2.37	Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Y. . . .	42
2.38	Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Z. . . .	42
2.39	Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo X.	43
2.40	Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Y.	43
2.41	Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Z.	44
2.42	Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo X.	44
2.43	Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Y.	45
2.44	Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Z.	45
2.45	Comparação Valores Inclinação - Sensor B	46
2.46	Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor A.	47
2.47	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor A. .	47
2.48	Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor B.	48
2.49	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor B. .	48
2.50	Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor A.	49
2.51	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor A. .	49
2.52	Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor B.	50
2.53	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor B. .	50
2.54	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=30^\circ$ - Sensor A. .	51
2.55	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=35^\circ$ - Sensor A. .	51
2.56	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=35^\circ$ - Sensor B. .	52
2.57	Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=35^\circ$ - Sensor B. .	52
2.58	Magnitude do magnetómetro do IMU A - parado.	55
2.59	Magnitude do magnetómetro do IMU B - parado.	55

2.60	Magnitude do magnetómetro do IMU A - translação.	56
2.61	Magnitude do magnetómetro do IMU B - translação.	56
2.62	<i>Yaw</i> do magnetómetro do IMU A - translação.	57
2.63	<i>Yaw</i> do magnetómetro do IMU B - translação.	57
3.1	Arduino UNO R3 (revisão 3).	60
3.2	Esquema funcionamento <i>multiplexer</i> analógico 8 para 1 - HCF4051BE. . .	61
3.3	Tabela lógica para controlo do <i>multiplexer</i> - HCF4051BE.	61
3.4	Esquema da topologia da rede de sensores.	62
3.5	Implementação rede inercial com dois sensores.	63
3.6	Implementação rede inercial com incorporação sensor A	64
3.7	Desenho CAD placa PCB circuito impresso	65
3.8	Placa PCB circuito impresso.	65
3.9	Apoios para fixação dos sensores inerciais.	66
3.10	Suporte de fixação do arduino	67
3.11	Execução programa dos dados da rede de sensores	68
3.12	Parte inferior do humanóide utilizada nos testes.	69
3.13	Exemplo de implementação da rede de sensores inerciais no robô humanóide. .	70
4.1	Funcionamento da montagem experimental.	71
4.2	Numeração dos servomotores instalados na plataforma humanóide.	73
4.3	Movimento de agachamento.	74
4.4	Valores dos servomotores durante o agachamento.	75
4.5	Valores dos servomotores durante a flexão dos joelhos.	75
4.6	Movimento de flexão do joelho	76
4.7	Movimento de anca.	77
4.8	Valores dos servomotores durante o movimento lateral.	77
4.9	Diagrama cinemático de uma perna do robô humanóide.	79
4.10	Ilustração dos ângulos de <i>Euler</i>	81
4.11	Magnitude do acelerómetro 1 durante agachamento.	82
4.12	Magnitude do acelerómetro 1 durante flexão do joelho.	83
4.13	Magnitude do acelerómetro 1 durante movimento lateral.	83
4.14	Agachamento - tornozelo direito - servomotor 12 e giroscópio de IMU 6. . .	85
4.15	Agachamento - tornozelo esquerdo - servomotor 22 e giroscópio de IMU 8. .	86
4.16	Agachamento - joelho direito - servomotor 13 e diferença entre giroscópios de IMUs 6 e 5.	86
4.17	Agachamento - joelho esquerdo - servomotor 23 e diferença entre giroscó- pios de IMUs 8 e 7.	87
4.18	Agachamento - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 1.	87
4.19	Agachamento - anca esquerda - servomotor 26 e diferença entre giroscópios de IMUs 7 e 4.	88
4.20	Agachamento - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 9.	88
4.21	Agachamento - anca direita - aceleração em Y.	91
4.22	Agachamento - tibia direita - aceleração em Z.	91
4.23	Agachamento - anca direita - aceleração em X.	92

4.24	Agachamento - anca direita - aceleração em Z.	92
4.25	Agachamento - tíbia direita - <i>pitch</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 6.	94
4.26	Agachamento - tíbia direita - <i>roll</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 6.	94
4.27	Agachamento - fémur direito - <i>pitch</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 5.	95
4.28	Agachamento - anca direita - <i>pitch</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 1.	95
4.29	Agachamento - anca direita - <i>pitch</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 9.	96
4.30	Agachamento - anca direita - <i>roll</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 9.	96
4.31	Agachamento - Redundância sensorial para a anca - velocidade angular - giroscópios 1 a 4.	98
4.32	Agachamento - Redundância sensorial para a anca - <i>pitch</i> - acelerómetros 1 a 4.	99
4.33	Flexão do joelho - joelho direito - servomotor 13 e diferença entre giroscópios de IMUs 6 e 5.	101
4.34	Flexão do joelho - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 1.	101
4.35	Flexão do joelho - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 9.	102
4.36	Flexão do joelho - anca direita - aceleração em Y.	103
4.37	Flexão do joelho - anca direita - aceleração em Z.	104
4.38	Flexão do joelho - anca direita - aceleração em Z.	104
4.39	Flexão do joelho - fémur direito - <i>pitch</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 5.	106
4.40	Flexão do joelho - fémur direito - <i>roll</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 5.	106
4.41	Tornozelo direito - servomotor 11 e giroscópio de IMU 6.	108
4.42	Anca direita - servomotor 15 e diferença entre giroscópios de IMUs 1 e 5.	109
4.43	Anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 9 e 5.	109
4.44	Movimento lateral - tíbia direita - aceleração em Y.	111
4.45	Movimento lateral - anca direita - aceleração em Y.	111
4.46	Movimento lateral - tíbia direita - aceleração em Y.	112
4.47	Movimento lateral - tíbia direita - aceleração em Z.	112
4.48	Movimento lateral - anca direita - <i>roll</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 1.	114
4.49	Movimento lateral - anca direita - <i>roll</i> obtido através da cinemática e acelerómetro 9.	114

Acrónimos

LAR Laboratório de Automoção e Robótica

PHUA Projeto Humanoide da Universidade de Aveiro

IMU *Inertial Measurement Unit*

ROS *Robot Operating System*

INS *Inertial Navigation System*

MEMS *Micro Electro-Mechanical System*

DCM *Direction Cosine Matrix*

EKF *Extended Kalman Filter*

GDL Grau de Liberdade

UC Unidade de Controlo

UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

EQM Erro Quadrático Médio

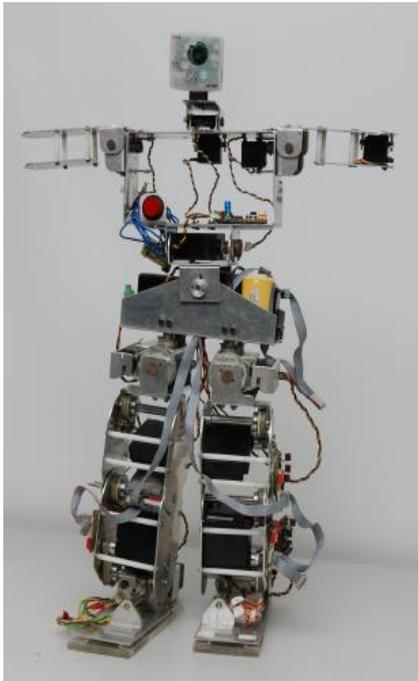
Capítulo 1

Introdução

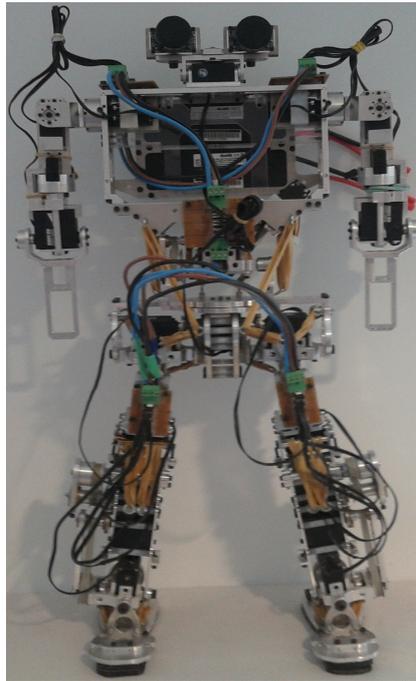
1.1 Enquadramento

O PHUA - Projeto Humanoide da Universidade de Aveiro representa um esforço conjunto dos departamentos de Engenharia Mecânica e Eletrónica, Telecomunicações e Informática, para o desenvolvimento de uma plataforma humanoide autónoma.

Entre 2004 e 2008 foram vários os intervenientes que deram o seu contributo para a primeira plataforma humanoide desenvolvida, cujo resultado pode ser visualizado na figura 1.1a. Em 2004, foi desenvolvida uma unidade de controlo de servomotores e leitura sensoriais no projeto [1] e desenvolvida e construída a parte inferior (pernas, pés e anca) desta primeira plataforma no projeto [2]. Em 2005, foi desenvolvida a parte superior da primeira plataforma (tronco, braços e cabeça) através do projeto [3] e com o projeto [4] foram revistos os módulos de controlo e perceção já existentes e concebidos novos módulos. No ano de 2006, foram desenvolvidos algoritmos de controlo, recorrendo à informação sensorial de sensores de força colocados na base dos pés, através do projeto [5], onde esta plataforma adquiriu a capacidade de se equilibrar estaticamente. Em 2007, foram realizados os projetos [6] e [7], onde se desenvolveu a unidade central de controlo da plataforma humanoide e alguns algoritmos de locomoção simulados apenas em software, respetivamente. Finalmente em 2008, foram realizados ainda os projetos [8] e [9], nos quais se desenvolveram algoritmos de visão aplicados no humanoide com o objetivo de este interagir com o meio envolvente e ainda o desenvolvimento de sistemas de comunicação e controlo em *CAN*.



(a) Fase final da primeira plataforma humanoide do PHUA [8].

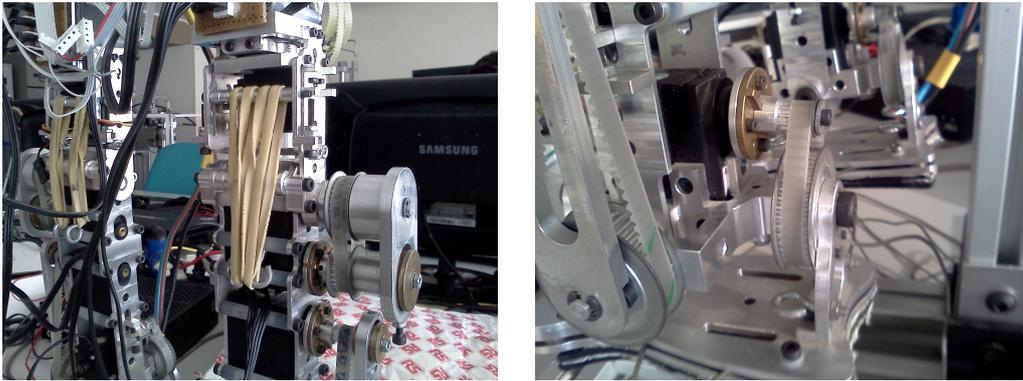


(b) Corpo completo da segunda plataforma desenvolvida no PHUA [10].

Figura 1.1: Plataformas do PHUA.

Iniciada em 2009, a segunda plataforma conta já com o contributo de alguns projetos. Em [11], foi desenvolvida e concebida a parte inferior do novo robô humanoide (anca, pernas e pés) segundo o conceito de atuação híbrida, composta por atuação ativa por meio de servomotores, figura 1.2b, e passiva por meio de elementos elásticos colocados nas juntas, como é possível observar na figura 1.2a. Em [12], foi desenvolvido um módulo inicial de controlo dos servomotores e leitura das células de carga (destinadas à base inferior dos pés). Nos projetos [13] e [14], foi desenvolvida e concebida a parte superior da plataforma humanoide (tronco e braços) e desenvolvidos algoritmos de controlo com baseados na cinemática do robô humanoide e também alguns algoritmos que recorrem à leitura das células de carga dos pés do humanoide. No projeto [10] foi explorada a interação háptica e desenvolvida uma interface de teleoperação do robô humanoide. O projeto [15] contribuiu com o desenvolvimento de um módulo composto por células de carga, colocadas nos pés do robô, através dos quais se calcula o centro de pressão. A posição do centro de pressão do robô é então aqui utilizada para gerar a realimentação de força transmitida através da interface de teleoperação desenvolvida no trabalho anterior.

Como resultado, a segunda plataforma humanoide do PHUA possui 27 graus de liberdade, um peso total de 6 kg e 65 cm de altura, um módulo de controlo com servomotores *HITEC*[®] e um módulo sensorial em desenvolvimento que conta com 8 células de carga na base dos pés. Para além disso, o robô humanoide dispõe ainda de duas câmaras com comunicação *FireWire*, colocadas na cabeça, destinadas a fornecer imagens para o desenvolvimento de algoritmos de visão artificial.



(a) Atuação passiva por meio de elásticos. (b) Servomotores de atuação das juntas.

Figura 1.2: Tipos de atuação existentes no robô humanoide.

1.2 Motivação

O controlo de robôs humanóides em operações como marcha ou até manter o equilíbrio bípede exige todo o conjunto de modelos dinâmicos que consigam representar rigorosamente o próprio robô, e a obtenção desses modelos é um processo de extrema complexidade.

O elevado número de GDL que o robô humanóide do PHUA apresenta e as folgas existentes nas transmissões e acoplamentos, incrementam o nível de complexidade da obtenção do modelo dinâmico necessário para representar de forma rigorosa o robô humanóide.

O ser humano dispõe de sistemas funcionais a operar em conjunto que desenrolam um papel importante na forma como este mantém o equilíbrio. Como principais exemplos desses sistemas temos os sistemas vestibular, visual e proprioceptivo.

De forma a criar aproximação aos sistemas biológicos, a incorporação de um módulo de elementos sensoriais no robô humanóide contribui para a possibilidade do controlo do mesmo através de um modelo dinâmico menos complexo, auxiliado pela informação fornecida pelos elementos sensoriais.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste projeto visa o desenvolvimento e conceção de uma rede de sensores inerciais que irão incorporar o sistema de controlo de equilíbrio do robô humanóide do PHUA.

A rede de sensores inerciais a desenvolver é composta por um conjunto de unidades inerciais (*Inertial Measurement Units* - IMUs), sendo cada unidade composta por acelerómetros, giroscópios e magnetómetros, todos eles de três Grau de Liberdade - GDL.

Antes do desenvolvimento da rede de sensores inerciais serão realizadas experiências com os tipos de IMU disponibilizados, que ajudarão a caracterizá-los para posteriores decisões nos elementos a incorporar na rede.

Depois de concebida a rede sensores inerciais, pretende-se proceder à sua instalação no robô humanóide e realizar atividades experimentais, através das quais é feita a avaliação do comportamento das unidades inerciais.

É também objetivo deste projeto que todo o *software* desenvolvido seja integrado na plataforma ROS, de forma a acompanhar a recente migração do PHUA para este ambiente de desenvolvimento que será explicado ao longo do projeto.

1.4 *Robot Operating System*

Robot Operating System, ou apenas ROS, é uma ferramenta destinada ao desenvolvimento de *software*. Utilizado principalmente no desenvolvimento de robôs, é cada vez mais uma forte aposta devido à sua estrutura modular que permite separar um grande e complexo projeto em vários módulos ou *packages*, tornando-os menos complexos e mais fáceis de compreender. Outra vantagem torna o ROS mais apelativo reside no fato de este ser uma ferramenta gratuita e *open source*, onde muitas das suas utilidades, são desenvolvidas por entidades que adotam esta ferramenta, e no decorrer dos seus projetos disponibilizam-nas para toda a comunidade que utilize esta plataforma.

Atualmente, a ferramenta ROS suporta linguagens de programação como *C++* e *Python*. Para facilitar a sua utilização, o ROS dispõe ainda de utilidades para processamento e compilação de código.

Como já foi referido, cada projeto pode ser composto por um variado número de módulos, e cada módulo pode conter vários executáveis gerados através da compilação do código, denominados de nodos. Cada nodo, através da utilização e configuração de *callbacks*, adquire a capacidade de ler ou escrever dados em mensagens que poderão ser interpretadas por outros nodos, permitindo assim a troca de informação entre eles.

Através da ferramenta *roscpp* é possível intersetar as mensagens enviadas pelos nodos, e gravar os dados dessas mensagens em ficheiros, permitindo a re-utilização desses dados para interação com outros nodos, ou a sua utilização direta na análise dos dados gravados.

A plataforma ROS também disponibiliza uma ferramenta de visualização gráfica denominada *rviz*, que possibilita a visualização e manipulação (a manipulação é realizada através de transformações geométricas nos *scripts*) de objetos no espaço. No desenvolvimento de um robô, por exemplo, é possível representar no *rviz* as formas geométricas deste e visualizá-lo a movimentar-se, sendo esta opção muito utilizada em testes de algoritmos para simulações.

1.5 Estado de Arte

Esta secção pretende introduzir o surgimento dos sistemas IMU, e onde estes começaram por ser utilizados.

De seguida serão dados a conhecer os princípios de funcionamento dos principais tipos de acelerómetros, giroscópios e magnetómetros, também com referência à tecnologia MEMS. Para além disso serão também referidos alguns métodos de cálculo da orientação, recorrendo a IMUs, e também uma pequena introdução ao INS.

Para finalizar, serão referenciados alguns trabalhos virados para a robótica humanoide nos quais se encontra a implementação de sensores inerciais.

1.5.1 *Inertial Navigation System - INS*

Para atender à necessidade de controlar e monitorizar a trajetória ou orientação de um dado objeto, foi desenvolvido um conceito denominado de sistema de navegação inercial, do inglês *Inertial Navigation System* ou apenas INS. Este sistema é composto por um conjunto de dispositivos sensoriais que, na presença de um movimento, permitem quantificá-lo [16].

Com as primeiras utilizações na área militar, o INS estendeu-se mais tarde para a área naval (navios e submarinos), espacial e mais tarde na área aeroespacial. Com a evolução da tecnologia o custo do fabrico dos dispositivos que podem integrar o INS baixou consideravelmente. Desde então, a implementação de sistemas INS alastrou-se também para áreas comerciais[16].

Num sistema INS existem grandezas que podem ser obtidas diretamente de sensores, sendo elas:

Aceleração linear - obtida através acelerómetros;

Velocidade angular - obtida através de giroscópios;

Campo magnético - obtido através de magnetómetros.

A partir das grandezas anteriores, é possível obter grandezas como:

Velocidade linear - integrando a aceleração linear;

Deslocamento linear - integrando a velocidade linear;

Deslocamento angular - integrando a velocidade angular.

O campo magnético não é considerado uma grandeza inercial, no entanto, os magnetómetros costumam ser integrados em sistemas INS, sendo as suas medições utilizadas para o cálculo de um dos valores de orientação.

Para a obtenção da velocidade linear e do deslocamento linear é possível recorrer às equações (1.1) e (1.2), respetivamente, onde v representa a velocidade linear, s representa o deslocamento linear, a representa o valor da aceleração e t o tempo decorrido.

$$v(t) = \int a \, dt \quad (1.1)$$

$$s(t) = \iint a \, dt \quad (1.2)$$

Estas duas equações são utilizadas em regime contínuo, no entanto, os sensores apenas fornecem os seus dados em instantes de tempo (regime discreto), não descrevendo por isso grandezas contínuas no tempo. Sendo assim, para o regime discreto é possível recorrer às equações (1.3) e (1.4) para determinar a velocidade linear e deslocamento linear onde k representa o número de cada iteração.

$$v_k = v_{k-1} + a_k(t_k - t_{k-1}) \quad (1.3)$$

$$s_k = s_{k-1} + v_{k-1}(t_k - t_{k-1}) + \frac{a_k(t_k - t_{k-1})^2}{2} \quad (1.4)$$

Para calcular o deslocamento angular é possível recorrer à equação (1.5), aplicável apenas no regime contínuo. No entanto, assim como nos casos anteriores, os sensores que fornecem dados da velocidade angular (giroscópios) apresentam resultados discretos. Para o regime discreto é possível calcular o deslocamento angular através da equação (1.6). Nestas equações, θ representa o deslocamento angular, ω a velocidade angular e t a variável tempo.

$$\theta(t) = \int \omega \, dt \quad (1.5)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \omega_k(t_k - t_{k-1}) \quad (1.6)$$

Num sistema INS existem fontes de erro que devem ser analisadas. Uma das fontes de erro está associada às medições dos sensores. Outra fonte de erro no processo iterativo, surge ao considerar que entre iterações, os valores medidos são constantes, originando aproximações que ao longo das tempo vão representar uma acumulação de erro.

1.5.2 Acelerómetros

Os acelerómetros são dispositivos que permitem a quantificação da aceleração linear apresentado por um corpo durante o seu movimento. A quantificação que este tipo de sensores fornece, consiste essencialmente na conversão de valores interpretados num sistema mecânico para valores de tensão elétrica.

O sistema mecânico presente em todos os acelerómetros é sempre desenvolvido sob o princípio da Segunda Lei de Newton (1.7). Sob o efeito da aceleração a , é gerada uma força F num corpo, sendo a força proporcional à massa m deste.

$$F = m \times a \quad (1.7)$$

Apesar de todos os acelerómetros funcionarem segundo o princípio atrás descrito, existem vários processos através dos quais se converte a força F em valores de tensão elétrica. É nesta particularidade que se distinguem os vários tipos de acelerómetros, dentro dos quais de destacam os seguintes:

Acelerómetro Piezoelétrico - a massa m é colocada sobre material piezoelétrico. Sempre que uma força F for exercida sobre uma massa m , esta força vai ser transmitida ao material piezoelétrico, o qual gera uma diferença de potencial proporcional à força exercida [17]. A Figura 1.3 ilustra uma montagem do acelerómetro descrito.

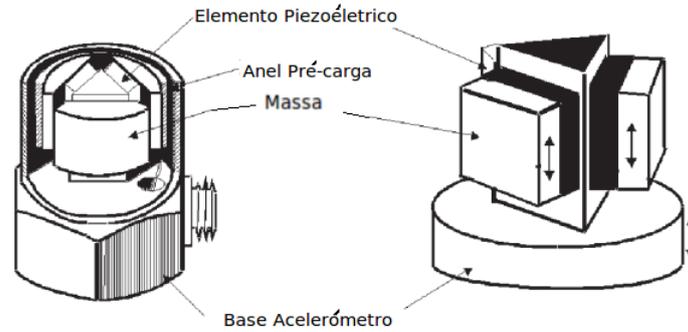


Figura 1.3: Exemplo de um acelerómetro piezoelétrico [17].

Acelerómetro Piezoresistivo - a massa m deste acelerómetro é uma barra que sofre flexão na presença da força F . Ao fletir, a barra provoca a deformação de material piezoresistivo, o qual gera uma diferença de potencial que é quantificado [17]. Na Figura 1.4 está representado o funcionamento deste tipo de acelerómetro.

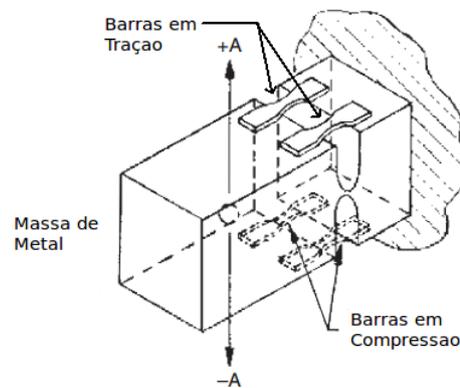


Figura 1.4: Exemplo de um acelerómetro piezoresistivo [17].

Acelerómetro Capacitivo - aqui a massa m é mais uma vez uma barra que é colocada entre dois eléctrodos que funcionam como um condensador. Na presença de uma força F , a massa m sofre flexão, causando uma variação na constante do condensador. Através desta variação é quantificado o valor da aceleração [17]. Na Figura 1.5 está representada a montagem deste tipo de acelerómetro.

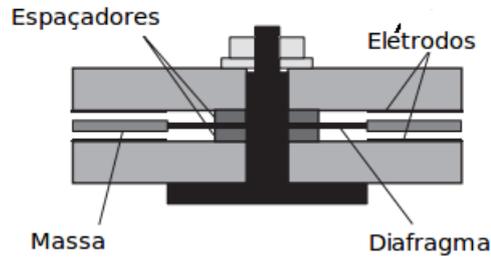


Figura 1.5: Exemplo de um acelerômetro capacitivo [17].

Existem outros exemplos de acelerômetros, no entanto, estes são os tipo mais utilizados.

1.5.3 Giroscópios

Os giroscópios são dispositivos que permitem a leitura das velocidades angulares geradas na presença de um movimento rotacional [18].

Para este tipo de sensor, é também possível encontrar várias soluções construtivas, sendo as mais encontradas as seguintes:

Giroscópio de Massa Giratória - este tipo de giroscópio é constituído por uma massa giratória acoplada num suporte com três eixos móveis. A massa (com formato de um disco) é imposta uma velocidade de rotação constante em torno do seu eixo. Quando o suporte é inclinado, o efeito giroscópico causa precessão, ou seja, gera-se uma força que faz o suporte rodar em torno de um eixo ortogonal ao eixo de rotação do disco e ao da inclinação sofrida [18]. Na Figura 1.6 é possível observar a montagem de giroscópio deste tipo, com um grau de liberdade.

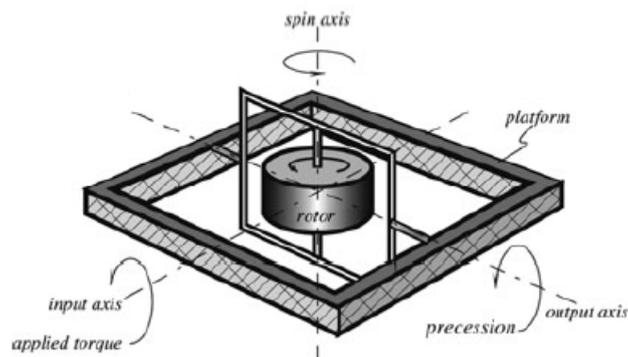


Figura 1.6: Exemplo de um giroscópio de rotor com um grau de liberdade [18].

Giroscópio de Vibração - os componentes deste tipo de giroscópio são construídos através da micro-maquinagem. Uma pequena massa é colocada num suporte de três

graus de liberdade. À massa é induzida uma vibração e na presença de um movimento rotacional exterior, através do fenómeno de *Coriolis* é gerada uma vibração no suporte com a mesma frequência da vibração induzida, amplitude proporcional à velocidade de rotação. A amplitude desta vibração gerada é então convertida para valores da velocidade de rotação [18]. Na Figura 1.7 é possível observar um esquema do suporte e massa constituinte de um giroscópio deste tipo.

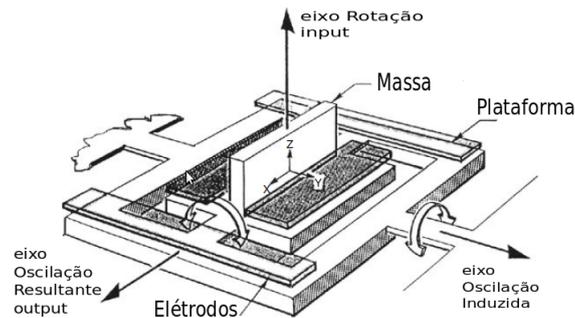


Figura 1.7: Exemplo de um giroscópio de vibração para um grau de liberdade. [18]

Giroscópio Ótico - é um tipo de giroscópio que se baseia no efeito de *Sagnac*. A sua construção apresenta dois enrolamentos em fibra ótica do mesmo comprimento, um emissor de feixes de luz e um recetor de luz. Numa das pontas de cada enrolamento encontra-se um emissor de feixe luminoso e na outra extremidade um recetor. Em cada enrolamento é emitido um feixe de luz, viajando cada feixe em sentido contrário ao outro em torno dos enrolamentos. Segundo o efeito de *Sagnac*, na presença de um movimento de rotação, a velocidade que os feixes de luz demorarão a percorrer os enrolamentos serão diferentes, criando-se um desfasamento nos tempos de chegada entre os dois feixes, proporcional à velocidade da rotação. Esta velocidade de rotação, é então quantificada através do desfasamento medido [18].

1.5.4 Magnetómetros

Os magnetómetros são dispositivos que permitem quantificar o campo magnético envolvente. Como os sensores anteriores, existem soluções diferentes na construção deste tipo de sensores. No entanto, os mais comuns são os seguintes:

Search-Coil Magnetómetro - composto por um núcleo de material de alta permeabilidade envolto por uma espira condutora, quando este sensor experimenta uma variação de fluxo magnético, gera-se uma diferença de potencial na espira proporcional à variação de fluxo (Lei de Indução de Faraday) [19]. Na Figura 1.8 encontra-se um esquema de montagem de um sensor deste tipo.

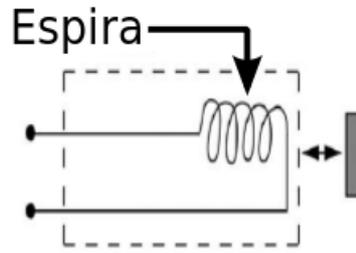


Figura 1.8: Esquema de uma montagem de um magnetômetro *Search-Coil* de apenas uma espira. [19]

Magnetômetros *Fluxgate* - este tipo de sensor é composto por um núcleo ferromagnético enrolado por duas espiras. Numa das espiras faz-se passar uma corrente elétrica sinusoidal a oscilar entre zero e valores capazes de saturar o núcleo. Assim, é criada uma variação do fluxo magnético que atravessa o núcleo que, por sua vez, irá induzir uma diferença de potencial na segunda espira. Na presença de um campo magnético exterior, a variação do fluxo sentido no núcleo será alterada e, como consequência, a diferença de potencial média gerada na segunda espira será diferente e proporcional ao campo magnético exterior [19].

Magnetômetros Magnetoresistivos - neste sensor é utilizado um circuito elétrico que contém um componente cujo seu material possui uma resistência variável e proporcional ao campo magnético que o atravessa.

1.5.5 *Micro Electro-Mechanical System* - MEMS

Micro Electro-Mechanical System - MEMS, é uma tecnologia que incorpora elementos mecânicos e eletrônicos em dispositivos de dimensões reduzidas (à escala micrométrica). Com esta tecnologia surgiu uma nova geração de dispositivos de dimensões reduzidas, baixo consumo e custos reduzidos, apresentando ainda elevado desempenho.

Os acelerômetros desenvolvidos segundo a tecnologia MEMS apresentam os mesmos princípios de funcionamento dos seus antecessores, sendo a diminuição das suas dimensões a principal diferença. Na Figura 1.9 encontra-se um exemplo do interior de um acelerômetro capacitivo, desenvolvido segundo a tecnologia MEMS. Nesta tecnologia é também possível encontrar acelerômetros do tipo piezoresistivos e piezoelétricos, entre outros [20].

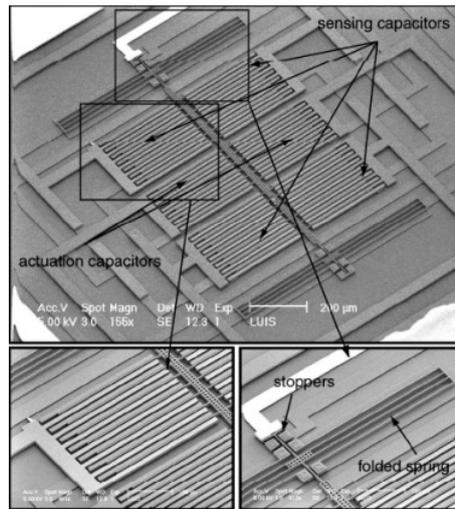


Figura 1.9: Acelerómetro capacitivo, produzido segundo tecnologia MEMS [20].

Para os giroscópios MEMS os princípios de disco rotativo e fibra ótica apresentam inconvenientes de construção. Por esse motivo, os giroscópios MEMS são maioritariamente do tipo giroscópios de vibração [21]. Na Figura 1.10 é possível observar um exemplo de construção de um giroscópio de vibração MEMS.

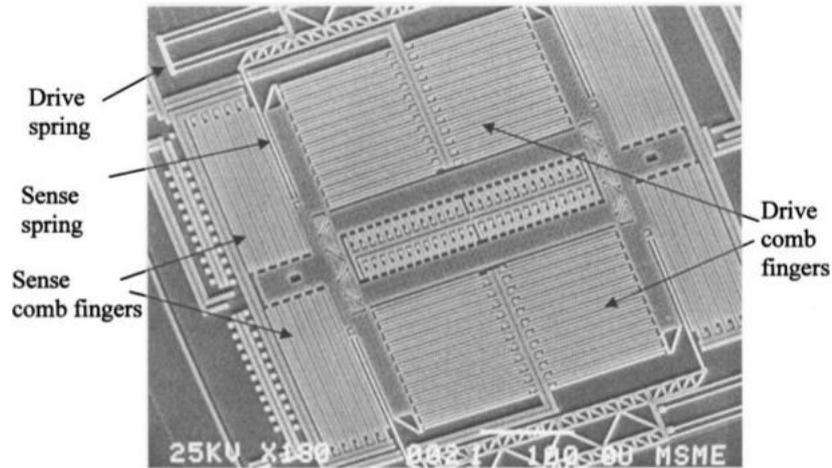


Figura 1.10: Giroscópio de vibração, produzido segundo tecnologia MEMS [21].

Nos magnetómetros a tecnologia MEMS permitiu a construção destes sensores segundo princípios de funcionamento como *fluxgate* e magnetoresistivos. No entanto, o tipo de magnetómetro MEMS mais utilizado é denominado de magnetómetro de ressonância. Neste sensor, uma placa vibra com uma frequência igual à sua frequência de ressonância. Na presença de um campo magnético exterior a frequência com que a placa vibra será alterada, sendo que pela diferença da frequência de oscilação é possível quantificar o campo magnético exterior [22].

1.5.6 Algoritmos para Cálculo de Orientação

A utilização de acelerómetros e giroscópios como ferramenta de navegação, tem sido essencialmente realizada com auxílio de determinados algoritmos de processamento que recorrem aos dados dos sensores para obter os dados da orientação.

De seguida, apresentam-se alguns dos algoritmos de processamento mais utilizados para o cálculo de orientação de um dado referencial, recorrendo aos dados de acelerómetros e giroscópios.

Algoritmo baseado em *Direction Cosine Matrix* - DCM

Direction Cosine Matrix é uma matriz que define a rotação de um dado objeto em relação a um referencial. O seu nome deve-se ao fato de todos os elementos desta matriz poderem ser representados através do cosseno dos ângulos entre o referencial global e um dado referencial qualquer.

Numa aplicação do INS, através da obtenção dos elementos desta matriz é possível calcular a orientação (*roll*, *pitch* e *yaw*) de um dado referencial, em relação a um referencial global, através de um processo iterativo, no qual se vão acumulando os sucessivos incrementos angulares. [23]

Na implementação de um algoritmo iterativo, para a obtenção dos campos da matriz de rotação indispensáveis ao cálculo das orientações, recorre-se a dados obtidos por giroscópios. Os dados deste tipo de sensor permitem, a cada iteração, obter a matriz DCM do incremento de rotação sofrido pelo referencial do sensor. [23]

Para este algoritmo apenas são indispensáveis os dados dos giroscópios, no entanto, estes sensores apenas fornecem incrementos de rotação, não fornecendo a orientação inicial em que o referencial se encontra. Além disso, os giroscópios apresentam erros de medição que se acumulam a cada iteração (*drift*). Como solução deste problema, são incorporados os dados de acelerómetros que fornecem informação absoluta para as inclinações *pitch* e *roll* iniciais e como correção do *drift* dos giroscópios, sendo apenas possível para a sua utilização para situações praticamente estáticas. [23]

Nos casos em que é necessário o ângulo *yaw*, pode-se recorrer a magnetómetros que através das medições do campo magnético terrestre, fornecem a informação absoluta necessária à compensação deste ângulo. No entanto, a utilização deste sensor, fica limitada a aplicações nas quais o campo magnético envolvente seja constante.

Extended Kalman Filter - EKF

Extended Kalman Filter é um algoritmo de filtragem que se apresenta como um estimador recursivo, isto é, que tira partido dos dados anteriormente obtidos, para calcular o valor estimado.

Este, é uma adaptação do *Kalman Filter*, criado por *R. E. Kalman* publicado em 1960. O que diferencia o *Extended Kalman Filter* do *Kalman Filter* é a sua adaptação que permite a utilização para sistemas não lineares [24].

Para a implementação do EKF é necessário estabelecer um conjunto de parâmetros tais como o vetor das variáveis de estado do sistema, utilizadas na criação de equações que descrevem o comportamento do sistema, e definir também os valores para os ruídos de processo e medição. A utilização deste algoritmo implica que as variáveis de estado envolvidas apresentem ruído gaussiano [24].

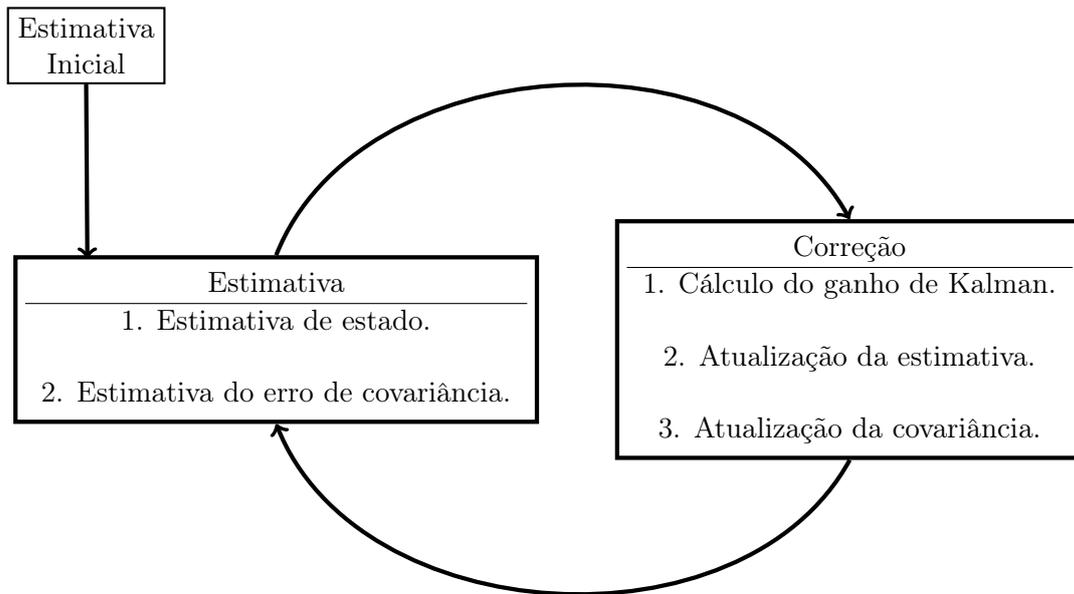


Figura 1.11: Esquema de Funcionamento EKF.

Na Figura 1.11 encontra-se um esquema resumido de como o EKF funciona. Através de uma estimativa inicial o processo inicia-se com a estimativa das covariâncias do sistema. De seguida, segue-se a fase da correção, na qual são calculados os ganhos do algoritmo, sendo estes utilizados no cálculo do novo *output*.

O EKF é uma metodologia que traz benefícios no campo da previsão. No entanto, se as equações que descrevem o comportamento do sistema e os parâmetros do ruído não estiverem bem definidos, este algoritmo perde a sua capacidade de realizar a previsão correta dos valores do *output*.

Filtro Complementar - *Complementary Filter*

O *Complementary Filter* é um algoritmo computacionalmente ágil que pretende combinar os aspetos positivos de dois sensores, de forma a obter resultados de maior precisão quando comparados com os resultados de cada sensor isolado.

Para o cálculo da posição angular de um dado referencial, é comum recorrer à integração dos dados provenientes de giroscópios, no entanto, estes dados sofrem da acumulação de erros obtidos em cada medição, conhecido por *drift*. Também para o cálculo da posição angular é comum utilizar os dados de acelerómetros (apenas para *pitch* e *roll*), tendo a

vantagem destes cálculos representarem valores absolutos, sendo apenas possível de realizar para situações consideradas estáticas. Assim, é comum combinar os resultados destes dois sensores, através da soma dos seus resultados de forma ponderada, atribuindo maior ênfase aos resultados de um sensor para as situações em que este apresenta melhores resultados.

Para a combinação destes dois sensores é comum seguir a metodologia apresentada na Figura 1.12. Após a recepção dos dados de cada sensor, segue-se o cálculo da posição angular de forma individual. De seguida segue-se a aplicação de uma filtragem, na qual a posição angular obtida pelos giroscópios é filtrada com um filtro passa-alto, e a posição angular obtida pelos acelerómetros é filtrada com um filtro passa-baixo. Esta filtragem dos sensores destina-se à ponderação dos valores obtidos pelos dois sensores distintos, os quais são somados, originando o *output* final. De salientar que a ponderação da combinação dos dados dos sensores pode ser alterada até se encontrar os fatores de ponderação que permitem os melhores resultados para a aplicação em questão. No entanto, deve-se respeitar sempre o fato de que a soma das constantes de ponderação seja sempre igual a 1. [25]

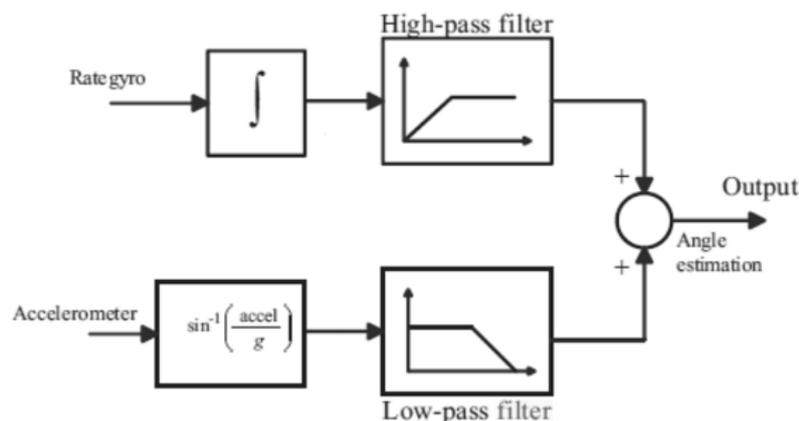


Figura 1.12: Exemplo implementação filtro complementar com giroscópios e acelerómetros.[26]

1.5.7 IMU na Robótica Humanoide

Com o aparecimento da tecnologia MEMS, a utilização de sensores do tipo IMU por parte da área da robótica humanoide tem apresentado um grande crescimento.

Uma das formas de tirar partido da tecnologia IMU passa pela sua implementação em aplicações destinadas à teleoperação de robôs. Em [27] procedeu-se à implementação de vários *Inertial Measurement Units* (IMUs) num fato, como o que se encontra presente na Figura 1.13. Esta implementação teve como objetivo a deteção dos movimentos do utilizador, com o fato vestido, fazendo com que um robô humanoide realizasse um movimento equiparado, através de imitação. Como principal tarefa a imitar, os movimentos testados consistiram em movimentos de marcha. Nos resultados obtidos com esta implementação, a implementação de IMUs mostrou-se bem sucedida.

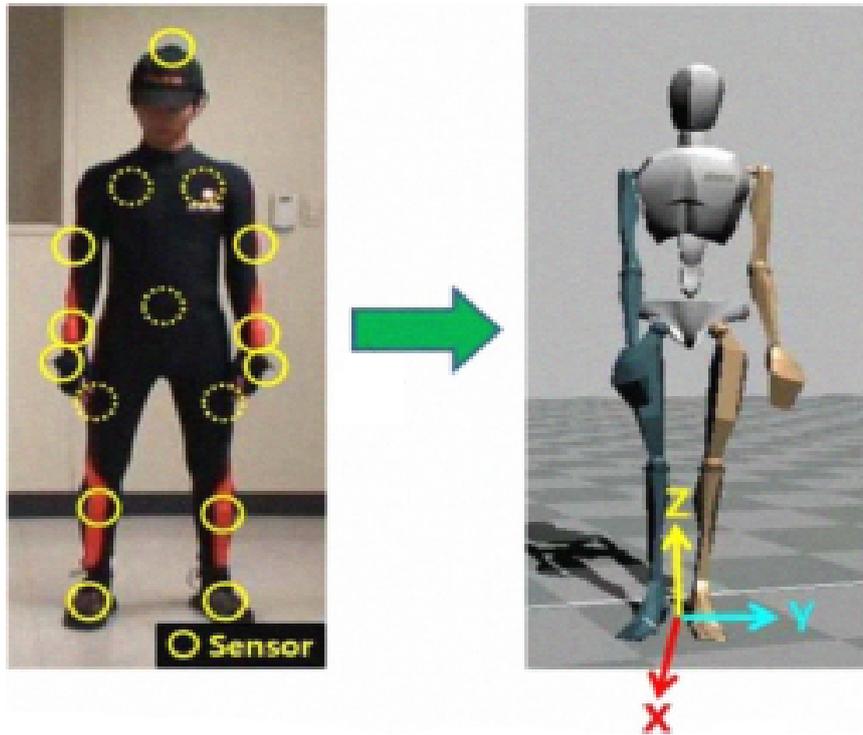


Figura 1.13: Demonstração do fato com implementação de sensores IMU.[27]

Outro exemplo de teleoperação foi realizado em [28], no qual foram desenvolvidos IMUs, constituídos por giroscópios e acelerômetros, os quais foram utilizados no braço de um operador, de forma a teleoperar através de imitação, um braço robótico antropomórfico com os dados provenientes dos sensores.

Um outro tipo de implementação de IMUs pode ser encontrada no trabalho desenvolvido em [29], no qual se encontra incorporada uma unidade IMU composta por um giroscópio de 2 GDL e um acelerômetro de 3 GDL no tronco do robô humanoide *Nao* apresentado na Figura 1.14. Esta implementação destina-se ao cálculo das orientações *pitch* e *roll* do humanoide em relação ao referencial global, combinando-as com dados de um sensor laser e *encoders* dos atuadores do robô, com o objetivo de calcular a sua posição e orientação durante a execução de tarefas como marcha e subida de escadas. A unidade inercial foi incorporada neste projeto pois revelou-se dotada de maior precisão, comparativamente aos resultados obtidos pela cinemática do robô, no cálculo da orientação do mesmo.



Figura 1.14: Robô Humanoide *Nao*, o qual apresenta a implementação de um IMU. [29]

Em [30] foram incorporados dois giroscópios no robô humanoide apresentado na Figura 1.15. Os dois giroscópios, posicionados sob a orientação dos planos sagital e lateral, foram utilizados na detecção de situações de queda durante testes de marcha. Com esta implementação, em todos os testes realizados, foram registados apenas 5% de falsos positivos. Para além disso, os mesmos dois giroscópios forneceram dados de orientação da plataforma humanoide, trazendo melhorias na sua trajetória durante a marcha.

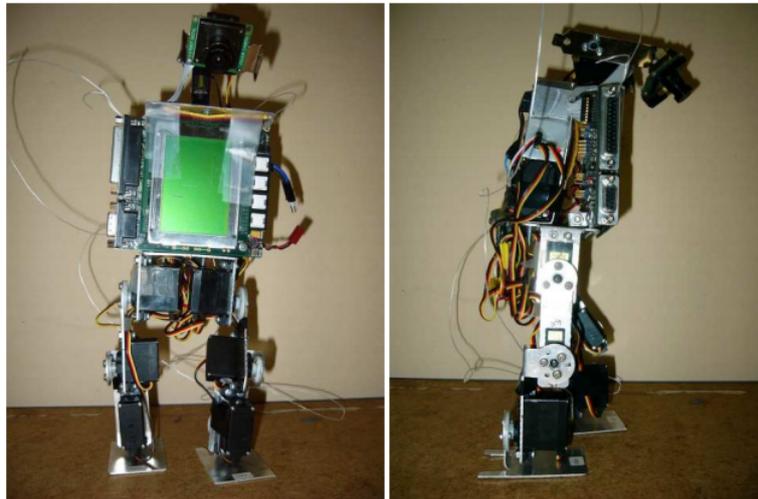


Figura 1.15: Robô Humanoide *Tao-Pie-Pie*, no qual foram implementados dois giroscópios [30].

O projeto desenvolvido em [31] representa mais um exemplo da utilização de giroscópios e acelerómetros dentro da robótica humanoide. No robô humanoide apresentado

na Figura 1.16 foram incorporados um giroscópio e um acelerómetro. Estes dois sensores foram utilizados para calcular a velocidade do robô humanoide durante a tarefa de marcha, e para além disso, foram ainda utilizados para obter um indicador de instabilidade, sendo esse indicador utilizado num algoritmo de reação caso seja identificada uma situação de instabilidade durante uma operação de marcha. Para além disso, paralelamente a esta metodologia foi desenvolvida uma nova forma de obter o mesmo indicador de instabilidade, mas neste caso através do *zero moment point - ZMP* (apresentado em [32] por *M. Vukobratovic*). Comparando os resultados, o algoritmo que recorre aos dados dos sensores obteve melhores resultados.

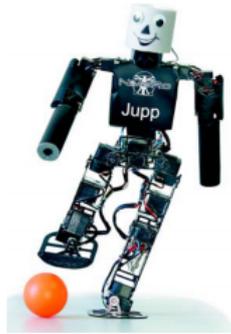


Figura 1.16: Robô Humanoide *Jupp*, no qual foram implementados um giroscópio e um acelerómetro.[31]

Em [33] foi instalado um acelerómetro no robô humanoide, apresentado na Figura 1.17, com o objetivo de fornecer dados sobre a aceleração e a variação da aceleração. Estes dados são incorporados num controlador de lógica difusa utilizado no equilíbrio estático do robô humanoide perante alterações das condições externas (nomeadamente a alteração da orientação de uma plataforma, sobre a qual está colocado o robô humanoide). Neste projeto os intervenientes concluem que a utilização do acelerómetro para a tarefa de balanceamento do robô humanoide foi bem sucedida.

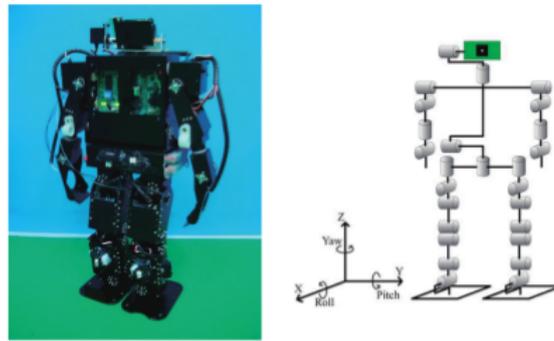


Figura 1.17: Robô Humanoide *TWNHR-IV*, no qual foi implementado um acelerómetro. [33]

Na Figura 1.18 apresenta-se um robô humanoide utilizado no projeto [34], no qual

a utilização de um acelerómetro destina-se à deteção de distúrbios externos, de forma a reagir na presença destes com o objetivo deste robô permanecer em equilíbrio.

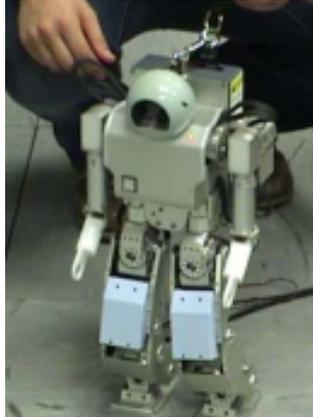


Figura 1.18: Robô Humanoide, no qual foi implementado um acelerómetro [34].

1.6 Estrutura da dissertação

Nos capítulos seguintes apresentam-se todas as etapas que constituem este projeto. Desta forma, as etapas encontram-se organizadas da seguinte forma:

- Capítulo 2 - Caracterização de Sensores
neste capítulo é realizada uma descrição e avaliação dos sensores disponíveis através da realização de testes experimentais;
- Capítulo 3 - Rede de Sensores Inerciais
neste capítulo é exposto o desenvolvimento e conceção da rede de sensores inerciais e referida a sua primeira incorporação no robô humanoíde;
- Capítulo 4 - Experiencias e Resultados
neste capítulo são descritos os testes experimentais realizados com a rede de sensores inerciais incorporados no robô humanoíde, bem como a exposição e discussão de resultados obtidos;
- Capítulo 5 - Conclusões e trabalho futuro
neste capítulo é realizada a análise dos objetivos cumpridos e conclusões obtidas. Para além disso serão discriminados possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Caraterização de Sensores

Neste capítulo serão apresentados os sensores IMU disponíveis para o desenvolvimento deste projeto. Serão também apresentadas as características presentes nos *datasheets* dos fabricantes, e de seguida, uma exposição de várias experiências realizadas com os sensores que serviram para os avaliar e comparar entre si, com o objetivo de estabelecer qual deles se adapta melhor ao pretendido neste projeto.

2.1 Sensores Disponíveis

Para este projeto foram disponibilizados dois modelos diferentes de IMU. Apesar de serem modelos de diferentes fabricantes, ambos são de 9 graus de liberdade - GDL, constituídos por um acelerómetro, um giroscópio e um magnetómetro, todos com três GDL.

Antes de realizar qualquer conclusão acerca destes sensores foi preciso caraterizá-los e testá-los. Nas próximas linhas estão apresentadas as características destes dois sensores apresentadas pelo fabricantes.

- RAZOR 9GDL- SEN 10736 (Sensor A) [35]

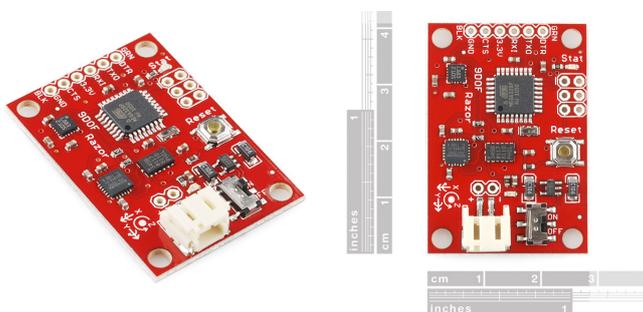


Figura 2.1: IMU Razor 9 gdl

- 9 graus de liberdade:
 - * Acelerómetro 3 graus de liberdade - ADXL345;

- Funcionamento até $\pm 16g$;
- Resolução até 13bit;
- Sensibilidade até 4mg/LSB;
- Frequência funcionamento até 3.2 kHz;
- * Giroscópios 3 graus de liberdade - ITG3200;
 - Funcionamento até ± 2000 °/s;
 - Resolução até 16bit;
 - Sensibilidade até 14.375 LSB/(°/s);
 - Frequência funcionamento até 30 kHz;
- * Magnetômetro 3 graus de liberdade - HMC5883L.
 - Funcionamento até ± 8 gauss;
 - Resolução até 12bit;
 - Sensibilidade até 2 miligauss;
 - Frequência funcionamento até 400 kHz;
- Microcontrolador ATmega328P incorporado;
- Comunicação com o exterior via RS232;
- Voltagem de alimentação entre 2.5-3.3V;
- POLOLU - MinIMU9DOF v2 (Sensor B) [36]

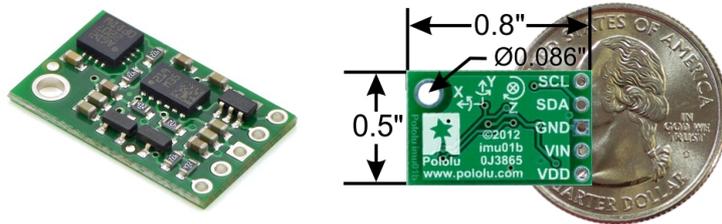


Figura 2.2: minIMU-v2 Pololu 9gdl

- 9 graus de liberdade:
 - * Acelerômetro 3 graus de liberdade - LSM303DLHC;
 - Funcionamento até $\pm 16g$;
 - Resolução até 12bit;
 - Sensibilidade até 1mg/LSB;
 - Frequência funcionamento até 400 kHz;
 - * Giroscópio 3 graus de liberdade - L3GD20;
 - Funcionamento até ± 2000 °/s;
 - Resolução até 16bit;
 - Sensibilidade até 8.75 mdps/LSB;
 - Frequência funcionamento até 760 Hz;
 - * Magnetômetro 3 graus de liberdade- LSM303DLHC.
 - Funcionamento até ± 8 gauss;

- Resolução até 12bit;
- Sensibilidade até 1 miligauss;
- Frequência funcionamento até 400 kHz;
- Comunicação com o exterior via I2C;
- Possibilidade de ligar a 3.3V-Vdd ou 5V-Vin.

2.2 Modo de Ligação

Para a comunicação entre *PC* e cada um dos sensores podem-se utilizar recursos como conversores e/ou interfaces intermédias. Para a realização dos testes de avaliação dos IMUs foram utilizadas as formas mais simples e rápidas de implementar que foram encontradas para conexão com o *PC*.

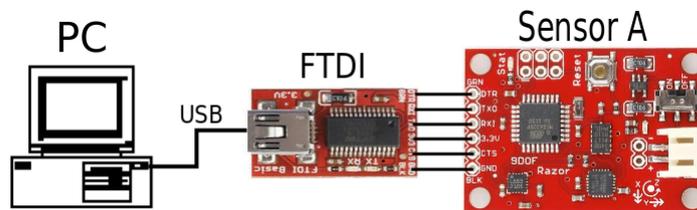


Figura 2.3: Esquema montagem e ligação sensor A - PC

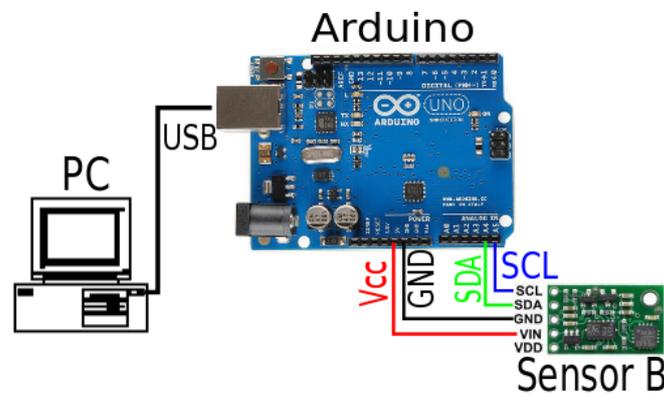


Figura 2.4: Esquema montagem e ligação sensor B - PC

Na Figura 2.3 encontra-se um esquema da forma como se efetuou a ligação do sensor A com o *PC*. Para esta ligação apenas foi preciso utilizar um conversor *FTDI RS232-USB* para o qual a unidade já se encontra preparada, o que possibilitou o recurso a um simples cabo *USB* que conectou o conversor ao *PC*.

Na Figura 2.4 encontra-se um esquema da forma como foi feita a ligação entre a unidade B e o *PC*. Uma vez que este tipo de unidade não dispõe de um microcontrolador incorporado, foi necessária a implementação de *hardware* que possibilitasse a comunicação com esta. O *Arduino Uno*, uma placa de desenvolvimento e prototipagem de aplicações eletrónicas, foi a solução mais rápida e prática, uma vez que para este dispositivo já se

encontram disponíveis bibliotecas que agilizam a comunicação a partir do protocolo I^2C com a unidade. De seguida, a comunicação *Arduino - PC* é realizada com recurso a um cabo *USB*.

2.3 Calibração dos Sensores

A calibração é um processo pelo qual se determina a diferença entre a medição de uma grandeza obtida por um sensor, e o valor real da mesma. Este processo é destinado a compensar a diferença calculada, de forma a melhorar a precisão dos dados que é necessário quantificar.

Os sensores presentes em ambos os tipos de IMU disponibilizados para este projeto, acelerómetro, giroscópio e magnetómetro, apresentam medições sujeitas a desvios, *offset*, que acarretam erros que poderão ser prejudiciais às aplicações a que estes estejam destinados. Sendo assim, através da calibração, o erro, *offset*, que cada sensor apresenta é quantificado, e de seguida, é utilizado como forma de compensar os valores medidos.

O procedimento de calibração mais simples, que é possível de realizar para o acelerómetro, passa pela colocação deste sensor em posições estáticas, cujo valor esperado seja conhecido. De seguida, é calculada a diferença entre os valores obtidos e o valor esperado, sendo esse o valor utilizado para compensar nas posteriores medições. Este procedimento deve ser repetido para todos os eixos do sensor em questão.

A calibração mais simples que é possível realizar para o giroscópio, passa pela imposição de uma posição estática, na qual o sensor permaneça em repouso, e realizar a medição dos valores por este obtidos. A diferença entre os valores obtidos e a referência, que nesta situação é de $0^\circ/s$, é utilizada para compensar o *offset* obtido.

Uma forma também simples de calibrar o magnetómetro, ou seja, compensar o *offset* por este apresentado, passa pela mesma metodologia da calibração do acelerómetro, na qual se coloca o magnetómetro em posições cujos valores dos seus eixos são conhecidos, e daí proceder à compensação do *offset* apresentado. No entanto, sendo possível o campo magnético pelo qual o magnetómetro se encontra rodeado sofrer interferências, a calibração deste sensor pode ser mais completa, através de um método mais exaustivo, no qual se contabiliza um maior número de medições em posições diversas, orientações, fazendo um levantamento tridimensional, criando um elipsoide com os valores medidos. De seguida, esse levantamento é comparado com o elipsoide de referência, que contém os valores que o campo magnético da terra apresenta sem perturbações, e da diferença dos dois, surge o elipsoide de compensação. Esta metodologia de calibração só é possível realizar em situações em que a perturbação do campo magnético terrestre é constante.

Para os sensores das unidades inerciais disponíveis, foram realizadas as calibrações simples descritas anteriormente. Para a sua calibração, acelerómetros e magnetómetros são colocados em posições fixas durante a realização de leituras que são de seguida comparadas com valores esperados, calculando assim os valores de *offset*. Os giroscópios são colocados numa posição estática enquanto executa algumas leituras, comparando os valores obtidos com os valores que são esperados, sendo a diferença entre eles o valor de *offset*. Para todos os sensores, estas operações são repetidas para todos os eixos.

Mesmo que a metodologia de calibração para os sensores de ambas as unidades inercias apresente o mesmo princípio, entre estas existe uma diferença. Para o IMU A os dados das calibrações são obtidos antes de incorporar a unidade no seu local de funcionamento, e os dados obtidos pela calibração são guardados em memória no seu microcontrolador, sendo estes resultados utilizados sem proceder a novas calibrações, até que a unidade seja retirada do seu local de funcionamento e realizada novamente a operação de calibração. Para o IMU B, apenas o magnetómetro é calibrado com esta unidade fora do local de funcionamento. Os restantes sensores, acelerómetro e giroscópio apresentam calibrações realizadas no próprio local de funcionamento, sempre que esta unidade é iniciada.

Entre as duas metodologias de calibração dos sensores das duas unidades, a calibração do IMU A é mais exaustiva e completa, pode ser realizada em ambiente mais controlado, e não é realizada sempre que a unidade entra em funcionamento, enquanto que a calibração do IMU B é realizada sem a necessidade de retirar a unidade do seu local de funcionamento, e tem a possibilidade de ser realizada sempre que esta unidade é inicializada, no entanto, o dispositivo no qual esta unidade é incorporada, durante a calibração, deve permanecer imóvel, e adquirir configurações que permitam proceder à calibração adequada.

2.4 Testes dos Sensores

2.4.1 Braço Robótico - *Setup*

Em primeira análise, partindo do princípio que ambos os sensores A e B apresentam comportamentos idênticos, pode-se afirmar que o sensor B seria a melhor opção na implementação de uma rede destes sensores no robô humanoide, olhando para o simples fato de este se apresentar como a solução mais compacta. Contudo, antes de se optar pela solução definitiva tornou-se necessário realizar testes que ajudassem a comparar ambas as unidades, de forma a criar uma base de comparação entre os dois.

A solução para a realização desses testes surgiu dentro do laboratório. No LAR - Laboratório de Automoção e Robótica existe um braço robótico antropomórfico de seis graus de liberdade *Fanuc M-6iB 6s* capaz de manipular objetos com uma massa de 5 *Kg* aproximadamente, com uma repetibilidade de algumas centésimas de milímetro, tornando-se assim a ferramenta ideal para a realização dos testes. Na Figura 2.5 encontram-se um esquema do braço robótico em questão, e a representação das juntas nas quais o braço robótico consegue operar.

A preparação dos testes realizou-se com a divisão de duas fases distintas:

- Preparação do *setup*
 - Realização do projeto de um pequeno suporte, Figura 2.6a, com o objetivo de fixar os IMU no *end-effector* do braço robótico. O mesmo suporte encontra-se acoplado ao braço robótico na Figura 2.6b. Os desenhos técnicos dos elementos do suporte concebido encontram-se apresentados no apêndice A.
 - Elaboração de uma aplicação capaz de comunicar com os controladores do braço robótico para o fazer executar os movimentos pretendidos e obter a posição do braço robótico, assim como os dados dos sensores durante a realização

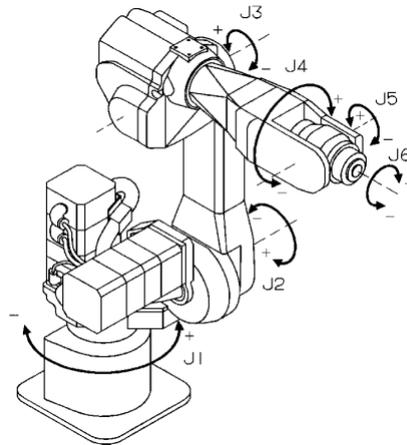
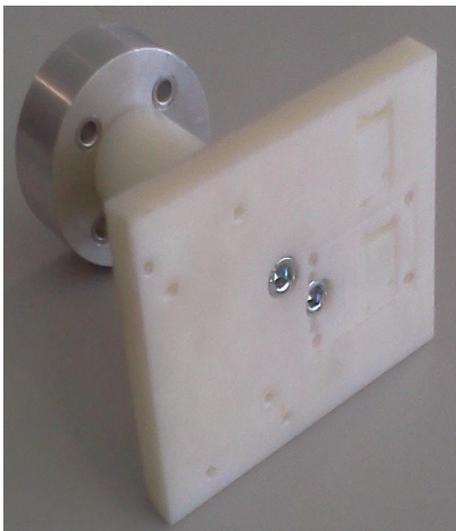


Figura 2.5: Braço robótico antropomórfico de 6 graus de liberdade - *Fanuc M-6iB 6s*.

dos testes, sendo estes dados posteriormente guardados em ficheiros através de uma *package* disponível na plataforma ROS.

- Desenvolvimento dos movimentos avaliados
 - Na consola do braço robótico foram desenvolvidos vários programas para que este realizasse movimentos que permitissem avaliar as reações dos sensores. Tais movimentos podem ser divididos em movimentos de translação e de rotação, sendo estes realizados apenas segundo um eixo. Foram ainda realizadas recolhas de dados com o braço robótico imobilizado.



(a) Suporte montado.



(b) Suporte acoplado.

Figura 2.6: Suporte de fixação dos sensores para braço robótico.

Para ter o *setup* preparado e pronto a funcionar, fixou-se o suporte ao *end-effector* do

braço robótico, fixando depois a esse suporte o IMU com o qual se pretende realizar os testes. De seguida, bastou ligar ao computador o IMU via *RS232* com um conversor para *USB*, ou seja, um conversor *FTDI* e conectar o braço robótico ao computador com um cabo *Ethernet* para a comunicação entre eles se realizar através do protocolo *TCP/IP*.

2.4.2 Módulo de Comunicação e Aquisição dos Dados

No fluxograma presente na Figura 2.7 pode-se observar o modo de funcionamento do código desenvolvido especificamente para a operação de movimentar o braço robótico e obter os dados deste e dos IMUs. De uma forma resumida, o computador necessita uma ordem de arranque, ou lançamento do programa, e este ao iniciar, a primeira tarefa que executa é a inicialização das comunicações, tanto com o IMU por via *RS232*, como com o braço robótico por *TCP/IP*. Durante todo o processo, se algum erro ocorrer com alguma das comunicações, a execução do programa é terminada.

Após as comunicações serem inicializadas com sucesso deve-se mandar o braço robótico executar um programa genericamente denominado de programa *TP*, que não é mais que uma lista de instruções de movimentos que este deve executar, onde se encontram os movimentos com os quais se pretendem avaliar os sensores. Após a ordem de execução do programa *TP*, e ainda durante a sua execução, o programa no computador avança para a fase seguinte, a fase de recolha de dados. Nesta fase são pedidos os dados das coordenadas e orientações do braço robótico e os dados provenientes do sensor montado no suporte. Esta ação é executada num ciclo fechado, *loop*, com uma frequência fixa de 20 Hz. Dentro deste *loop* são ainda guardados os valores que chegam do IMU e do braço robótico em ficheiros que depois são utilizados em pós-processamento que se destina à caracterização destes dois sensores.

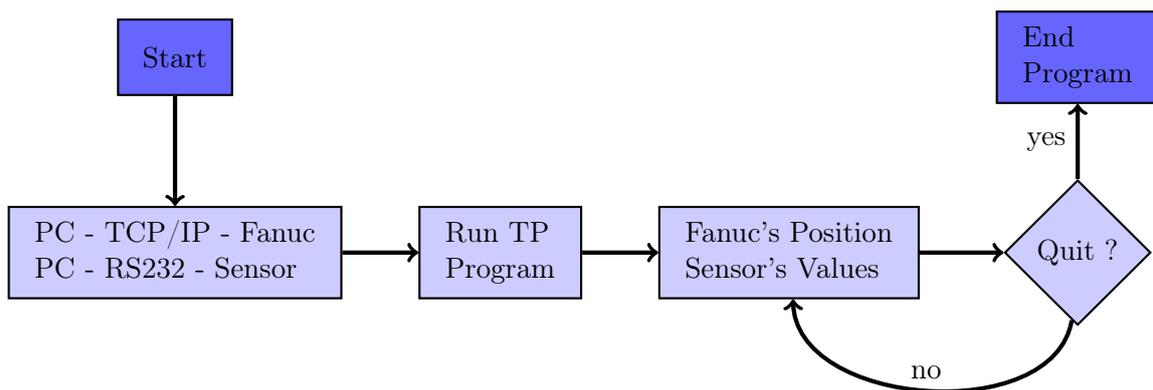


Figura 2.7: Funcionamento do programa de obtenção de dados durante testes realizados.

Uma vez terminada a recolha de dados durante os testes realizados, é necessário convertê-los num formato compatível com a ferramenta *MATLAB*[®].

2.4.3 Movimentos a realizar

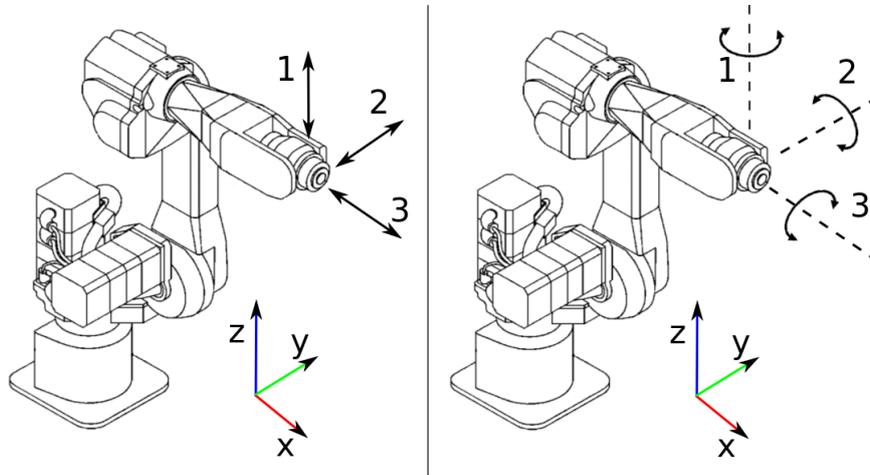


Figura 2.8: À esquerda - ilustração dos movimentos de translação ; à direita - ilustração movimentos de rotação.

As avaliações das unidades inerciais foram avaliadas durante a experiência realizada no braço robótico, perante três situações distintas:

- posições estáticas;
- movimento de rotação em torno de um eixo;
- movimento de translação em torno de um eixo.

Para os movimentos de translação e rotação todos os eixos são percorridos, ou seja, nos dois tipos, é realizado o movimento num eixo e de seguida o braço robótico regressa à posição inicial por forma a prosseguir para o movimento (da mesma natureza) no eixo que se segue. Na Figura 2.8 é possível observar uma ilustração dos movimentos realizados para cada um dos tipos de movimento, de translação representado à esquerda e de rotação representado à direita.

2.5 Resultados dos Giroscópios

Com os giroscópios é possível obter a velocidade angular durante um movimento, sendo que o foco da avaliação destes sensores se vira para movimentos angulares. No entanto, é também importante verificar que em movimentos de translação o seu comportamento não é afetado, por forma a distinguir de que tipo de movimento se trata.

2.5.1 Posição estática

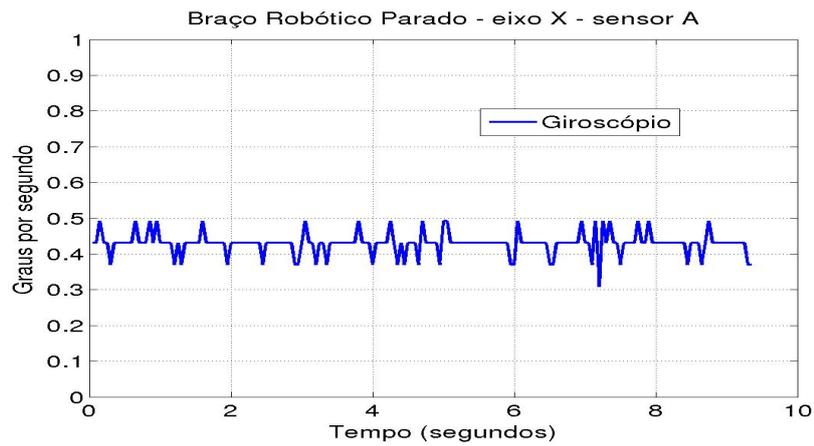


Figura 2.9: Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor A - Eixo X.

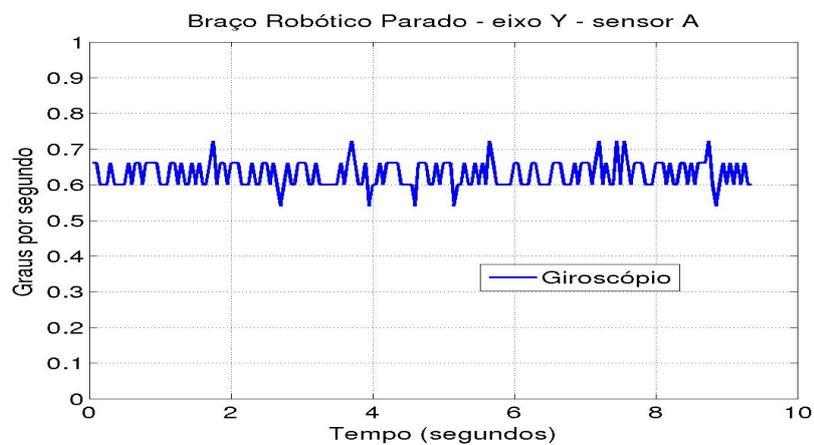


Figura 2.10: Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor A - Eixo Y.

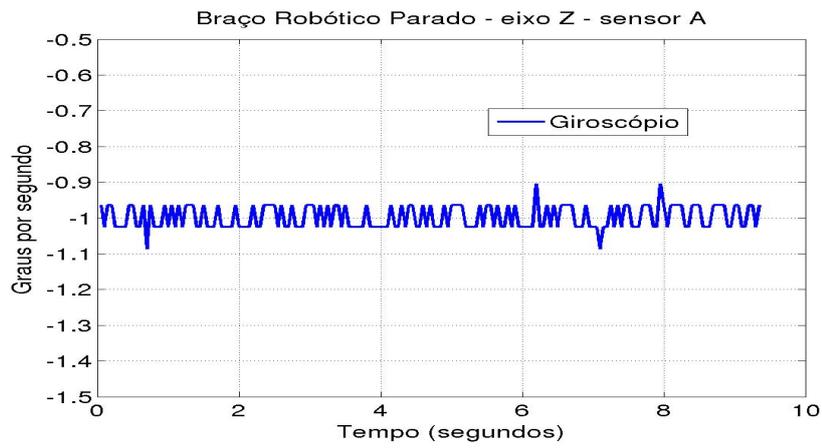


Figura 2.11: Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor A - Eixo Z.

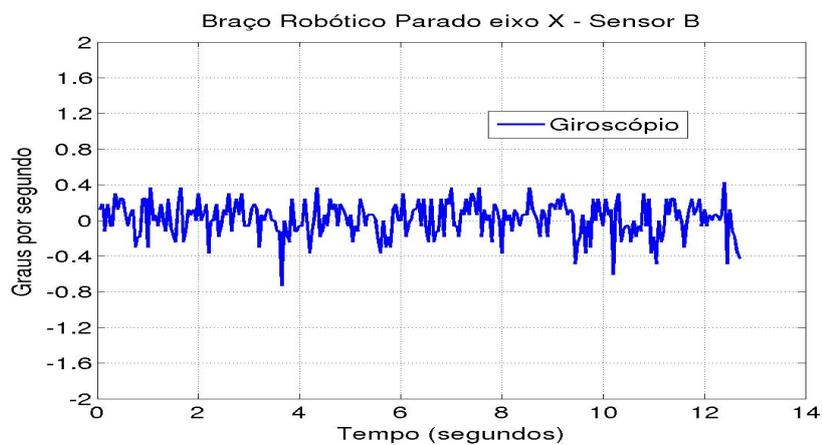


Figura 2.12: Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor B - Eixo X.

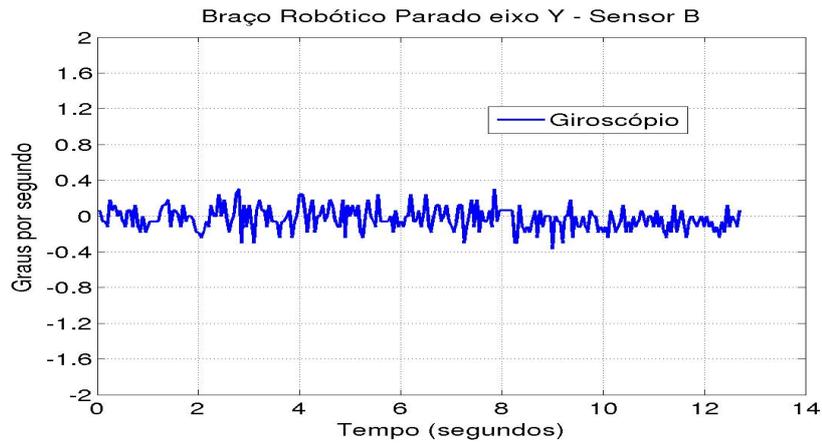


Figura 2.13: Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor B - Eixo Y.

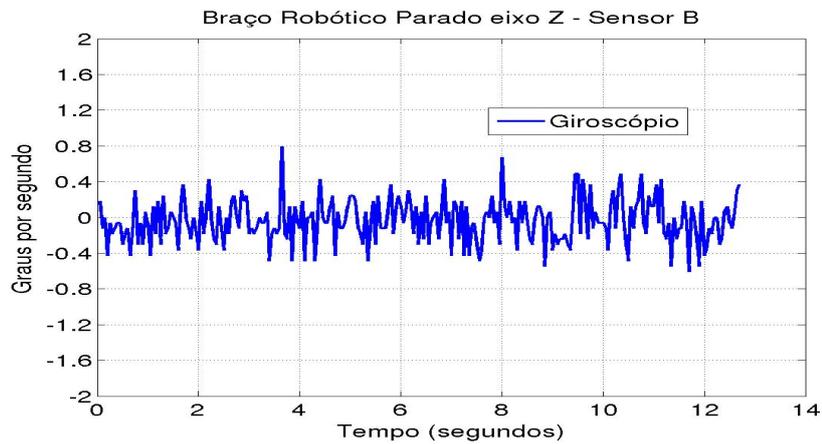


Figura 2.14: Teste de posição estática - Giroscópio - Sensor B - Eixo Z.

Nos gráficos das Figuras 2.9 , 2.10 2.11, provenientes do sensor A e 2.12, 2.13, 2.14, provenientes do sensor B, apresentam-se os resultados dos giroscópios durante a experiência realizada com o braço robótico imóvel. Neles, podem ser observadas oscilações em torno de um valor, que teoricamente seria $0^{\circ}/s$. No entanto, para o sensor A o mesmo não acontece, isto é, os valores apresentados para cada eixo desse sensor oscilam em torno de valores diferentes de zero. Uma vez que tal acontece, verifica-se que a calibração deste sensor necessita de ser ajustada.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as médias obtidas para cada gráfico das figuras anteriores e, segundo estes valores pode-se verificar a referida necessidade de ajustar a calibração do giroscópio do sensor A, enquanto que para o giroscópio do sensor B, os valores médios estão mais próximos do valor pretendido $0^{\circ}/s$. Ainda na mesma tabela, encontram-se os desvios padrão para cada uma das curvas. Através dos resultados dos desvios padrão, é possível concluir que o giroscópio do sensor B apresenta maior dispersão que o do sensor A.

Giroscópio ($^{\circ}/s$)		
Figura - Eixo	Desvio Padrão	Val. Médio
Sensor A		
2.9 - X	0.0306	0.4286
2.10 - Y	0.0376	0.63
2.11 - Z	0.0329	0.9986
Sensor B		
2.12 - X	0.1949	0.0115
2.13 - Y	0.1283	-0.0339
2.14 - Z	0.2394	-0.0442

Tabela 2.1: Desvio padrão e valor médio dos giroscópios - experiência com braço robótico imóvel.

2.5.2 Movimentos de Translação



Figura 2.15: Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor A - Eixo X.

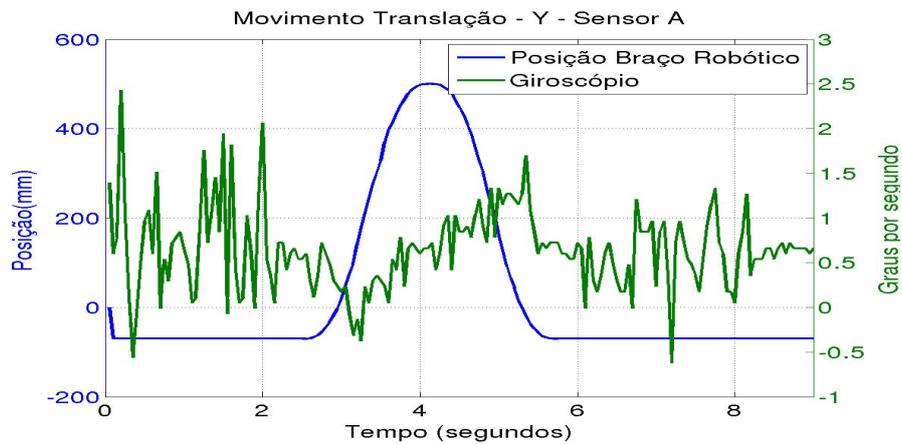


Figura 2.16: Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Y.

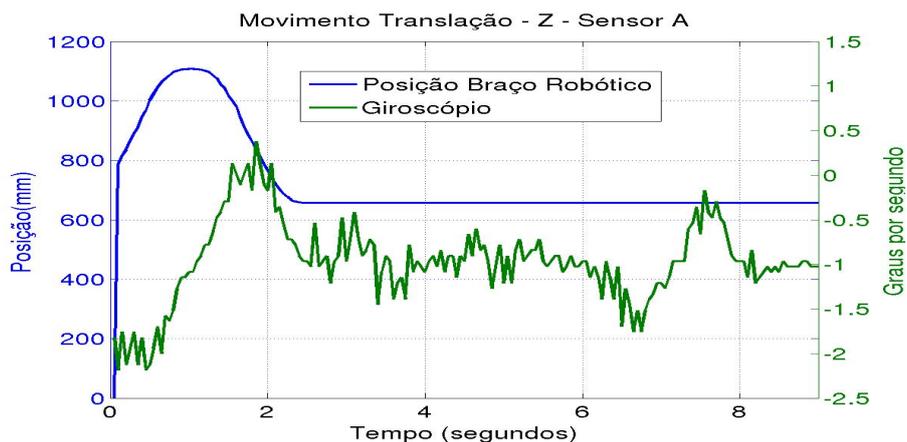


Figura 2.17: Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Z.

Nos gráficos das Figuras 2.15, 2.16 e 2.17 correspondentes ao sensor A e 2.18, 2.19 e 2.20 correspondentes ao sensor B, encontram-se os resultados obtidos durante os testes, realizados com movimentos de translação. Nestes gráficos, as curvas a azul representam a posição espacial do *end-effector* do braço robótico nos três eixos X,Y e Z e as curvas a verde representam os resultados obtidos dos sensores nos mesmos três eixos.

Uma vez mais, quando não se verifica movimento segundo um dos três eixos, os valores fornecidos por ambos os sensores, deveriam de oscilar em torno de $0^\circ/\text{s}$. No entanto, para o sensor A o mesmo não se verifica. Este fato deve-se à já referida necessidade de ajuste da sua calibração.

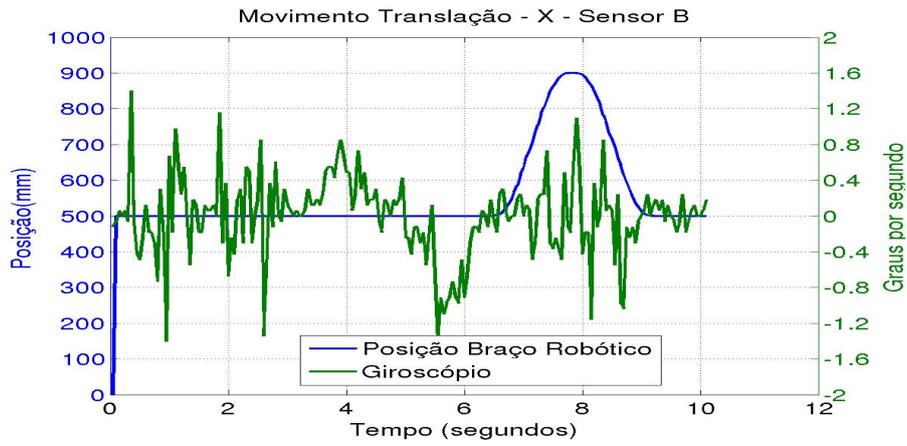


Figura 2.18: Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor B - Eixo X.

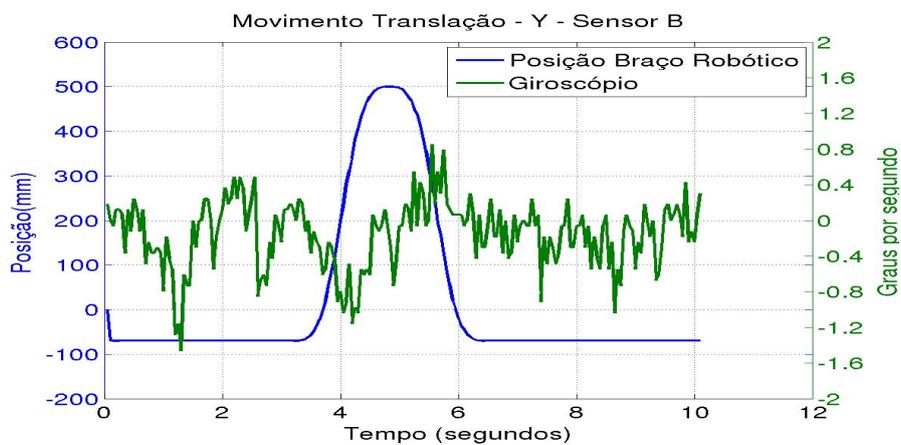


Figura 2.19: Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Y.

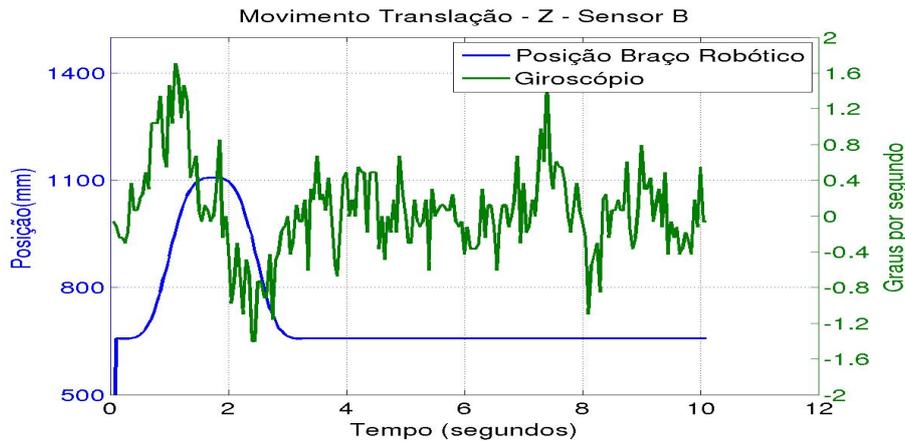


Figura 2.20: Teste de movimento de translação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Z.

Giroscópio ($^{\circ}/s$)	
Figura - Eixos	Desvio Padrão
Sensor A	
2.15 - X	0.2499
2.16 - Y	0.4548
2.17 - Z	0.4604
Sensor B	
2.18 - X	0.4459
2.19 - Y	0.3812
2.20 - Z	0.5151

Tabela 2.2: Desvio padrão para movimentos de translação - Giroscópio.

Ainda referente aos momentos nos quais não se verifica movimento de translação para cada um dos eixos, a Tabela 2.2 apresenta os valores dos desvios padrão apresentados pelos giroscópios de ambos os sensores. Analisando a tabela, verifica-se também que em movimentos de translação pura, o giroscópio do sensor B apresenta maior dispersão que o do sensor A, pois apresenta valores de desvio padrão um pouco mais elevados.

2.5.3 Movimentos de Rotação

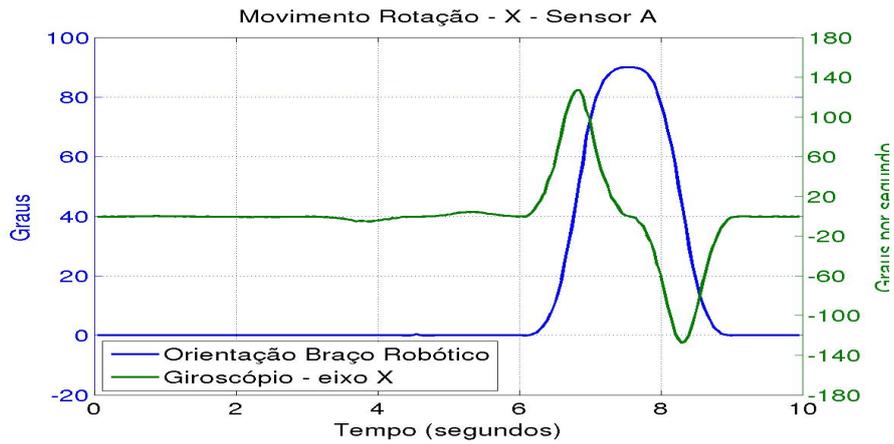


Figura 2.21: Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor A - Eixo X.

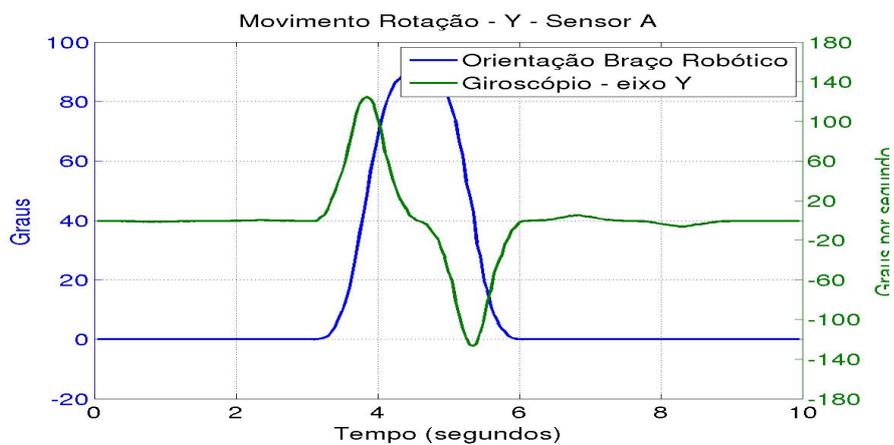


Figura 2.22: Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Y.

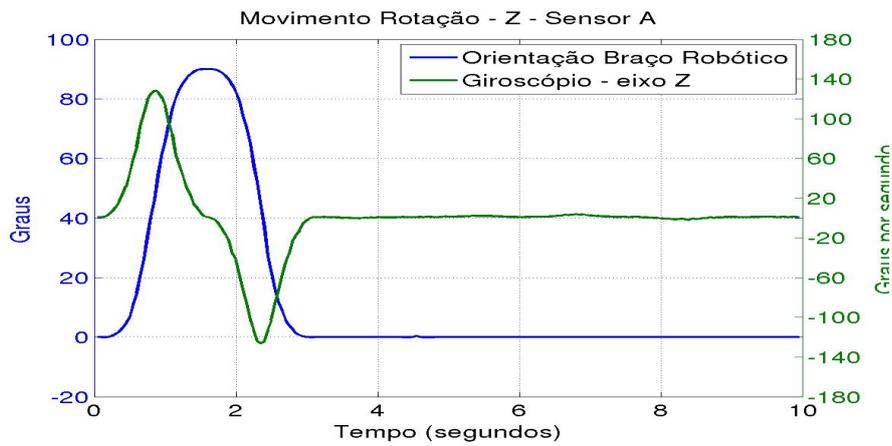


Figura 2.23: Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor A - Eixo Z.

Nos gráficos que se encontram nas Figuras 2.21 , 2.22 e 2.23 , referentes ao sensor A , 2.24, 2.25 e 2.26 referentes ao sensor B, estão apresentados os resultados dos testes realizados com movimentos de rotação. Em cada um dos gráficos referenciados neste parágrafo, é possível observar a azul a curva do *end-effector* do braço robótico e a verde os resultados dos giroscópios para cada eixo de cada um dos sensores.

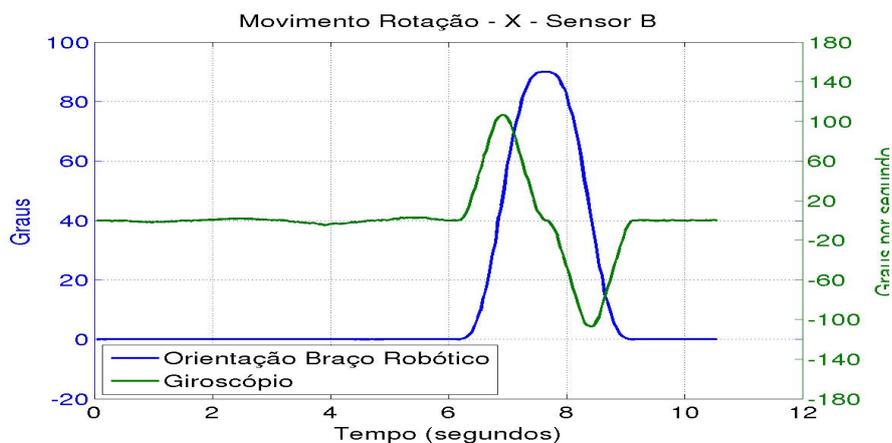


Figura 2.24: Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor B - Eixo X.

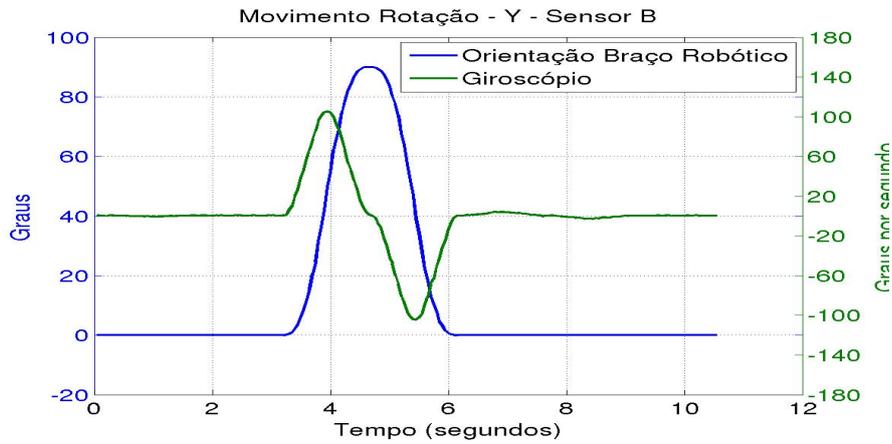


Figura 2.25: Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Y.

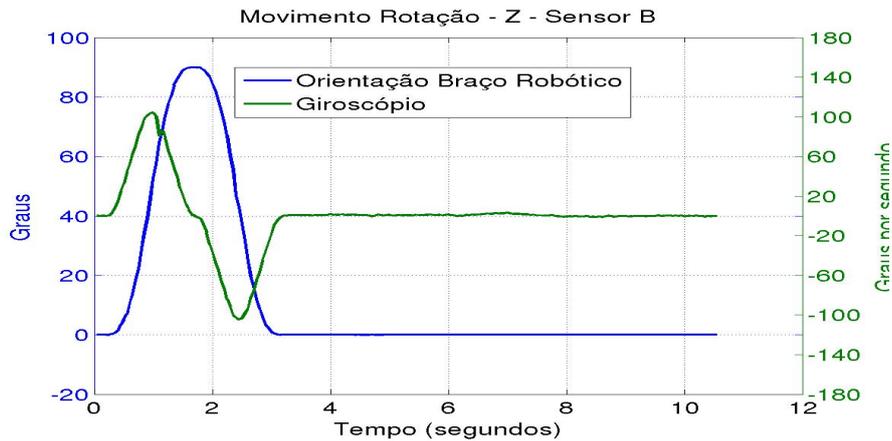


Figura 2.26: Teste de movimento de rotação - Giroscópio - Sensor B - Eixo Z.

Nestes movimentos de rotação o braço robótico executa uma rotação em torno de um só eixo com uma amplitude de 90° e de seguida executa o movimento contrário. Esta ação é realizada uma vez para cada eixo de forma sequencial a uma velocidade máxima de $150^\circ/\text{s}$ aproximadamente. Analisando os resultados dos gráficos de ambos os sensores, para este tipo de movimento, pode-se observar que em cada eixo, o registo de comportamento típico de um aumento de velocidade, correspondente à rampa de aceleração do braço robótico, seguido por um máximo de velocidade, a partir do qual a velocidade baixa até ao valor $0^\circ/\text{s}$. De imediato, é observado um movimento simétrico ao descrito.

Nos movimentos de rotação em torno de um eixo observa-se que os giroscópios para os restantes eixos apresentam valores muito próximos de zero, existindo em alguns instantes pequenas flutuações de seus valores, de amplitude desprezável, face aos valores de velocidade angular registados durante a realização do movimento.

Na ausência de movimento, e para movimentos de translação, ambos os giroscópios, demonstraram permanecer com leituras próximas de $0^\circ/\text{s}$. Neste tipo de movimento é possível observar que o giroscópio do sensor B apresenta valores de desvio padrão ligeiramente superiores aos valores apresentados pelo giroscópio A, podendo ser esta diferença desprezável.

2.6 Resultados de Acelerómetros

2.6.1 Posição estática

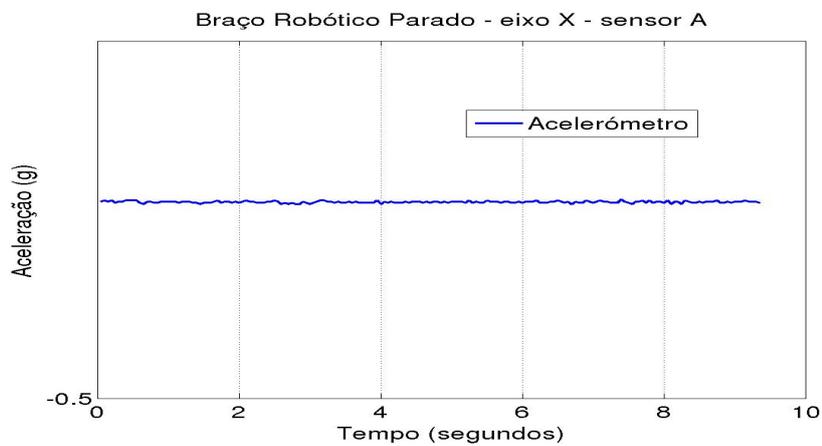


Figura 2.27: Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor A - Eixo X.

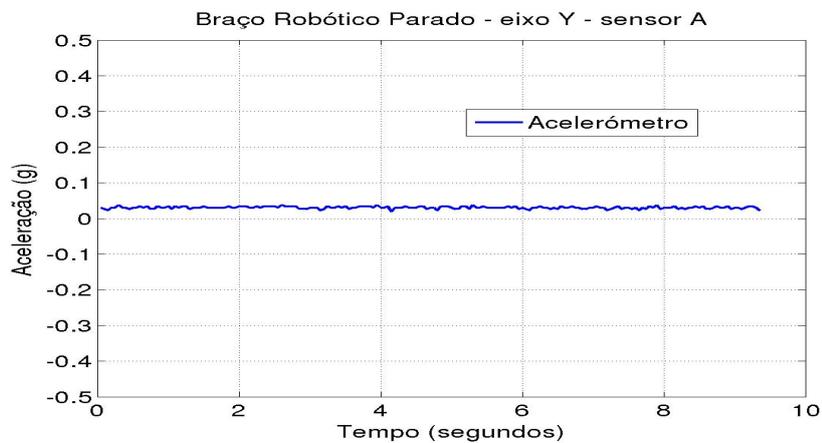


Figura 2.28: Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Y.

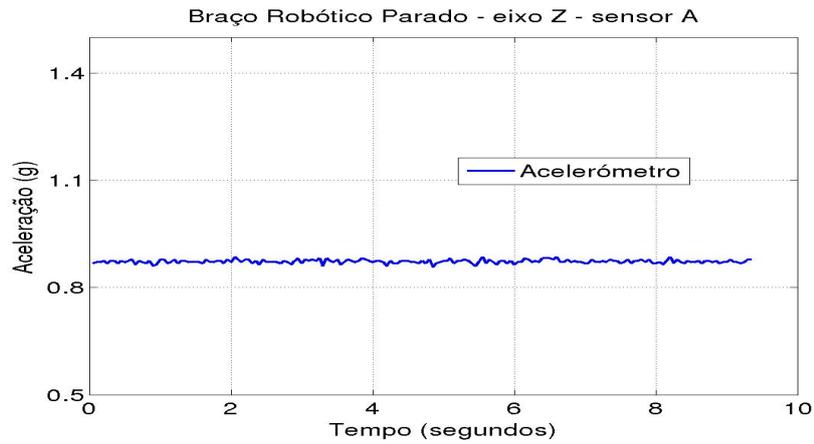


Figura 2.29: Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Z.

Nos gráficos apresentados nas figuras 2.27, 2.28 e 2.29, sensor A e 2.30, 2.31 e 2.32, sensor B, é possível visualizar o resultado dos testes realizados com o braço robótico imóvel.

Na posição inicial e em repouso os acelerómetros devem apresentar 0 g nos eixos X e Y e 1 g no eixo Z uma vez que apenas este último se encontra alinhado com o vetor da aceleração gravitacional. No entanto, observando os gráficos pode-se observar que os acelerómetros do sensor A não apresentam valores a oscilar em torno dos valores descritos. Este fato revela que também os acelerómetros do sensor A necessitam de ajustar a sua calibração. Já os acelerómetros do sensor B apresentam oscilações em torno dos valores descritos.

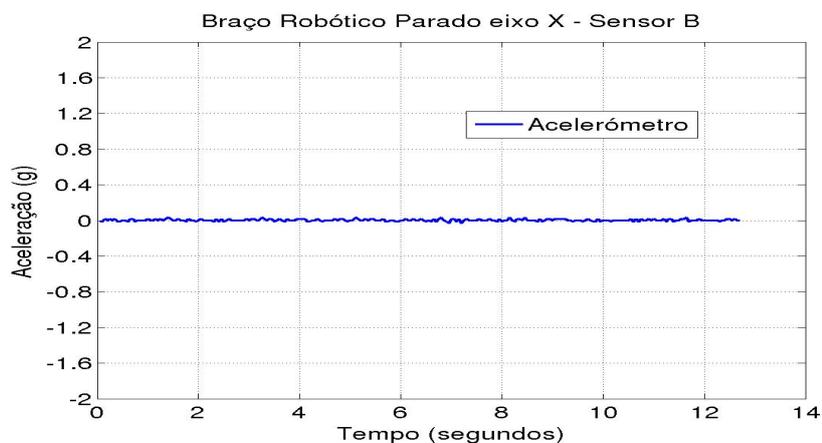


Figura 2.30: Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor B - Eixo X.

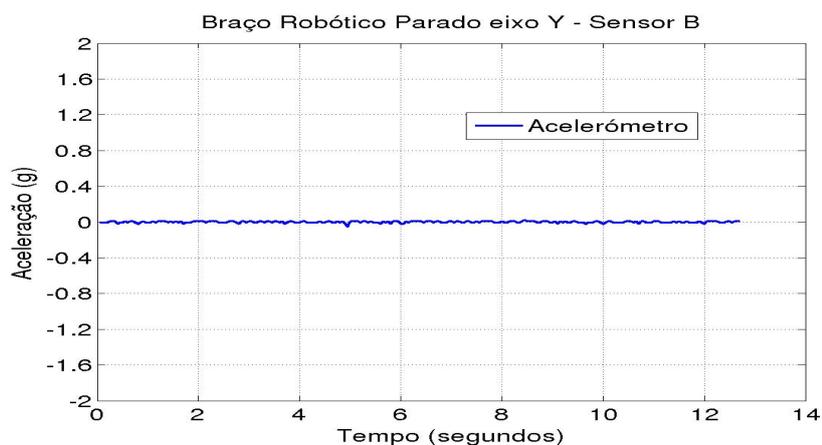


Figura 2.31: Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Y.

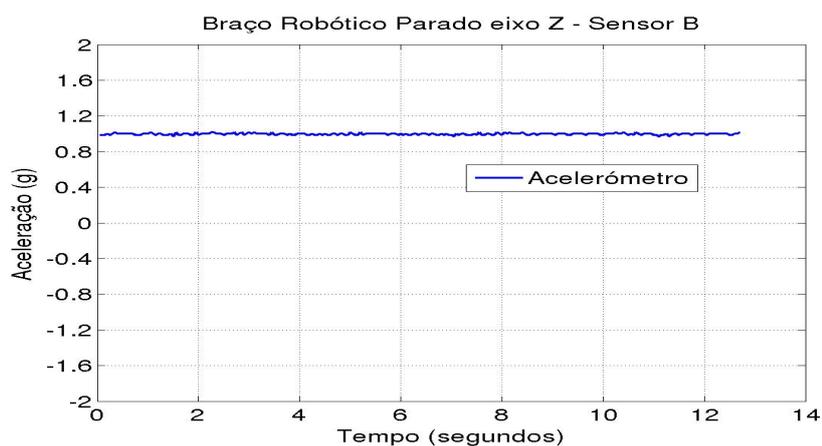


Figura 2.32: Teste de posição estática - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Z.

Acelerómetro (g)		
Figura - Eixo	Desvio Padrão	Val. Médio
Sensor A		
2.27 - X	0.0028	0.0491
2.28 - Y	0.0033	0.0302
2.29 - Z	0.0052	0.8727
Sensor B		
2.30 - X	0.1199	0.0026
2.31 - Y	0.0101	-0.001
2.32 - Z	0.0099	-0.9958

Tabela 2.3: Desvio padrão e valores médios para braço robótico imóvel - acelerómetro.

Na Tabela 2.3, encontram-se os valores médios e os desvios padrão obtidos em cada curva dos gráficos anteriores apresentados. Como se pode observar, uma vez mais o acelerómetro do sensor B apresenta valores de desvio padrão mais elevados que o acelerómetro do sensor A. O sensor A nos valores médios obtidos encontra-se mais afastado em comparação com o sensor B, sendo mais uma prova em que este sensor necessita de reajustar a calibração.

2.6.2 Movimentos de Translação

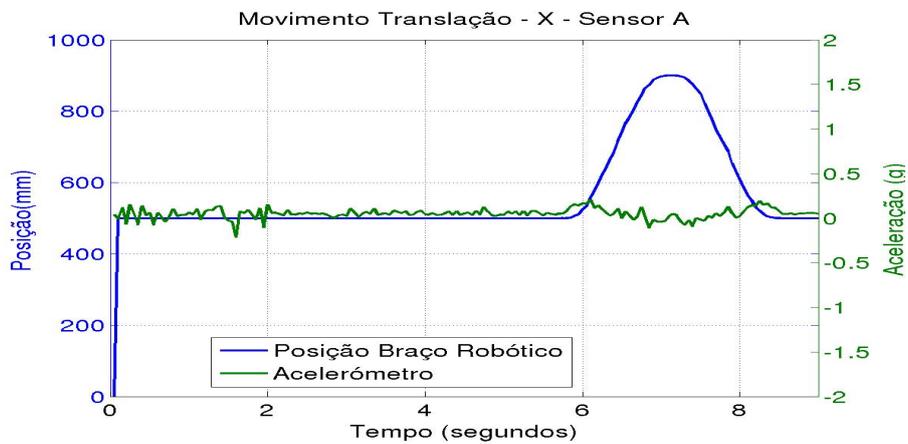


Figura 2.33: Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo X.

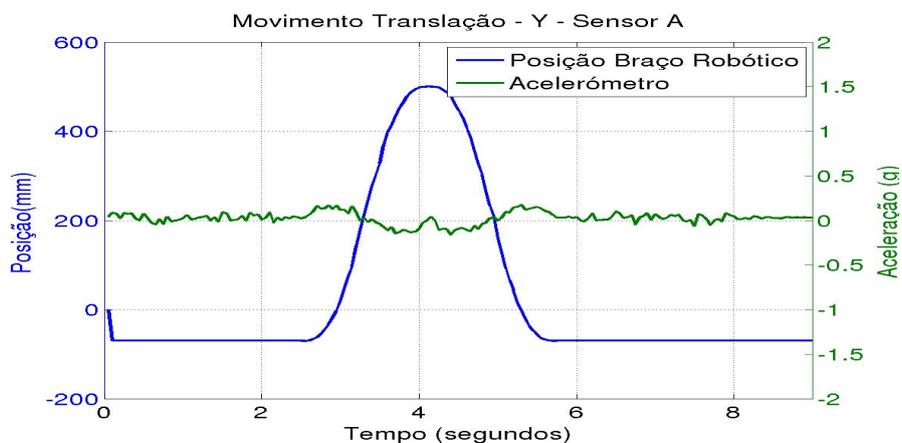


Figura 2.34: Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Y.

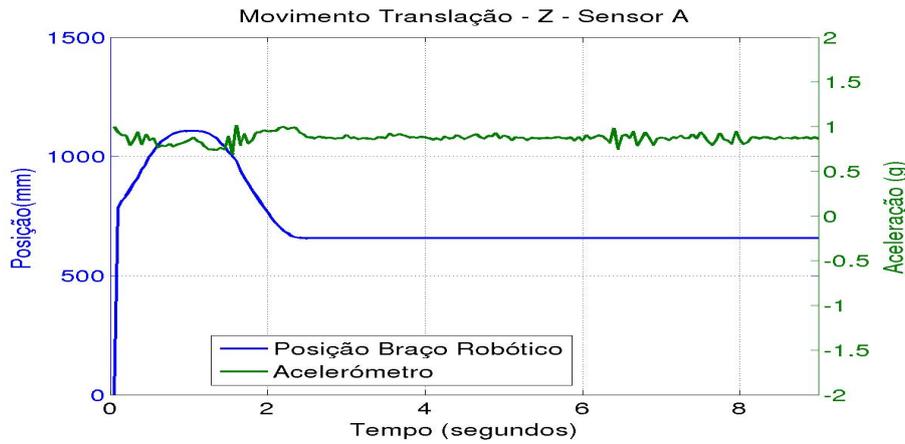


Figura 2.35: Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Z.

Os gráficos apresentados nas Figuras 2.33, 2.34 e 2.35, para o sensor A e 2.36, 2.37 e 2.38, para o sensor B, mostram os resultados dos acelerómetros de ambos os sensores nos testes realizados com movimentos de translação.

Nesta experiência o braço robótico descreve segundo um eixo de cada vez, um movimento de translação num sentido e de seguida no sentido oposto, voltando ao local de origem. Aqui, os acelerómetros de ambos os sensores A e B, apresentam oscilação mais acentuada, proveniente da vibração presente no braço robótico, causada pelo funcionamento dos motores do mesmo. Durante a realização do movimento segundo um eixo, em ambos os sensores, é possível verificar a existência de oscilações nos restantes eixos, que têm origem na interferência entre eixos (oscilações existentes num eixo, provocadas pelo movimento segundo outro eixo) e na vibração do braço robótico sempre que os seus motores são acionados.

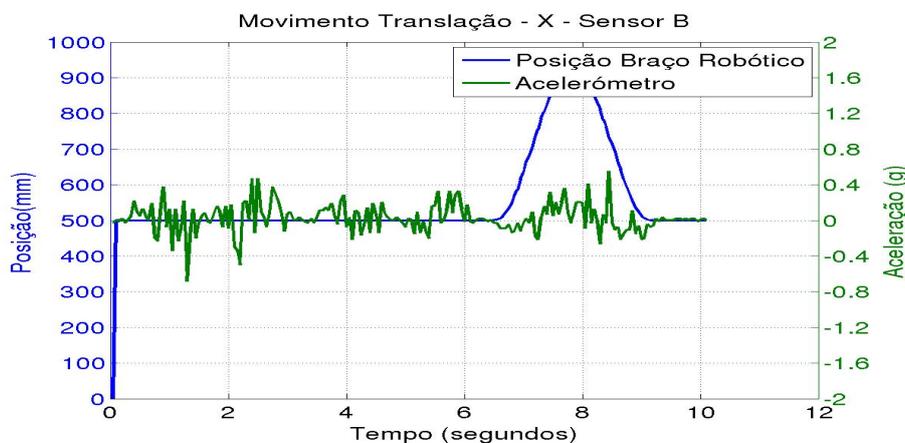


Figura 2.36: Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo X.

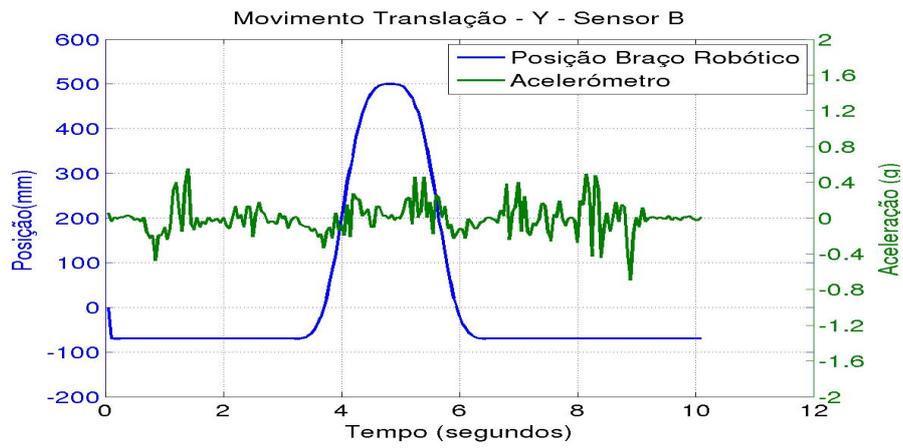


Figura 2.37: Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Y.

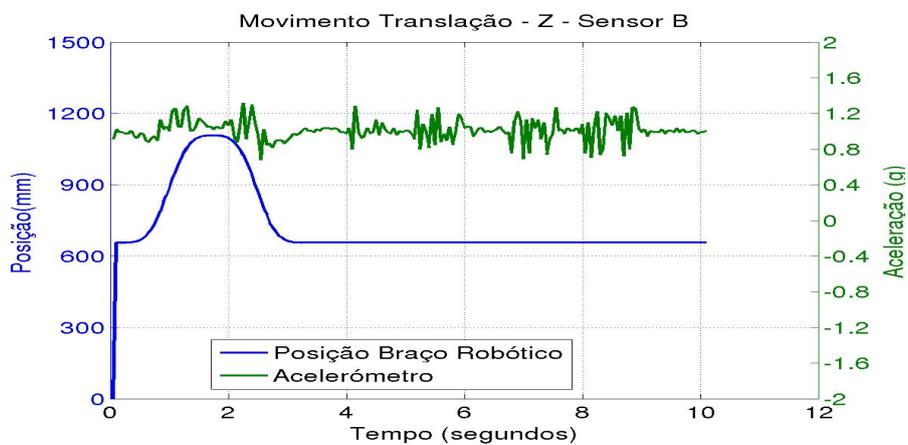


Figura 2.38: Teste de movimento de translação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Z.

2.6.3 Movimentos de Rotação

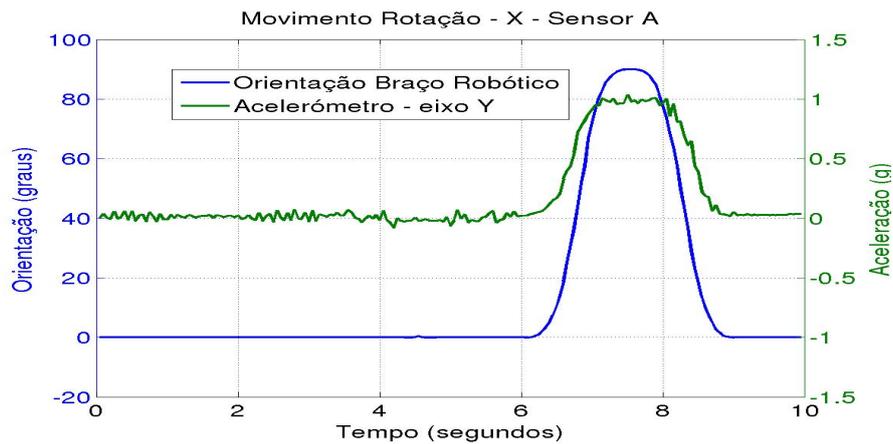


Figura 2.39: Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo X.

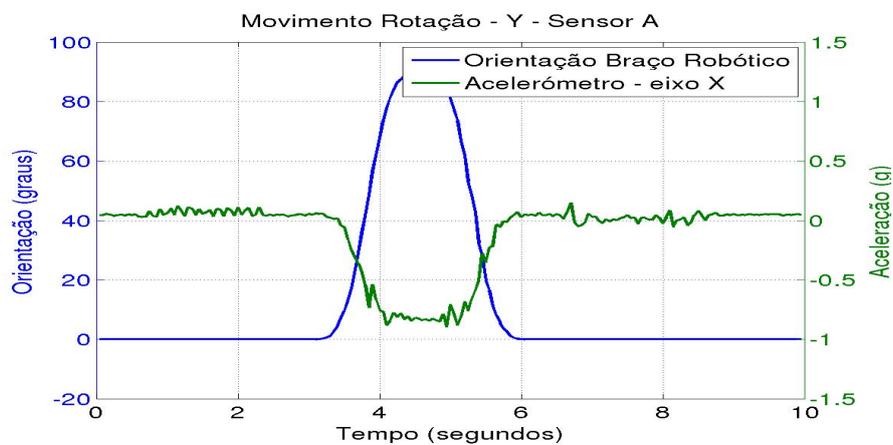


Figura 2.40: Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Y.

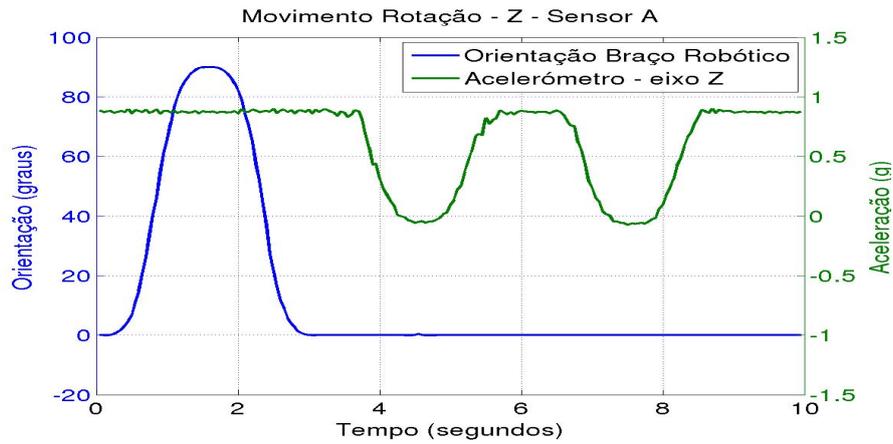


Figura 2.41: Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor A - Eixo Z.

Os gráficos que podem ser encontrados nas Figuras 2.39, 2.40 e 2.41 para o sensor A, 2.42, 2.43 e 2.44 para o sensor B apresentam mais uma vez as curvas dos sensores para movimentos de rotação, mas desta vez avaliando os resultados obtidos nos acelerómetros.

Na ausência de movimentos de translação, os acelerómetros através da sua inclinação em relação ao vetor gravitacional da terra fornecem o valor de dois dos três ângulos de *Euler*, *roll* e *pitch*, ou seja, em relação ao referencial do braço robótico, estas inclinações correspondem respetivamente à rotação segundo o eixo *X* e à rotação segundo o eixo *Y*.

Uma vez que os testes de rotação realizados não apresentam translação, neste caso, os acelerómetros funcionam como "inclinómetros", variando os seus valores entre os 0 g e os $\pm 1\text{ g}$.

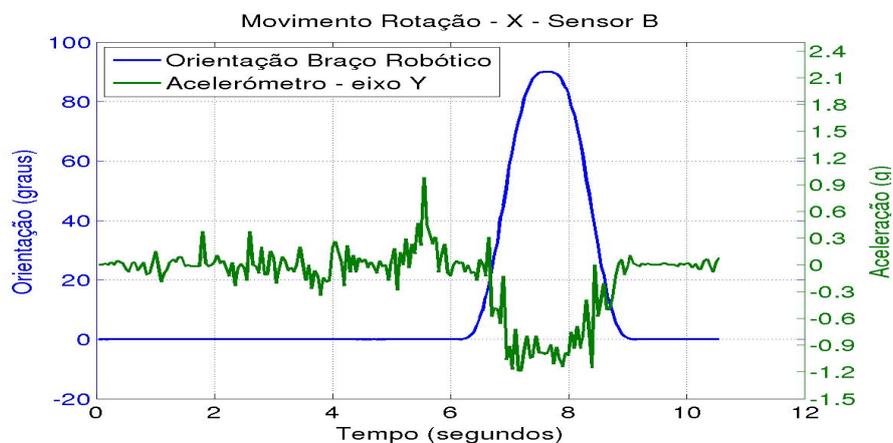


Figura 2.42: Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo X.

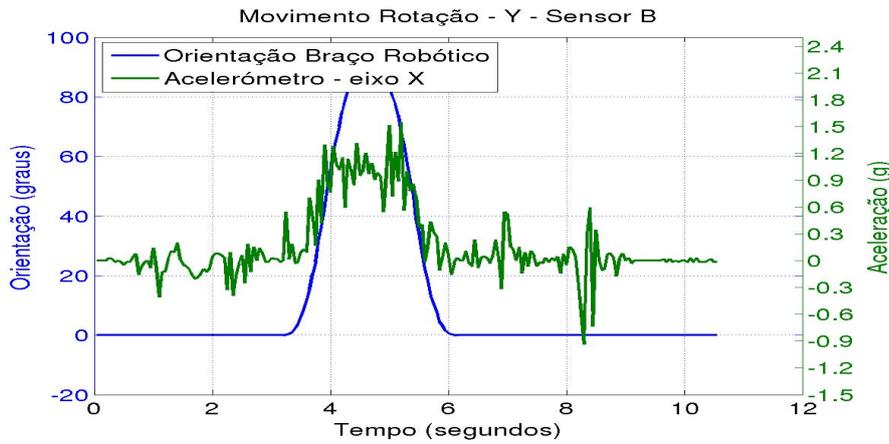


Figura 2.43: Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Y.

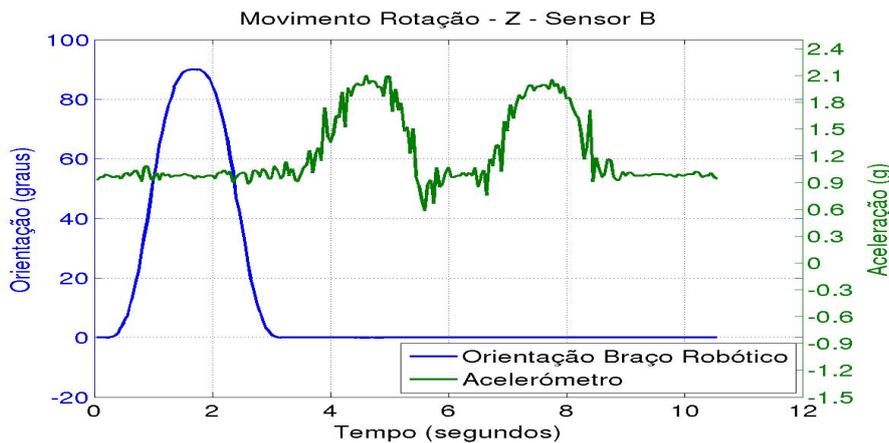


Figura 2.44: Teste de movimento de rotação - Acelerómetro - Sensor B - Eixo Z.

De uma forma global, todos os resultados dos valores médios apresentados apontam para a já referida necessidade de ajuste da calibração por parte do acelerómetro do IMU A.

Concluindo a avaliação dos sensores de forma individual, o sensor B apresenta-se como o sensor mais ruidoso dos dois, no entanto, para o tipo de aplicação que poderá vir a ver no robô humanoide, o nível de ruído não será necessariamente o fator de exclusão.

Nos testes com o braço robótico imóvel, a amplitude de erro dos sensores apresentaram sempre valores mais baixos do que nos restantes testes em que o braço robótico se encontra em movimento. Isto deve-se essencialmente a dois fatores. O primeiro reside no fato de que quando o braço robótico se encontra imóvel, os seus atuadores encontram-se em repouso, mas quando este se movimenta, os atuadores encontram-se em ação, representando assim uma fonte de vibração que causa distúrbios nos sensores. Outro fator que contribui para o aumento da amplitude das oscilações dos sensores, foca-se

no comportamento dos sensores, quando estes se encontram em movimento, isto é, no movimento segundo um determinado eixo, esse movimento não irá apenas afetar o eixo correspondente, mas também irá causar interferências nos restantes, provocando assim interferências.

Uma vez que nos movimentos de translação, durante a avaliação dos acelerómetros, o valor da amplitude de oscilação subiu para valores, por vezes, da mesma ordem de grandeza dos valores de aceleração que se pretendeu estudar, surge aqui a necessidade de esta avaliação ser realizada através de outra montagem que permita obter dados dos acelerómetros de uma forma mais eficaz.

De notar, que com o ruído induzido pelas vibrações do braço robótico, criaram-se condições para que o cálculo do deslocamento através da dupla integração dos dados dos acelerómetros fosse retirado do âmbito de estudo. No entanto, os dados observados em movimentos de rotação por parte dos giroscópios, apresentam um contraste entre o seu ruído e os dados da velocidade angular que contribuem para futuros testes que visem avaliar a integração da velocidade angular.

2.6.4 Inclinação dos acelerómetros

A avaliação dos acelerómetros como "inclinómetros" foi realizada através da extração de dados dos mesmos, com o braço robótico imóvel (para que o valor dos acelerómetros variem apenas entre 0 e $\pm 1 g$), para várias orientações. Deste modo, quando se verifica uma rotação em torno do eixo Y_g , Figura 2.45a, ou uma rotação em torno do eixo X_g , Figura 2.45b, é possível calcular o valor angular destas rotações, através das equações 2.1 e 2.2, respetivamente. Nas duas situações o referencial global é composto pelos eixos X_g , Y_g e Z_g e o referencial do acelerómetro é composto pelos eixos X_s , Y_s e Z_s . O vetor da aceleração gravitacional terrestre g é coincidente com o eixo Z_g . Para estes casos, A_x , A_y e A_z apresentam-se como sendo os valores dos correspondentes eixos do acelerómetro, X_s , Y_s e Z_s .

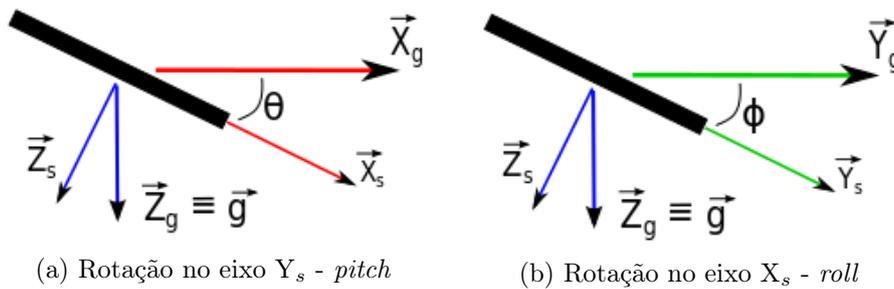


Figura 2.45: Comparação Valores Inclinação - Sensor B

$$pitch = \theta = \arctan \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \quad (2.1)$$

$$roll = \theta = \arctan \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \quad (2.2)$$

Nas Figuras 2.46 e 2.47 correspondentes ao sensor A e 2.48 e 2.49 correspondentes aos sensor B, encontram-se os resultados dos testes de inclinação resultantes dos acelerómetros para a posição inicial, isto é, quando os ângulos *pitch* e *roll* apresentam ambos o valor de 0° .



Figura 2.46: Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor A.

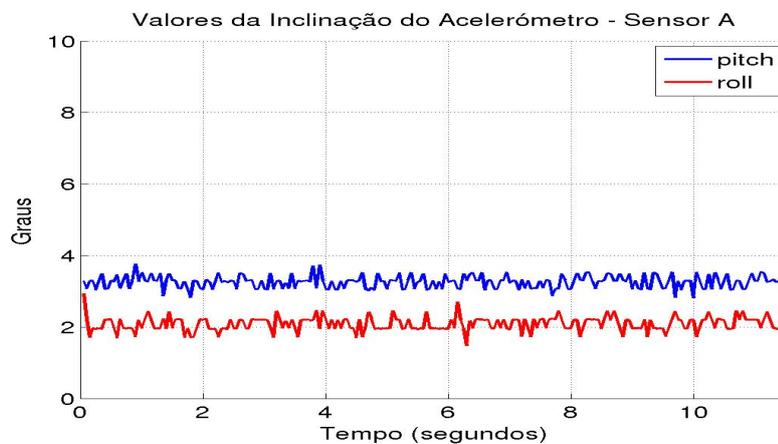


Figura 2.47: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor A.

Ao observar o gráfico apresentado na Figura 2.46, pode-se observar que os valores do acelerómetro A não se encontram enquadrados nos valores esperados, uma vez que as curvas de *pitch* e *roll* não oscilam em torno de 0 g , indicando mais uma vez a necessidade de este sensor ser recalibrado. Como resultado, no gráfico da Figura 2.47 é possível observar que nas curvas não se apresentam oscilações em torno de 0° , oscilando como pode ser consultado na Tabela 2.4, em torno de 3.26° e 2.09° .

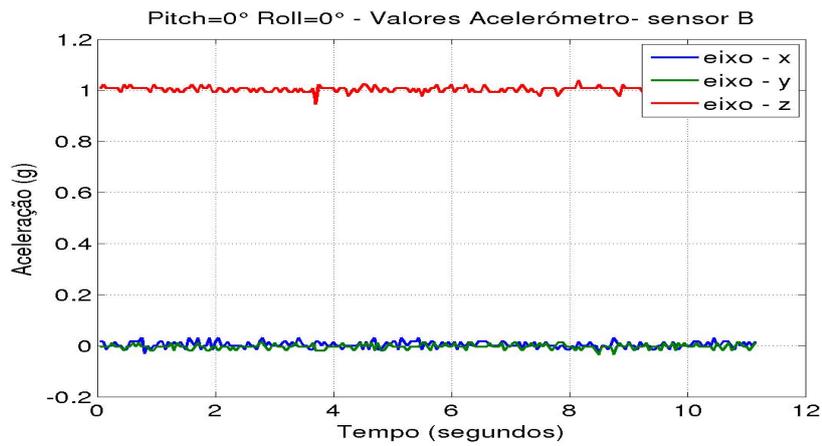


Figura 2.48: Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor B.

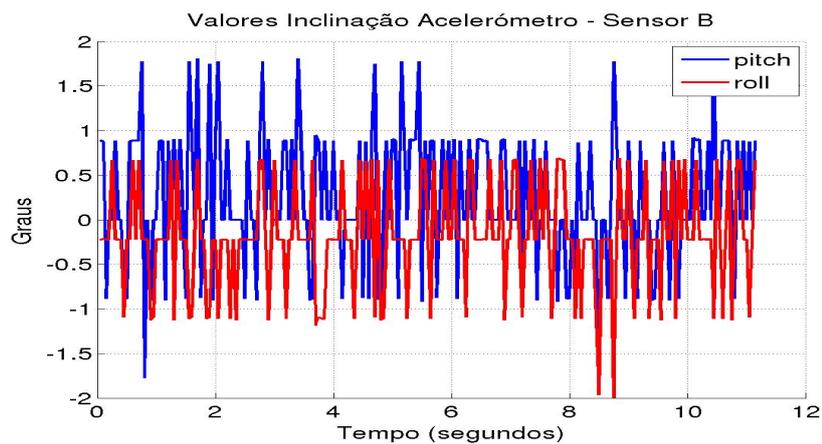
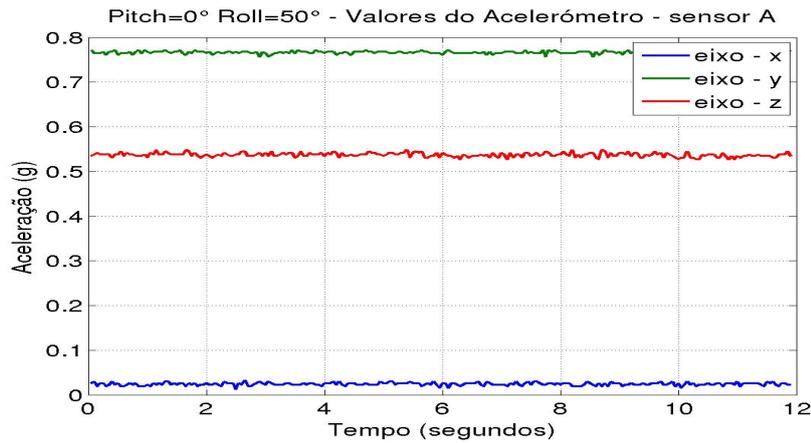
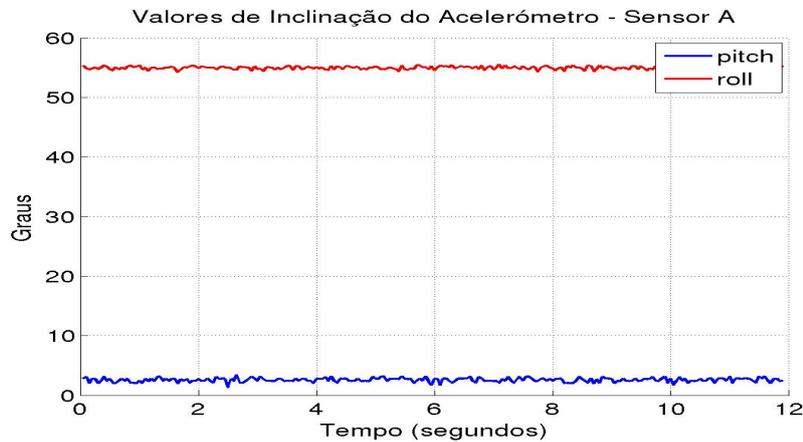


Figura 2.49: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=0^\circ$ - Sensor B.

Na mesma experiência para o sensor B, na figura 2.48, pode-se observar que as curvas para $pitch$ e $roll$ do acelerómetro, apresentam valores que oscilam em torno de 0° . Para além disso, pode-se observar que os valores médios sobre os quais os valores oscilam, segundo a Tabela 2.4 são 0.23° e -0.20° , sendo estes muito próximos do valor esperado.

Comparando os dois acelerómetros segundo a Tabela 2.4, o desvio padrão do acelerómetro do sensor A é mais uma vez inferior ao do acelerómetro do sensor B.

	Sensor A		Sensor B	
	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)
Valor real	0	0	0	0
Valor médio medido	3.26	2.09	0.23	-0.20
Desvio padrão	0.18	0.20	0.73	0.58

Tabela 2.4: Resultados de "inclinómetros", para $roll = 0^\circ$ e $pitch = 0^\circ$.Figura 2.50: Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor A.Figura 2.51: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor A.

Nas Figuras 2.50 e 2.51 correspondentes ao IMU A e 2.52 e 2.53 correspondentes aos IMU B, encontram-se representados os resultados dos testes realizados com os ângulos $roll$ igual a 50° e $pitch=0^\circ$.

Em ambas as Figuras 2.50 e 2.52, observa-se que as curvas do eixo X de cada acelerómetro permanecem próximas de 0° , uma vez que a rotação se dá segundo este mesmo

eixo, apenas variando as curvas correspondentes aos eixos Y e Z de ambos os acelerómetros. Neste caso, o eixo Y de cada acelerómetro apresenta valores mais elevados que o eixo Z, indicando que o eixo Y se encontra mais próximo da orientação do vetor da gravidade.

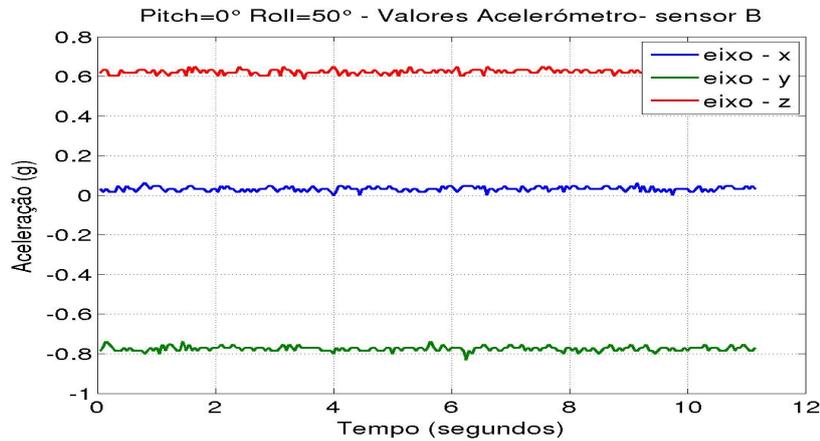


Figura 2.52: Valores do acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor B.

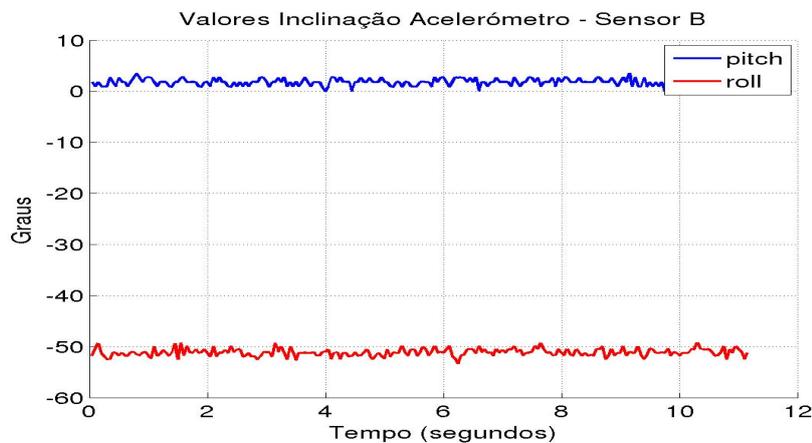


Figura 2.53: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=50^\circ$ - Sensor B.

Os valores angulares das Figuras 2.51 e 2.53 para o ângulo $pitch$, é de 0° aproximadamente, para ambos os acelerómetros. Contudo, quando ao ângulo $roll$ apresenta valores próximos de 50° para o acelerómetro B, mas para o acelerómetro A, apresenta aproximadamente 55° , sendo este o resultado da já referida necessidade de re-calibração.

Como se pode observar na Tabela 2.5, os valores médios registados pelos sensores A e B, são respetivamente 2.57 e 1.80 para $roll$ e para $pitch$ são 54.98° e 51.17° . A partir da mesma tabela é possível observar que o desvio padrão se apresenta mais elevado para o acelerómetro do sensor B.

	Sensor A		Sensor B	
	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)
Valor real	0	50	0	50
Valor médio medido	2.57	54.98	1.80	51.17
Desvio padrão	0.35	0.26	0.68	0.74

Tabela 2.5: Resultados de "inclinómetros", para $roll = 50^\circ$ e $pitch = 0^\circ$.

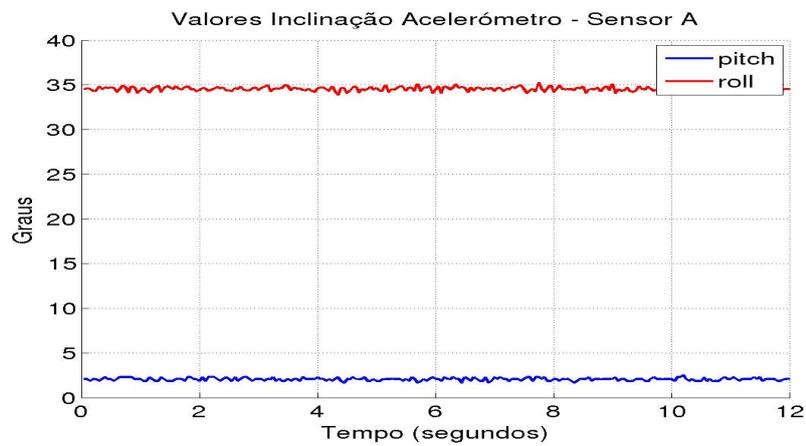


Figura 2.54: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=30^\circ$ - Sensor A.

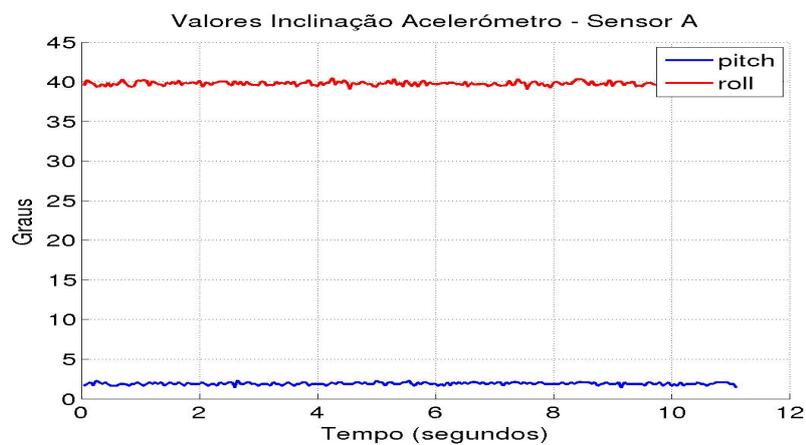


Figura 2.55: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=35^\circ$ - Sensor A.

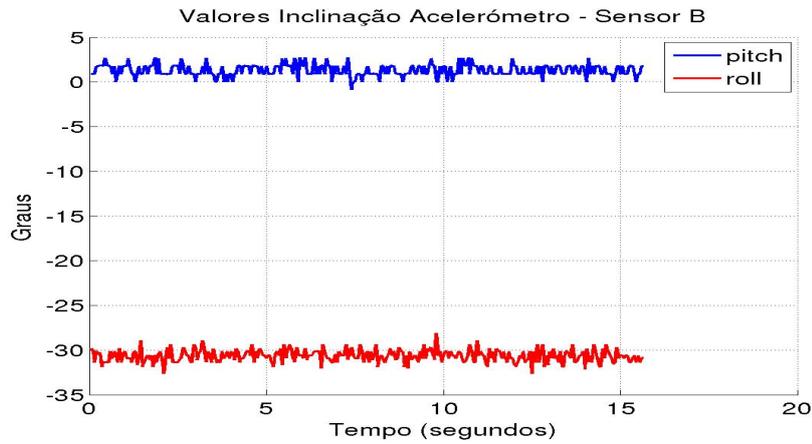


Figura 2.56: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=35^\circ$ - Sensor B.



Figura 2.57: Inclinação obtida pelo acelerómetro, com $pitch=0^\circ$ e $roll=35^\circ$ - Sensor B.

Os gráficos apresentados nas Figuras 2.54 e 2.55 para o acelerómetro A e 2.56 e 2.57 para o acelerómetro B contêm os resultados obtidos para inclinações de $roll=30^\circ$ e 35° . Como se verifica na Tabela 2.6, quando o ângulo $roll$ é de 30° , para o sensor A, o valor médio obtido foi de 34.54° , e para o sensor B na mesma inclinação, o valor médio obtido foi de 30.67° . Já na Tabela 2.7, com o ângulo $roll$ de 35° , o sensor A apresentou valores médios de 39.76° , e o sensor B apresentou valores médios, próximos de 36.03° . Em ambas as tabelas, se verifica que o desvio padrão é mais elevado para o sensor B.

A Tabela 2.8 apresenta os resultados obtidos de todas as experiências de inclinação, para a avaliação das inclinações calculadas a partir dos dados dos acelerómetros. Ao analisar os dados, constata-se que para este tipo de utilização, o sensor A apresenta valores de desvio padrão menores, comparativamente ao sensor B. No entanto, nos testes realizados para as inclinações de 30° e 35° , para ambos os sensores a diferença entre os resultados das duas inclinações foi sempre próxima dos 5° , concluindo assim, que ambos os sensores poderão realizar medições relativas, com intervalos de pelo menos 5°

	Sensor A		Sensor B	
	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)
Valor real	0	30	0	30
Valor médio medido	2.06	34.54	1.29	30.67
Desvio padrão	0.17	0.23	0.66	0.69

Tabela 2.6: Resultados de "inclinómetros", para $roll = 30^\circ$ e $pitch = 0^\circ$.

	Sensor A		Sensor B	
	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)
Valor real	0	35	0	35
Valor médio medido	1.90	39.76	1.48	36.03
Desvio padrão	0.16	0.26	0.69	0.72

Tabela 2.7: Resultados de "inclinómetros", para $roll = 35^\circ$ e $pitch = 0^\circ$.

	Sensor A		Sensor B	
	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)	<i>Pitch</i> (°)	<i>Roll</i> (°)
Valor real	0	0	0	0
Valor médio medido	3.26	2.09	0.23	0.20
Desvio padrão	0.18	0.20	0.73	0.58
Valor real	0	50	0	50
Valor médio medido	2.57	54.98	1.80	-51.21
Desvio padrão	0.35	0.26	0.68	0.74
Valor real	0	30	0	30
Valor médio medido	2.06	34.54	1.29	-30.67
Desvio padrão	0.17	0.23	0.66	0.69
Valor real	0	35	0	35
Valor médio medido	1.90	39.76	1.48	-36.03
Desvio padrão	0.16	0.26	0.69	0.72

Tabela 2.8: Resultados das inclinações obtidas.

aproximadamente. Para corroborar estes resultados, foram realizadas outras medições com várias inclinações, sendo que os resultados apresentavam correspondência com os valores reais dos ângulos na mesma ordem de grandeza dos resultados apresentados.

As medições de inclinação obtidas mostram aqui a importância de uma calibração adequada, pois os valores do acelerómetro A apresentaram sempre maior diferença em relação ao valor real. Não obstante, para medições relativas, isto é, deslocamentos angulares, ambos os acelerómetros provaram ser capazes de realizar medições para um mínimo de 5° de amplitude.

Os testes realizados foram estabelecidos com o intervalo mínimo de 5° , sendo este um valor considerado razoável, por forma a não correr o risco de obter oscilações, em

especial por parte do acelerómetro B, que pudessem constituir um obstáculo à medição clara dos valores angulares.

Os testes realizados com a variação do ângulo *pitch* apresentam resultados idênticos aos apresentados para a variação do ângulo *roll*. Por esse motivo não foram incorporados novos gráficos.

Nos testes de movimentos de translação foi possível observar que o acelerómetro A apresenta oscilações menores, comparativamente ao acelerómetro B. No entanto, para nenhum dos acelerómetros foi possível observar comportamentos satisfatórios perante este tipo de movimento, uma vez que as oscilações apresentadas consideradas ruído, são da mesma ordem de grandeza dos valores que descrevem a aceleração do movimento. Para a medição de acelerações lineares, fica aqui a necessidade de realizar mais testes com acelerações mais elevadas.

No movimento de rotação, apesar de se verificar que ambos os acelerómetros apenas detetam o vetor da aceleração gravitacional, durante o movimento segundo um eixo, é possível observar que nos restantes eixos, o acelerómetro B apresenta oscilações de maior amplitude, comparativamente ao acelerómetro A.

Ficam ainda por estudar os resultados que seria possível obter com a aplicação de filtros, que permitam diminuir as oscilações, e realizar ainda testes com as calibrações ajustadas.

2.7 Resultados dos Magnetómetros

Como já foi referido anteriormente, os magnetómetros fazem a medição do campo magnético que o rodeia. Através das medições do campo magnético da Terra realizadas por este tipo de sensor, é possível obter o cálculo do ângulo de orientação *yaw*, utilizado na navegação.

Segundo a lei da indução magnética, qualquer corrente elétrica que atravessasse um material condutor dá origem a um campo magnético. Sendo assim, a presença de componentes sobre os quais circule energia elétrica, ou materiais ferromagnéticos, o campo magnético que é captado pelo magnetómetro é alterado, constituindo um obstáculo à sua utilização para o cálculo do ângulo *yaw*. No entanto, se o distúrbio do campo magnético se apresentar constante, é possível contornar este obstáculo através do procedimento de calibração, mas caso a interferência dos campos induzidos seja variável, o recurso a este tipo de sensor torna-se inviabilizado.

2.7.1 Posição estática

As Figuras 2.58 e 2.59 apresentam os gráficos que ilustram os valores de magnitude (combinação das três componentes X,Y e Z) obtidos pelos magnetómetros das unidades A e B respetivamente, para a situação de uma posição estática. Na mesma posição estática, são observados os resultados mostrados pelos magnetómetros quando os motores do braço robótico se encontram acionados e também quando estes se encontram desligados.

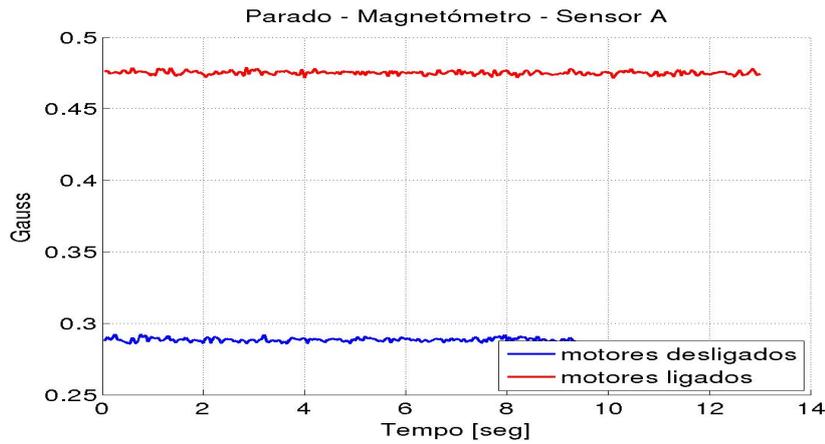


Figura 2.58: Magnitude do magnetómetro do IMU A - parado.

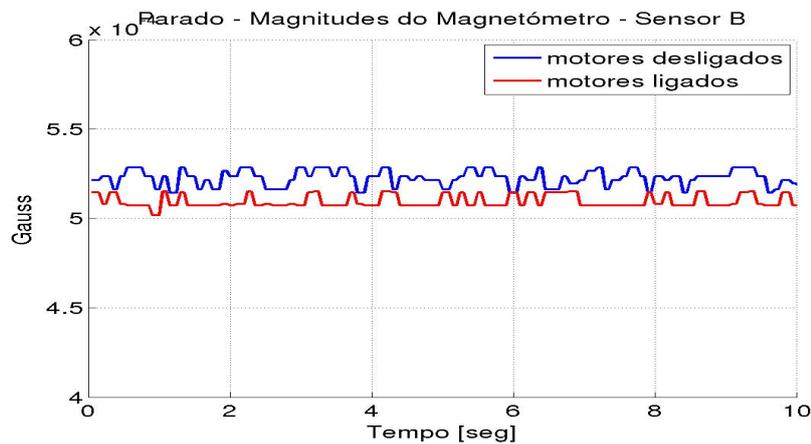


Figura 2.59: Magnitude do magnetómetro do IMU B - parado.

No que diz respeito à comparação das curvas obtidas com os motores do braço robótico desligados em relação às curvas obtidas com os mesmos motores acionados, é possível observar através das Figuras 2.58 e 2.59, que em ambos os casos existe alteração dos valores obtidos ao transitar de uma situação para a outra. Esta alteração de valores deve-se à circulação de corrente elétrica nos servomotores do braço robótico, capaz de provocar uma alteração do campo magnético próximo dos sensores.

2.7.2 Movimentos de Translação

Nos gráficos presentes nas Figuras 2.60 e 2.61 é possível observar os valores da magnitude do campo magnético que cada um dos magnetómetros dos IMU A e B apresenta quando sujeito à experiência de movimento de translação. Durante a realização de movimentos de translação, os valores do campo magnético sentido pelos magnetómetros deverão permanecer constantes, no entanto, as curvas obtidas pelos magnetómetros para

este tipo de movimento apresentam variações causadas pela interferência do campo magnético por parte dos motores do braço robótico.

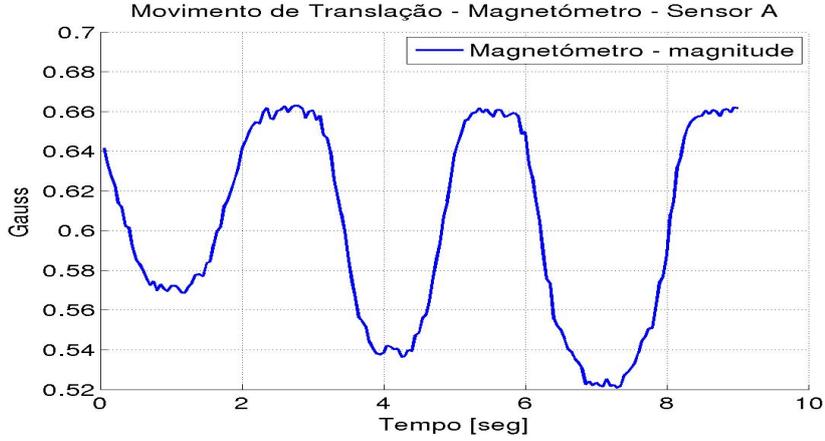


Figura 2.60: Magnitude do magnetômetro do IMU A - translação.

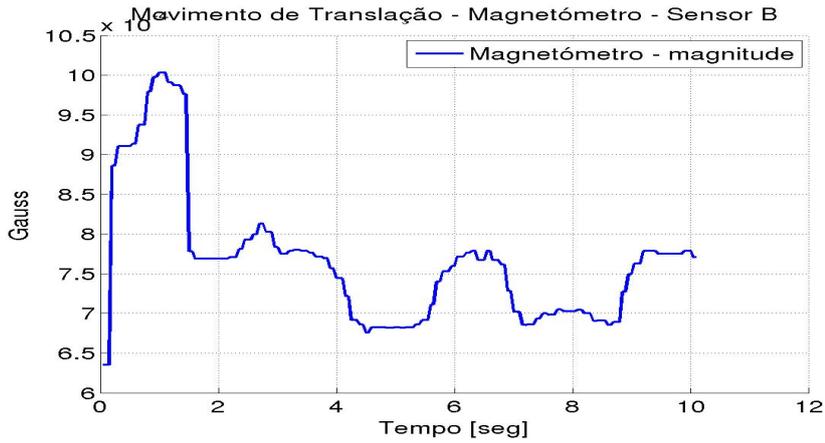


Figura 2.61: Magnitude do magnetômetro do IMU B - translação.

Nas situações em que o campo magnético é estático, é possível utilizar magnetômetros para determinar o ângulo de *Yaw*, através da equação (2.3) apresentada no projeto [37].

$$yaw = \arctan \left(\frac{-Y_{mag} \cos(\theta) - Z_{mag} \sin(\theta)}{X_{mag} \cos(\phi) + Y_{mag} \sin(\phi) \sin(\theta) - Z_{mag} \sin(\phi) \cos(\theta)} \right) \quad (2.3)$$

O cálculo do ângulo *yaw* apresenta-se nesta secção como uma forma mais perceptível de visualizar o efeito da existência de um campo magnético variável. Nas Figuras 2.62 e 2.63, apresentam-se as variações do ângulo *yaw* para cada IMU A e B respetivamente. Neles, pode-se observar que, apesar do movimento de translação não apresentar variação

da sua orientação, existe grande variação dos valores angulares de *yaw*. Esta variação torna impraticável o uso deste tipo de sensor no robô humanóide como forma de calcular a variação do ângulo *yaw*, uma vez que o robô é constituído essencialmente por materiais que podem alterar o campo magnético, como materiais ferromagnéticos e servomotores, nos quais circula corrente elétrica.

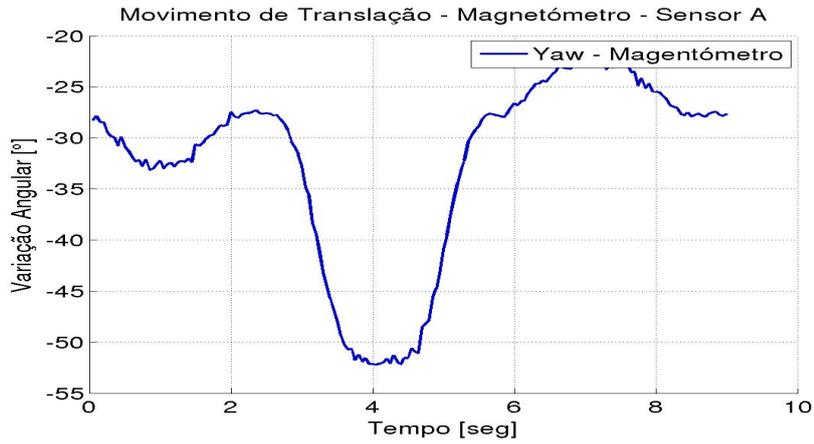


Figura 2.62: *Yaw* do magnetómetro do IMU A - translação.

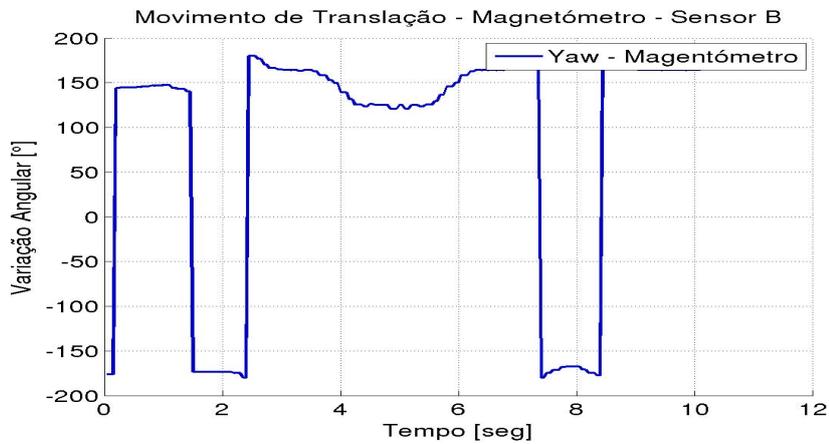


Figura 2.63: *Yaw* do magnetómetro do IMU B - translação.

Capítulo 3

Rede de Sensores Inerciais

Neste capítulo será referido todo o processo desde o projeto até à conceção da rede inercial a implementar no robô humanóide. Nesta explicação serão também referidos os problemas encontrados, bem como a abordagem para a sua solução.

3.1 Componentes da Rede

O desenvolvimento da rede de sensores inerciais decorreu sempre com a intenção de garantir dois pré-requisitos principais. A rede resultante teria que ser dotada da capacidade de alteração da posição e orientação de cada unidade inercial. Para além disso, a gestão da aquisição dos dados de todos os sensores teria que ser realizada de forma independente, permitindo uma conexão rápida e fácil de dispositivos que necessitem dos dados provenientes da rede, fornecendo diretamente o seu *output*.

Os principais componentes utilizados para o desenvolvimento da rede inercial foram:

- Unidades inerciais - IMU;
- UC - Unidade de Controlo;
- *multiplexer*.

3.1.1 Unidades inerciais - IMU

Como os resultados dos testes realizados no Capítulo 2 revelaram que ambas as unidades apresentam comportamentos similares, possibilitando em ambos obter aproximadamente o mesmo tipo de informação, no desenvolvimento da rede serão incorporadas principalmente unidades do tipo B, uma vez que estas apresentam menores dimensões.

Na rede a desenvolver serão então utilizados oito IMUs do tipo B, limite imposto pelas conexões permitidas pelo *multiplexer* referido mais à frente. Além destes, por forma a tirar partido das capacidades da Unidade de Controlo descrita a seguir, e uma vez que os dados obtidos pelo IMU do tipo A apresenta leituras dos acelerómetros ligeiramente menos ruidosos, será também incorporado um deste tipo.

3.1.2 Unidade de Controlo - *Arduino*

Para a função de UC foi escolhida uma plataforma de desenvolvimento cujo seu *setup* consiste na incorporação de um microcontrolador ATmega328P e um conjunto de *IO's* (digitais e analógicos) que permitem a conexão deste microcontrolador com *hardware* exterior, possuindo também a capacidade de implementar diversos protocolos de comunicação. Esta UC apresenta-se com o nome *Arduino*, modelo *UNO R3*. Na Figura 3.1 é possível observar um exemplo de um dispositivo do mesmo modelo do utilizado na rede. Esta UC apresenta seis entradas analógicas, catorze entradas/saídas digitais, seis das quais permitem o recurso a PWM - *Pulse-Width Modulation*. Para além disso apresenta ainda alguns pinos, dos quais se podem obter 5V, 3.3V ou GND-0V. Entre os pinos digitais e analógicos, alguns apresentam a possibilidade de serem utilizados para fins de comunicação, através de protocolos como *RS232*, *I²C* ou ainda *SPI*. Esta plataforma possui uma frequência máxima de 16 MHz e memória *flash* de 32 KB [38].

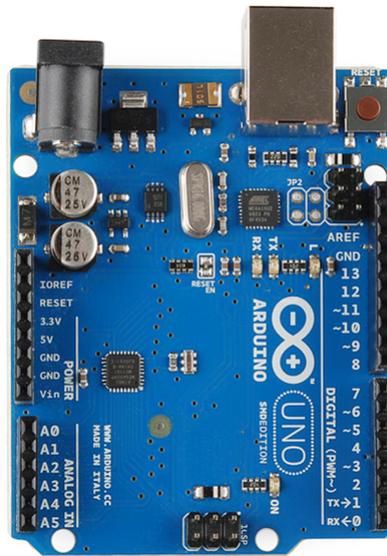


Figura 3.1: Arduino UNO R3 (revisão 3).

3.1.3 *Multiplexer*

A incorporação deste componente surgiu como resposta à necessidade de estabelecer conexão a vários IMUs ao mesmo barramento através do protocolo de comunicação *I²C*, sendo que todos os IMUs possuem o mesmo endereço de identificação.

O *multiplexer* é um dispositivo que entre várias linhas, seleciona uma como *input* e conecta-a com uma linha de *output*. Em alguns dispositivos específicos é também possível considerar a situação recíproca, isto é, possibilita a conexão de uma linha única de *input*, com uma linha de *output* selecionada de entre um grupo.

Para a seleção da linha, este tipo de dispositivo dispõe de um conjunto de n linhas lógicas (linhas de seleção) que possibilitam a seleção entre 2^n linhas. Também é comum

encontrar uma linha lógica que, através da atribuição do valor 0 ou 1, possibilita ou impede o funcionamento do dispositivo (linha de *enable*).

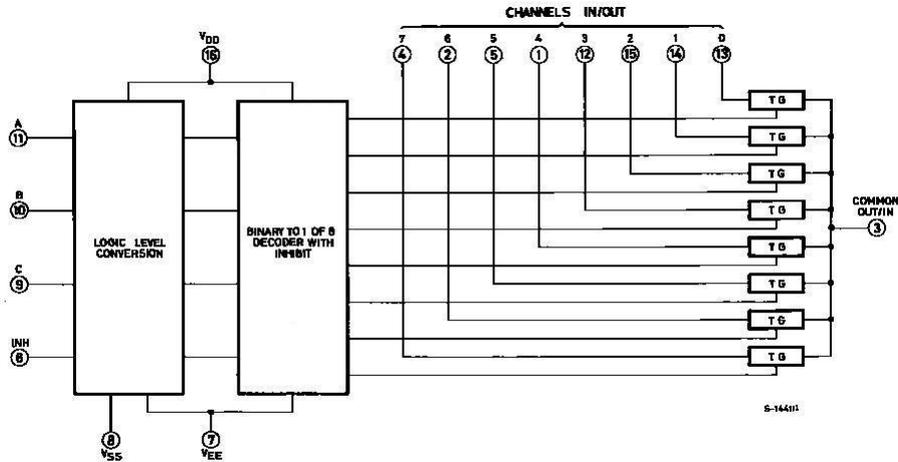


Figura 3.2: Esquema funcionamento *multiplexer* analógico 8 para 1 - HCF4051BE [39].

O dispositivo utilizado na rede é o *multiplexer* analógico HCF4051BE, que permite comunicação bi-direcional e a conexão de uma de oito linhas *input/output* possíveis (0 a 7), a uma única linha *output/input* (*COMMON OUT/IN*), com três linhas lógicas para a seleção (A, B e C) e uma linha *enable* (INH). A Figura 3.2 apresenta um esquema de funcionamento deste dispositivo [39].

Para o controlo da sua seleção lógica é necessário recorrer aos dados do fabricante, onde se encontra a tabela lógica de controlo do *multiplexer*. A tabela presente na Figura 3.3 representa a tabela do controlo do *multiplexer* referente ao esquema foi apresentado na Figura 3.2.

Como já foi referido anteriormente, a arquitetura deste modelo permite seu funcionamento bi-direcional, permitindo que a informação seja transmitida nos dois sentidos. Sendo assim, é possível implementar através deste dispositivo, o protocolo de comunicação I^2C , para comunicar com os IMUs do tipo B.

INPUT STATES				"ON" CHANNEL (S)
INHIBIT	C	B	A	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	X	X	X	NONE

Figura 3.3: Tabela lógica para controlo do *multiplexer* - HCF4051BE [39].

3.2 Arquitetura da Rede

Implementando os dois tipos de unidades A e B na mesma UC, a rede fica a ser classificada como uma rede "híbrida". Isto porque a rede é composta por uma topologia em estrela, em que a UC passa a ser o núcleo que troca informação entre dois ramos distintos, o ramo da comunicação com o IMU A através do protocolo de comunicação *RS232*, e o ramo do *multiplexer* que articula a comunicação com um máximo de oito IMUs do tipo B através do protocolo de comunicação *I²C*, formando assim uma rede com topologia *BUS*. A Figura 3.4 apresenta um esquema da formação da rede de sensores a implementar.

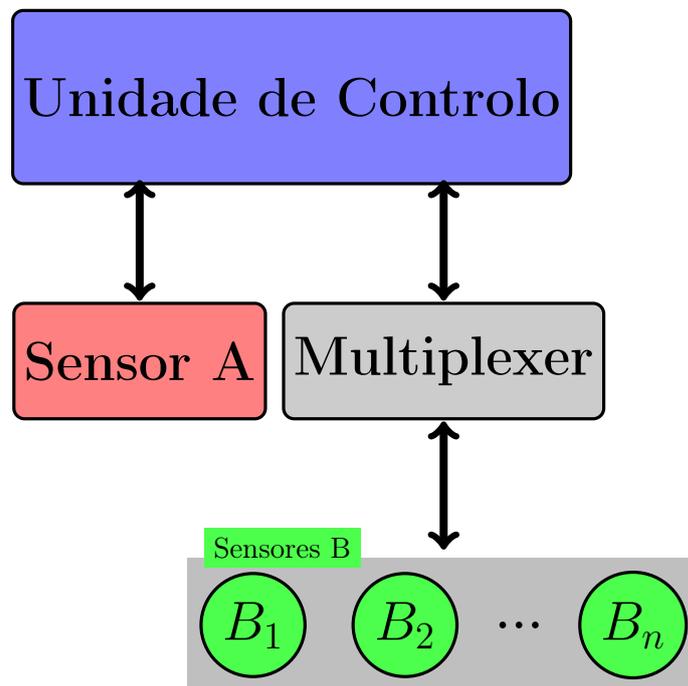


Figura 3.4: Esquema da topologia da rede de sensores.

Na Figura 3.5 está representado um esquema da montagem da rede inercial correspondente à implementação de dois IMUs do tipo B com recurso ao *multiplexer*. Como se pode observar, cada IMU recebe diretamente da UC a alimentação elétrica, estando alimentados com 5V e 0V. Para além disso, em todo o conjunto de IMUs do tipo B, a linha de *clock*, ou *SCL*, é comum a todos, estando todos os sensores do tipo B comumente ligados à entrada/saída *A5* da UC *Arduino UNO*. Já a linha de transferência de dados, ou *SDA*, de cada IMU, é conectada a uma das linhas de convergência do *multiplexer*, sendo que a linha para a qual estas convergem, *COMMON IN/OUT*, é conectada à entrada/saída *A4* da UC, que após a correta configuração se destina a servir de cabo de transferência de dados, ou *SDA* na comunicação baseada no protocolo *I²C*. A alimentação do *multiplexer* é também efetuada através das linhas que são utilizados para alimentar os IMUs. Na mesma figura é ainda possível observar que são utilizados os pinos digitais 2,3 e 4 da UC *Arduino*, para coordenar a conversão lógica destinada à seleção

da linha que ligará à linha *COMMON IN/OUT*. Nesta figura apenas se podem observar dois IMUs do tipo B conectados, no entanto, com este modelo de *multiplexer*, é possível conectar até um total de oito IMUs deste tipo.

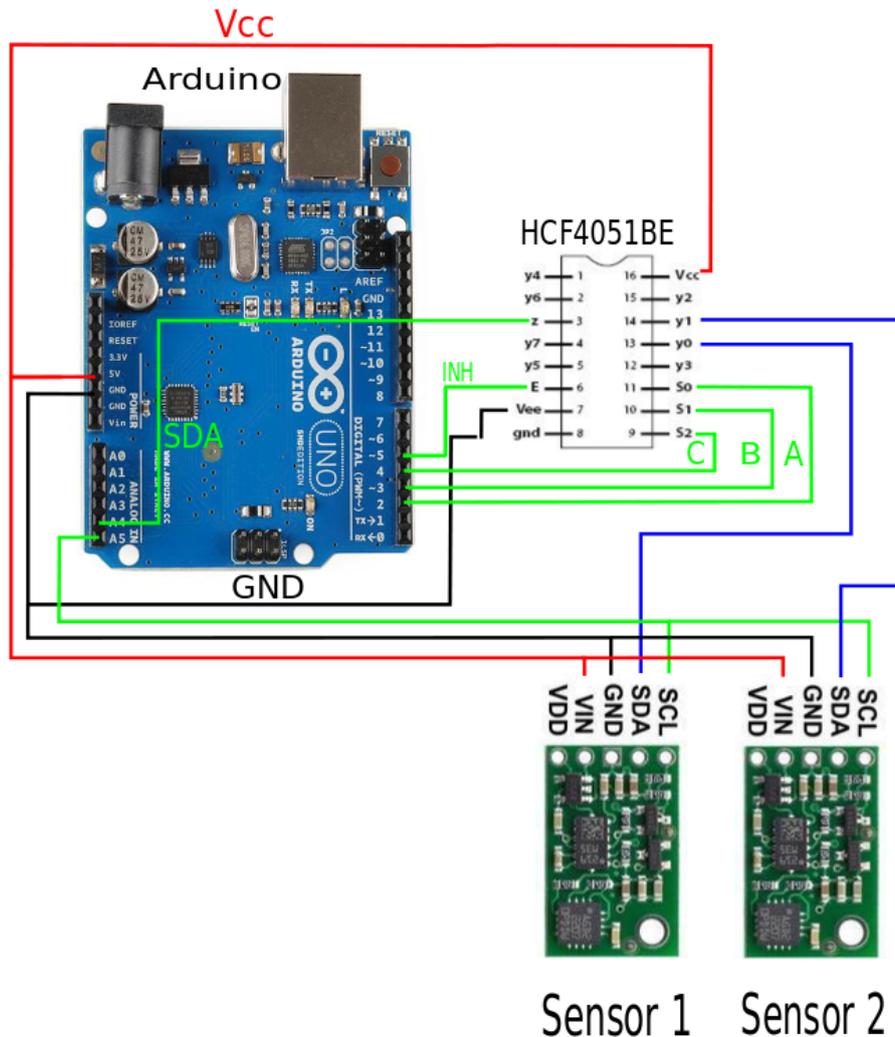


Figura 3.5: Implementação rede inercial com dois sensores.

Com o tipo de montagem presente na Figura 3.5 é possível obter sequencialmente os dados de todos os sensores independentemente do número de IMUs utilizados. No entanto, o número crescente de unidades utilizadas na rede baixa a frequência de aquisição de dados por parte da UC.

A comunicação entre a UC *Arduino* e a UC externa é efetuada através de uma porta *USB* baseada no protocolo de comunicação *RS232*. A UC *Arduino* dispõe também um par de entradas/saídas digitais que podem ser configuradas para comunicar com o protocolo *RS232*, no entanto, o barramento deste par de pinos é partilhado com a porta *USB* na implementação do protocolo de comunicação *RS232*. Este fato, veio mostrar-se um obstáculo à implementação do IMU do tipo A na rede de IMUs, já que o único

barramento disponível para a comunicação pelo protocolo *RS232* já se encontra ocupado. Este obstáculo foi contornado através da utilização de uma biblioteca, a *SoftwareSerial Library* disponibilizada pelo fabricante do *Arduino*, cuja função é utilizar duas linhas digitais, e com elas implementar o protocolo *RS232*, sendo este tipo de ferramenta é designada por Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - UART por *software* [40]. Esta aplicação tornou possível a implementação de um IMU do tipo A, e como se pode observar na Figura 3.6 alimentado também através da UC (3.3V e 0V) e as suas linhas de transmissão de dados *Rx* e *Tx* conectadas às entradas/saídas digitais 6 e 7, após a sua configuração para funcionamento por *RS232*.

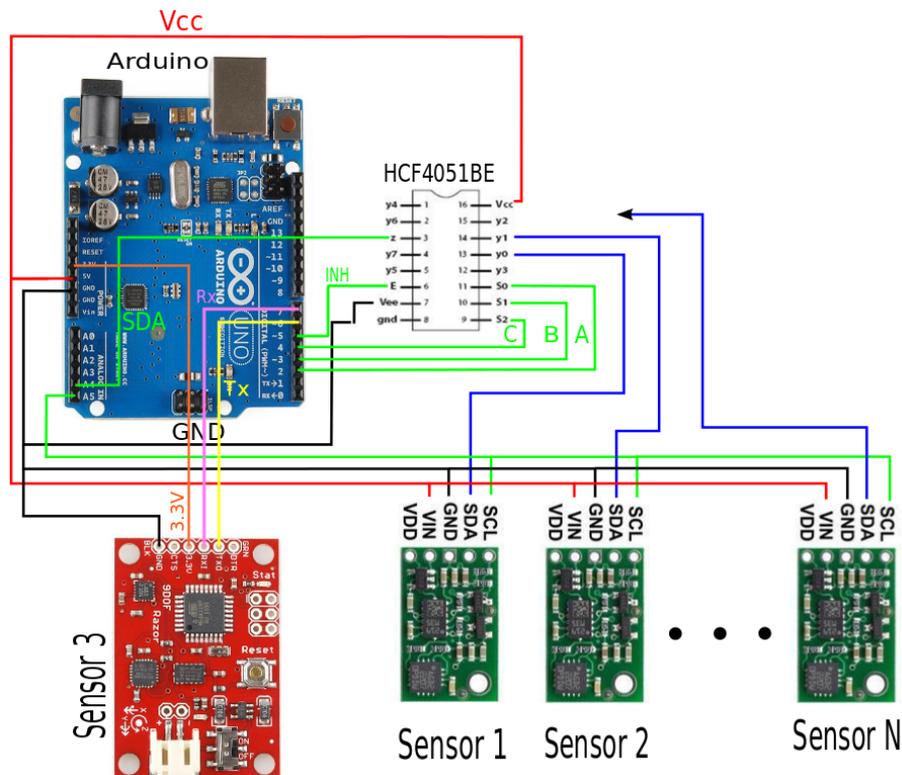


Figura 3.6: Implementação rede inercial com incorporação sensor A

3.3 Placa de Circuito Impresso

Para a implementação final da rede de sensores inerciais no robô humanóide, procedeu-se ao desenvolvimento de uma placa de circuito impresso em *PCB*. Esta placa, tem como por objetivo tornar o circuito mais robusto e simplificado, sendo nela realizada a conexão de todos os componentes.

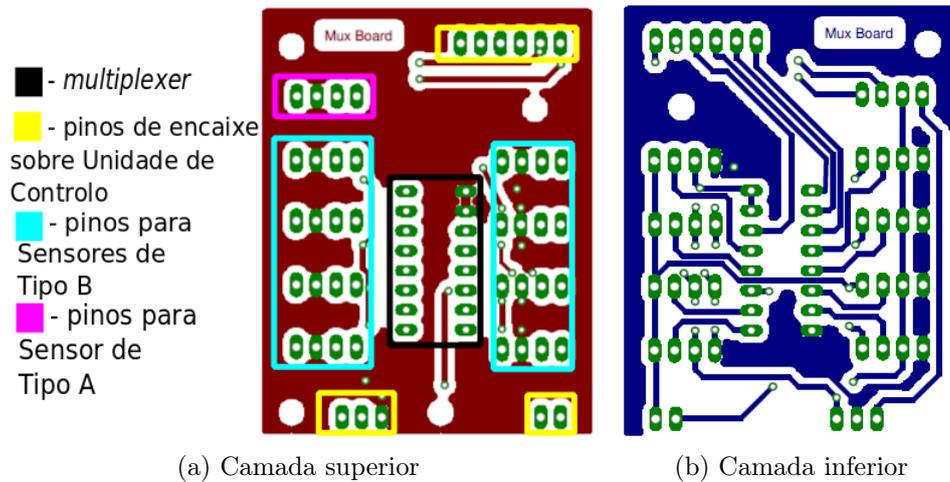


Figura 3.7: Desenho CAD placa PCB circuito impresso

O circuito e respetiva placa *PCB* foram desenvolvidos através do *software Eagle 5.7*, sendo o resultado do desenho *CAD* apresentado na Figura 3.7. Nesta figura pode observar-se a realização de uma placa de duas camadas devido à impossibilidade de implementar todas as conexões necessárias na área de uma só camada. Ainda na mesma figura, é possível observar na vista da camada superior, Figura 3.7a, que o retângulo a preto rodeia o conjunto de pinos destinados à montagem do *multiplexer*, os retângulos a amarelo rodeiam os pinos destinados a estabelecer a conexão entre a placa e a UC *Arduino*, os retângulos azuis rodeiam os pinos que servirão para a conexão dos IMUs do tipo B à placa, e finalmente o retângulo rosa rodeia os pinos destinados à conexão do IMU do tipo A à placa. O esquema de ligações do circuito da rede inercial é apresentado no apêndice C

Na Figura 3.8 é possível observar a placa de circuito impresso na sua fase final, antes e depois de nela serem soldados os componentes de conexão.

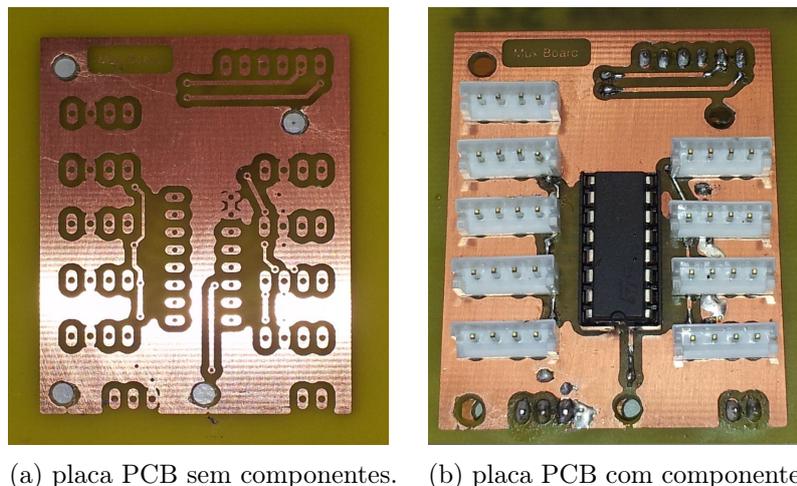


Figura 3.8: Placa PCB circuito impresso.

3.4 Fixação da Rede de Sensores ao humanóide

Com todos os dispositivos necessários à implementação da rede de sensores inerciais prontos a ser instalados, surgiu a problemática da fixação do conjunto. O essencial para a implementação da rede reside na fixação da UC, à qual se ligam todos os IMUs, e ainda na fixação dos mesmos.

Uma vez que a dimensão dos IMUs é relativamente pequena, o acessório que os deve alojar e fixar ao humanóide, sendo também de pequenas dimensões, pode ficar permanentemente fixo no humanóide. Por essa razão, os acessórios para os IMU foram desenvolvidos para se fixarem ao robô humanóide com fixação aparafusada. Na Figura 3.9 encontra-se ilustrada a fixação de duas das unidades inerciais implementadas na rede. De notar que os apoios brancos em *nylon* podem ser colocados em qualquer lugar do humanóide, desde que para isso existam as furações com as mesmas medidas.

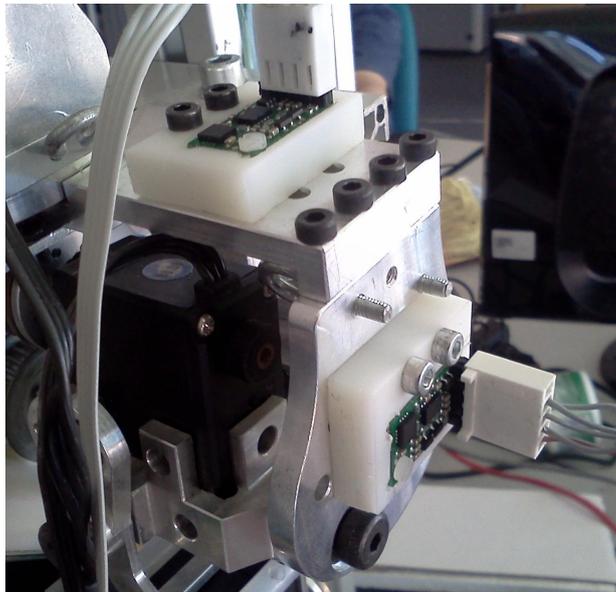


Figura 3.9: Apoios para fixação dos sensores inerciais.

A fixação da UC por ser de maiores dimensões, deve ser provida de um sistema fácil de colocar e retirar. A solução encontrada baseia-se em fixação por clipagem. Este método de fixação é o ideal, pois nos futuros projetos dentro do âmbito do PHUA pode ser conveniente acoplar ou desacoplar rápida e facilmente a UC do humanóide. Para além disso, este método evita a necessidade de realizar novas furações na estrutura do robô humanóide. Na Figura 3.10a pode ser observado o suporte desenvolvido, no qual se encontram acopladas a UC e a placa de circuito impresso que encaixa na UC sem a necessidade de ligações com fios, e na Figura 3.10b, o suporte montado na zona pélvica do robô humanóide, sendo essa a zona escolhida, uma vez que os testes com a rede de sensores implementada serão realizados apenas com as pernas e cintura do robô humanóide.

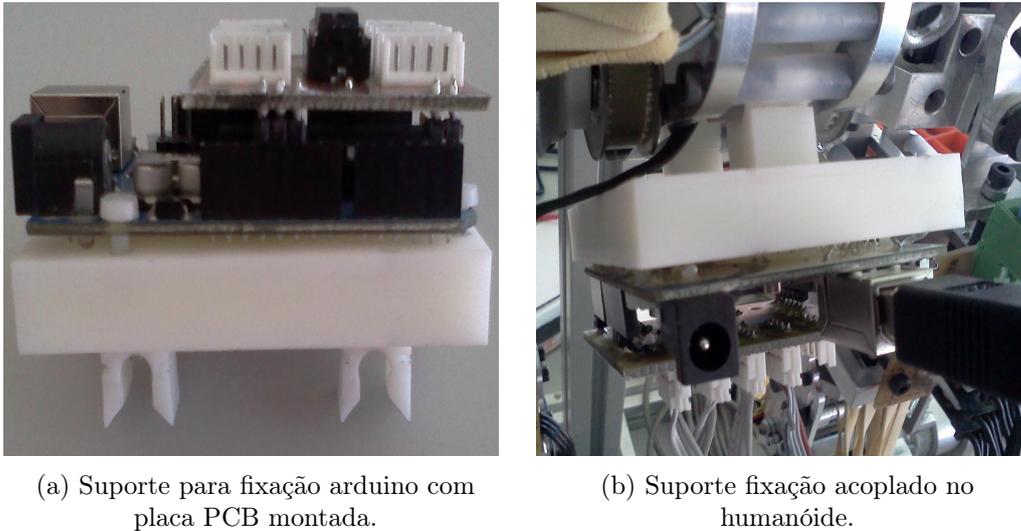


Figura 3.10: Suporte de fixação do arduino

Os desenhos técnicos de todos os suportes desenvolvidos para a implementação dos constituintes da rede de sensores encontram-se no apêndice B.

3.5 Recepção dos Dados dos Sensores

Para a recepção dos dados provenientes da rede de sensores inerciais foi elaborado um módulo na plataforma ROS, que funciona de forma similar ao módulo desenvolvido para a realização dos testes dos sensores no Capítulo 2.

O fluxograma presente na Figura 3.11 mostra de uma forma simplificada a sequência seguida na execução do programa de obtenção dos dados dos IMUs presentes na rede. Assim que o módulo de recepção de dados é inicializado em 1, a UC procede à procura dos IMU conectados à rede, seguida da inicialização dos que são identificados, bem como da comunicação *RS232*. De seguida, em 2, o módulo de recepção verifica quantos IMUs a UC detetou, através do envio de uma *string*, sendo que em 3 é executada a resposta com o número total de unidades inerciais presentes na rede. Entrando o módulo em *loop*, é executada sequencialmente a mesma tarefa, ou seja, em 4 o módulo envia à UC uma *string* com o pedido dos dados dos IMUs da rede, ao qual a UC em 5, responde enviando-os. Assim que o módulo receber os dados, publica-os, em 6, numa mensagem *ROS*, a qual será utilizada posteriormente noutros módulos. Passando a 7, se se verificar uma ordem de interrupção, são executados os procedimentos de encerramento, em 8, com a cessação das comunicações inicializadas.

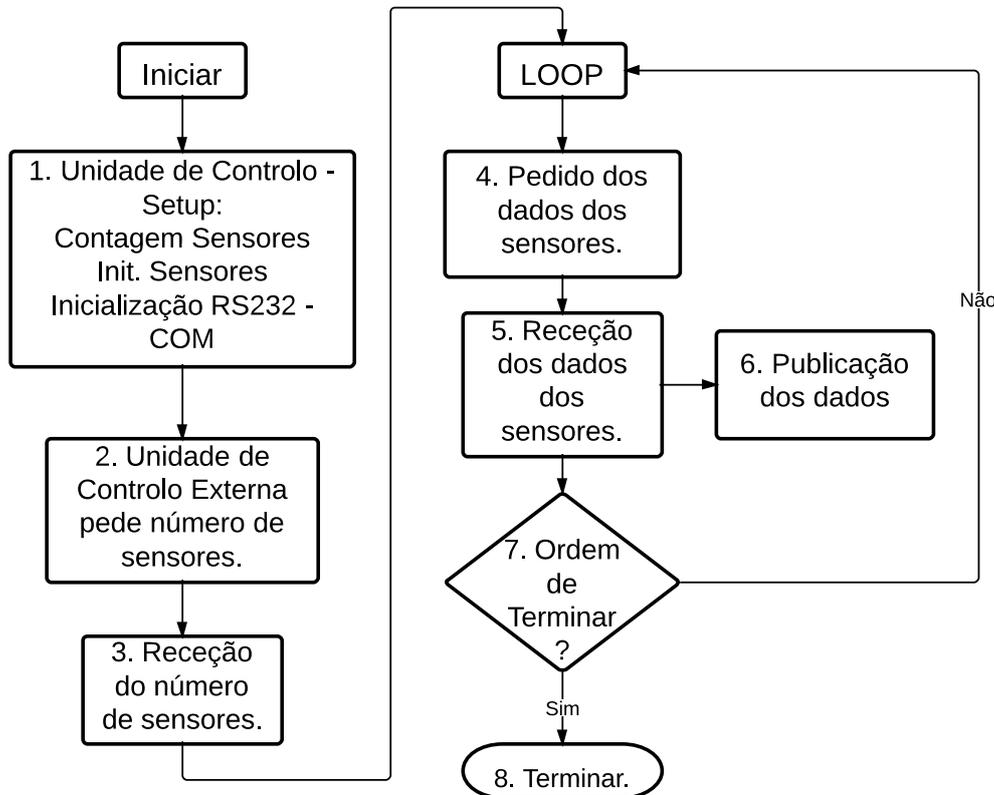


Figura 3.11: Execução programa dos dados da rede de sensores

3.6 Posicionamento da Rede no Robô humanóide

Para o exemplo que se segue, de implementação da rede, apenas se utilizou a parte inferior do humanóide apresentada na Figura 3.12, constituída pela anca, pernas e pés.

Na Figura 3.13a é possível observar um exemplo de uma possível implementação da rede de sensores inerciais (ou IMUs), com o número máximo de sensores que é possível utilizar atualmente. Na figura, os números a vermelho simbolizam os oito sensores do tipo B espalhados entre as pernas e a anca, e a amarelo o sensor do tipo A, localizado na parte superior entre a anca e a extremidade inferior do tronco. Para cada perna são implementadas duas unidades localizadas uma a cima e outra abaixo de cada joelho, sendo utilizadas as unidades 5,6,7 e 8 nestas zonas. Na zona da anca encontram-se colocadas também quatro unidades do tipo B, sendo distribuídas aos pares para os lados direito e esquerdo, e colocadas segundo diferentes orientações. Estes últimos apresentam a numeração 1,2,3 e 4. O sensor do tipo A encontra-se entre a extremidade inferior do tronco e a extremidade superior da anca, sendo representado com o número 9.

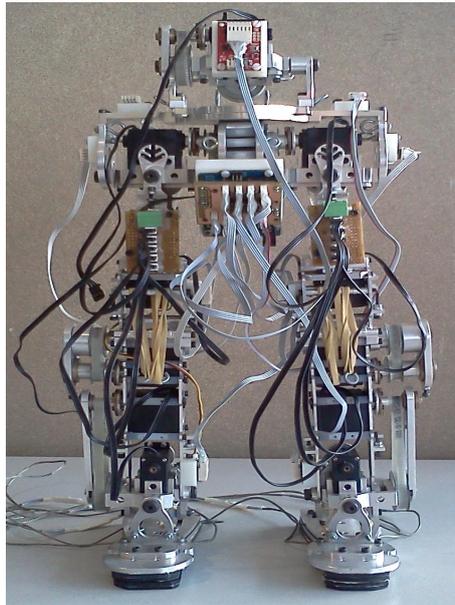
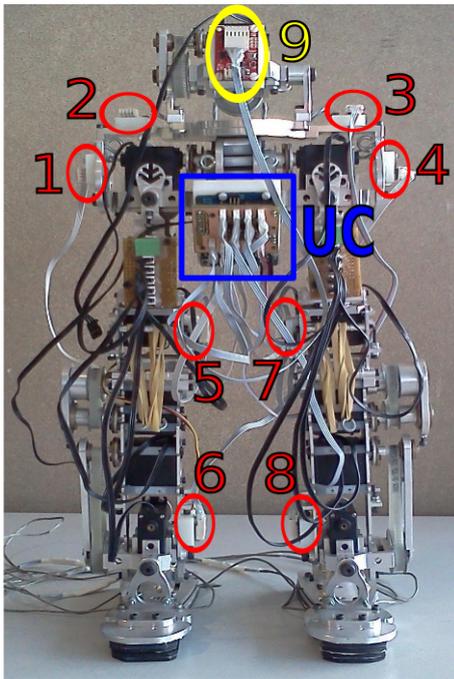


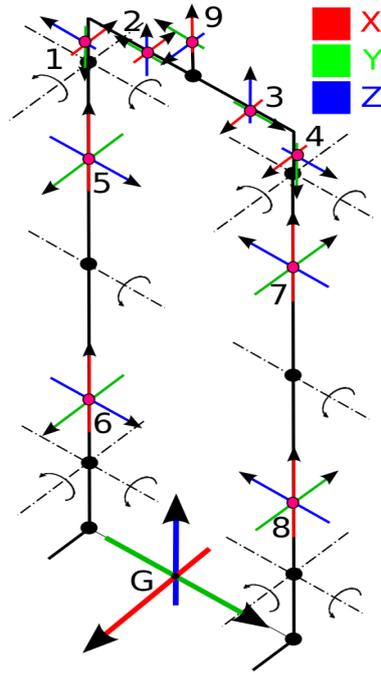
Figura 3.12: Parte inferior do humanóide utilizada nos testes.

Ainda na figura 3.13a é possível observar rodeado a azul, a UC responsável pela obtenção dos dados das unidades IMU e do envio dos dados para outra unidade com a qual seja estabelecida a comunicação. Como se pode observar, o local escolhido para a sua localização apenas com a parte inferior, foi a zona pélvica rodeado a azul, pois nesta zona o dispositivo não seria um elemento impeditivo para os movimentos passíveis de serem executados pelo robô humanóide.

A Figura 3.13b apresenta o diagrama simplificado da parte inferior do robô humanóide, sob o qual estão representados os sistemas de eixos de todas as unidades implementadas nesta plataforma. Em cada sistema de eixos, a direção X está representada a vermelho, a direção Y a verde e a direção Z a azul.



(a) Orientação dos IMUs instalados no robô humanóide.



(b) Orientação de todos os IMU utilizados nos testes.

Figura 3.13: Exemplo de implementação da rede de sensores inerciais no robô humanóide.

Dada a modularidade da rede de sensores inerciais, o número de unidades e a localização escolhida para os mesmos não é necessariamente definitiva. No entanto, esta configuração foi utilizada para a realização de experiências que serão apresentadas no capítulo 4.

A escolha desta disposição da rede no robô humanóide destina-se, para além da avaliação das leituras realizadas pelos sensores, à avaliação da técnica de redundância sensorial realizada através da combinação das leituras dos sensores aplicados na zona da anca, nomeadamente os sensores das unidades 1,2,3 e 4, e também à avaliação da técnica de operação diferencial, na qual a diferença de valores dos diferentes sensores com eixos paralelos é utilizada para a obtenção das curvas de velocidade dos servomotores, nomeadamente através da combinação das unidades 5 com 6, 7 com 8, 1 com 5 e 4 com 7.

Capítulo 4

Experiencias e Resultados

Neste capítulo será apresentado um conjunto de experiências nas quais são executadas sequências de movimentos com a parte inferior do robô humanóide. Durante a execução das experiências, a rede de sensores inerciais com a implementação apresentada em 3.6 realizou a recolha dos dados provenientes das unidades inerciais.

4.1 Montagem Experimental

A montagem experimental para a realização das experiências apresenta-se como uma adaptação da atividade experimental realizada no projeto [15].

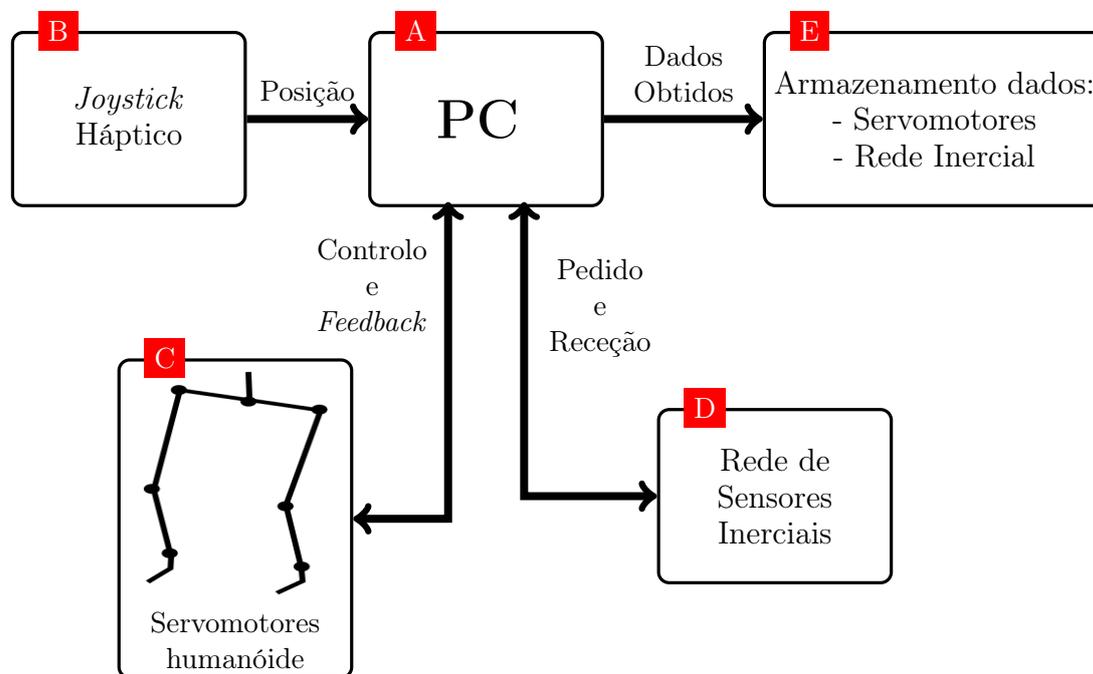


Figura 4.1: Funcionamento da montagem experimental.

O diagrama da Figura 4.1 apresenta de uma forma resumida o funcionamento de toda

a montagem experimental para a realização dos testes que serão descritos mais à frente. Através da montagem e dos módulos desenvolvidos em [15], em A do diagrama, o *PC* responsável por todo o processamento de informação recebe as coordenadas da extremidade do *joystick* háptico B. Através dessas coordenadas, de um fator de conversão e de modelos de cinemática inversa desenvolvidos no trabalho já referido, são obtidas as posições dos servomotores que são atuados em C, dependendo do tipo de movimento a executar nos testes. Durante a realização dos testes, de C para A e de D para A são enviados para o *PC* os dados das posições dos servomotores e dos sensores incorporados na rede. Os dados recebidos em E são armazenados em ficheiros posteriormente analisados.

O *software* da atividade experimental foi desenvolvido através da plataforma ROS. A partir desta, no projeto [15] foi desenvolvido um módulo responsável pela recepção dos dados do *joystick* háptico, e outro módulo para o controlo do humanóide no qual também é feita a recepção dos dados dos seus servomotores e sua posterior publicação. Neste trabalho de desenvolvimento e concepção da rede de sensores inerciais foi desenvolvido o módulo de recepção dos dados provenientes da rede, sendo estes também publicados através de mensagens do ambiente ROS.

Durante a realização das experiências, os dados dos servomotores e todos os dados da rede de sensores inerciais publicados através da ferramenta *rosvbag* foram gravados em ficheiros posteriormente utilizados para a apresentação dos resultados obtidos, apresentados mais à frente.

4.2 Movimentos Realizados

Para a avaliação dos dados da rede inercial incorporada no humanóide, os seus movimentos são realizados em situação de equilíbrio estático, tentando em cada um abranger a maior amplitude possível. Estes movimentos destinados à avaliação da rede de sensores inerciais foram organizados em três experiências, cada uma descrevendo um padrão de movimento diferente das restantes, por forma a obter os dados provenientes dos sensores (acelerómetros e giroscópios) da rede.

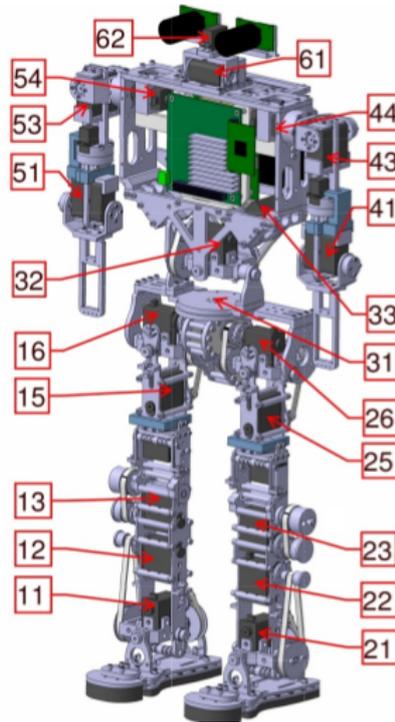


Figura 4.2: Numeração dos servomotores instalados na plataforma humanoide [10].

A Figura 4.2 apresenta a enumeração dos endereços *ID* de todos os servomotores presente no robô humanoide. Desta lista, apenas se utiliza a metade inferior do robô humanoide equipada com os seguintes servomotores:

tornozelo

direito - 11,12

esquerdo - 21,22 ;

joelho

direito - 13

esquerdo - 23 ;

anca

lado direito - 15,16

lado direito -25,26.

Movimento	Juntas que se movem
1 - Agachamento	12,22,13,23,16,26
2 - Flexão do joelho	13,23,16,26
3 - Movimento lateral	11,21,15,25

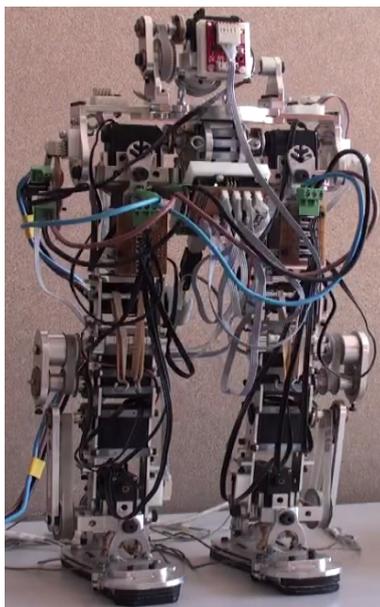
Tabela 4.1: Juntas movimentadas em cada tipo de movimento.

A Tabela 4.1 apresenta a designação de cada uma das experiências realizadas, assim como os servomotores colocados em movimento em cada experiência.

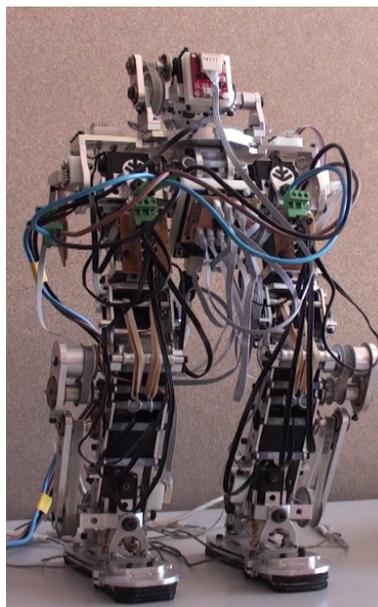
1 - Agachamento

Este tipo de movimento baseia-se na flexão dos joelhos (servomotores 13 e 23) acompanhada com a rotação do tornozelo (servomotores 12 e 22) e da anca (servomotores 16 e 26) segundo o mesmo plano, de forma a manter a zona superior da anca o mais vertical possível.

Nas Figuras 4.3a e 4.3b é possível observar um exemplo do robô humanóide na fase inicial e final para este tipo de movimento. Na Figura 4.4 encontram-se representadas as curvas dos servomotores da perna direita. Como se pode observar no gráfico, a curva do servomotor do joelho apresenta maior curso comparativamente aos servomotores da anca e do tornozelo, justificando assim o fato da posição final da Figura 4.3b não apresentar a zona superior da anca na vertical.



(a) Posição inicial - agachamento.



(b) Posição final - agachamento.

Figura 4.3: Movimento de agachamento.

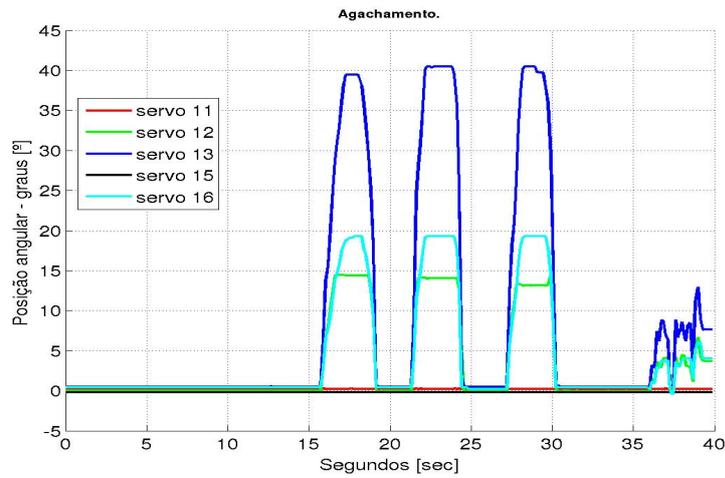


Figura 4.4: Valores dos servomotores durante o agachamento.

2 - Flexão do joelho

Neste tipo de movimento apenas se movem os servomotores dos joelhos (13 e 23) e da anca (16 e 26), permanecendo todos os outros em posições fixas. As Figuras 4.6a e 4.6b ilustram as posições inicial e final para este movimento e o gráfico presente na Figura 4.5 apresenta as curvas dos servomotores da perna direita, perante um movimento deste tipo. Como é possível observar no gráfico, todos os servomotores à exceção dos servomotores do joelho e anca, encontram-se com valores fixos. Também é possível observar que o movimento da anca é realizado ao mesmo tempo do movimento do joelho, embora com menor curso angular.

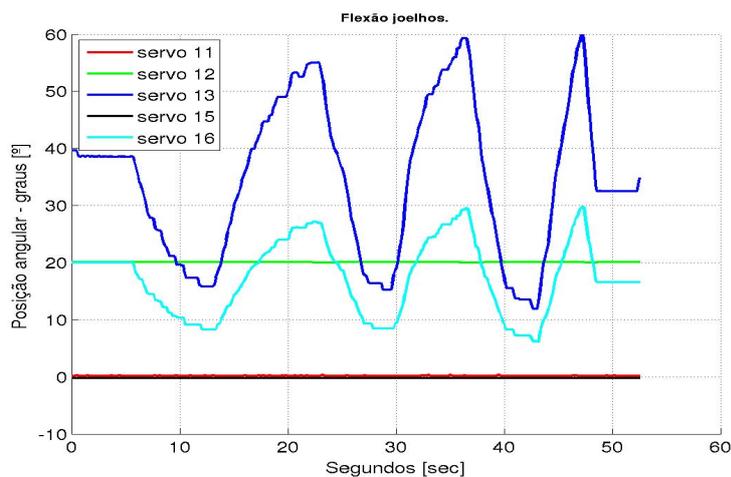
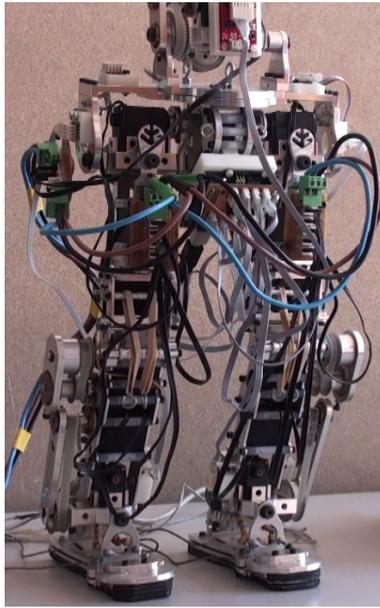
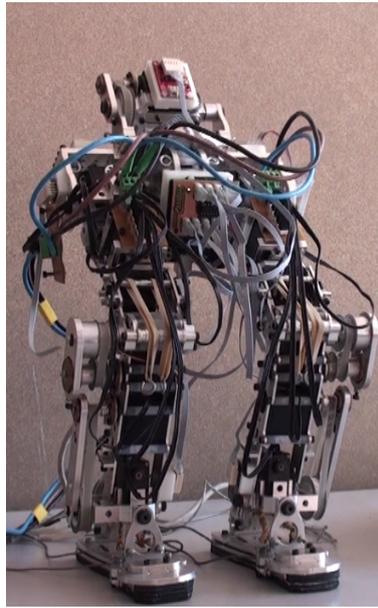


Figura 4.5: Valores dos servomotores durante a flexão dos joelhos.



(a) Posição inicial - flexão do joelho.

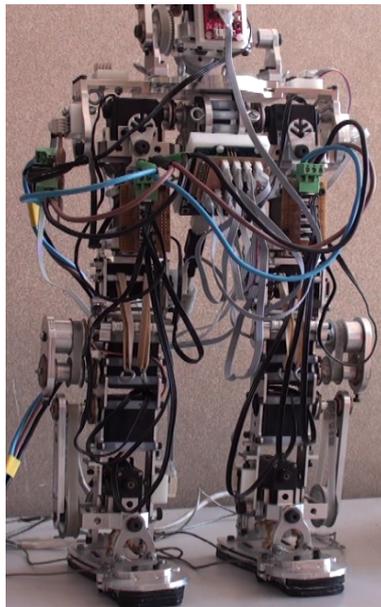


(b) Posição final - flexão do joelho.

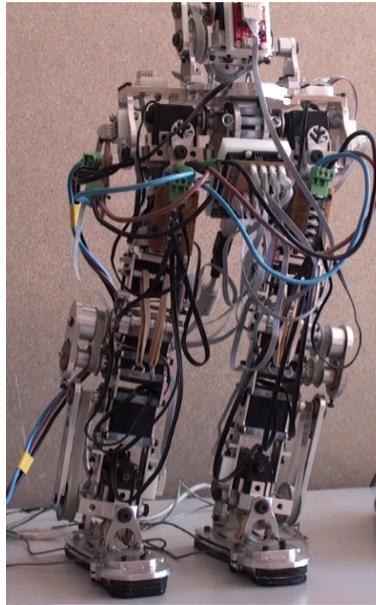
Figura 4.6: Movimento de flexão do joelho

Movimento lateral

Este tipo de movimento tira partido dos servomotores que anteriormente se encontraram imobilizados, ou seja, são movimentados os servomotores dos tornozelos (11 e 21) e da anca (15 e 25), obtendo um balancear lateral do robô humanóide. As Figuras 4.7a e 4.7b apresentam respetivamente as posições inicial e final do movimento deste tipo. Na Figura 4.8 encontra-se o registo dos valores dos servomotores durante a realização do movimento lateral.



(a) Posição inicial - movimento de anca.



(b) Posição final - movimento de anca.

Figura 4.7: Movimento de anca.

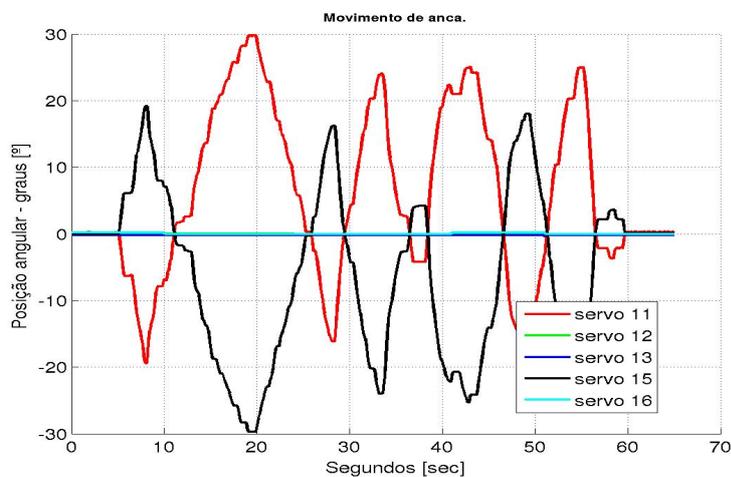


Figura 4.8: Valores dos servomotores durante o movimento lateral.

4.3 Grandezas a Avaliar

A realização dos movimentos atrás descritos destina-se à obtenção de dados da rede de sensores inerciais para posterior avaliação das seguintes grandezas:

Velocidade angular

obtida através dos giroscópios, esta grandeza será comparada com a velocidade dos

servomotores de cada junta. Para a comparação entre os servomotores da primeira junta e o primeiro sensor da cadeia cinemática a comparação é direta, mas para as juntas posteriores, a comparação é feita entre o servomotor da junta e a diferença entre os valores dos giroscópios, de eixos paralelos, que se encontram adjacentes à junta;

Aceleração linear

obtida diretamente dos acelerómetros, esta grandeza será comparada com os valores de aceleração linear do robô humanóide, no local onde se encontra cada sensor instalado. Os valores da aceleração do robô humanóide são calculados através de modelos de cinemática direta para as pernas;

Inclinação

calculada com base nos dados dos acelerómetros, esta grandeza será comparada com as inclinações calculadas através dos modelos de cinemática direta para as pernas.

4.3.1 Cinemática Direta da Perna do Robô humanóide

Implementar a cinemática directa de um manipulador significa, portanto, determinar as relações que exprimem um ponto no espaço cartesiano, r , em função de um ponto no espaço das juntas, q , isto é

A cinemática direta de um manipulador é o processo através do qual se determinam as relações que exprimem o espaço cartesiano em função do espaço das juntas do manipulador [41].

Para possibilitar a determinação da posição e orientação dos elementos da rede inercial no espaço cartesiano, é necessário estabelecer a cinemática direta das pernas do robô humanóide. Para tal, considerou-se que ambas as pernas possuem movimentos independentes, sendo ambas tratadas como manipuladores de cinco GDL, onde cada perna apresenta a base do próprio pé como referencial global.

Na Figura 4.9a encontra-se um esquema simplificado dos graus de liberdade de cada perna com o qual se construiu a cadeia cinemática das pernas do robô humanóide, Figura 4.9b. A cadeia cinemática da mesma figura deu origem à Tabela 4.2, a tabela de *Denavit-Hartenberg*.

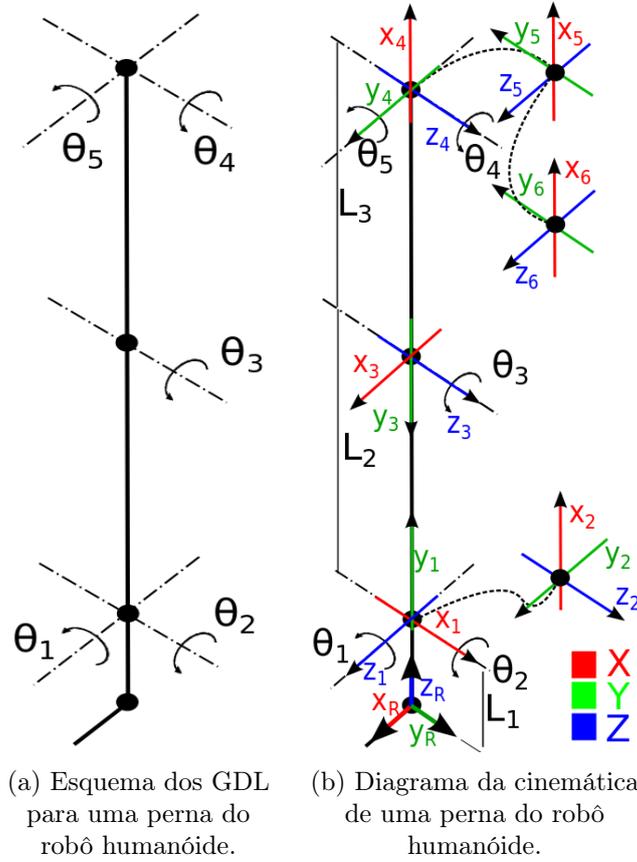


Figura 4.9: Diagrama cinemático de uma perna do robô humanóide.

Elo	θ_i	L_i (mm)	d_i (mm)	α_i
1	$\frac{\pi}{2}$	0	L_1	$\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_1 + \frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
3	θ_2	L_2	0	0
4	θ_3	L_3	0	0
5	θ_4	0	0	$\frac{\pi}{2}$
6	θ_5	0	0	0

Tabela 4.2: Tabela de *Denavit-Hartenberg* para as pernas do robô humanóide PHUA.

Cada linha da Tabela 4.2 contém os dados necessários à obtenção da matriz de transformação entre dois referenciais de um manipulador através da equação (4.1). Nesta equação, $rot_z(\theta_i)$ representa a rotação de amplitude θ_i em torno do eixo Z, $trans(L_i, 0, d_i)$ representa uma translação tridimensional L_i e d_i milímetros nos eixos locais X e Z, e $rot_x(\alpha_i)$ representa uma rotação com uma amplitude de α_i em torno do eixo X.

$$A_i = rot_z(\theta_i) \times trans(L_i, 0, d_i) \times rot_x(\alpha_i) \quad (4.1)$$

Uma vez obtidas todas as matrizes de transformação entre os referenciais das juntas de uma perna do robô humanóide, é possível obter a matriz de transformação que estabelece a relação entre a extremidade da anca e o referencial global (base do pé), através da multiplicação das matrizes de transformação obtidas através da Tabela 4.2. Sendo assim, na equação (4.2) a matriz ${}^R T_6$, matriz que define a transformação entre o referencial global e o último referencial da perna (a zona da anca), é obtida através da multiplicação sucessiva de todas as matrizes de A_1 até A_6 .

$${}^R T_6 = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 \times A_6 \quad (4.2)$$

Aceleração linear

A partir da matriz de transformação ${}^R T_6$, a obtenção dos valores da aceleração para a extremidade de um manipulador é realizada através da cinemática diferencial. Neste tipo de análise considera-se que a relação entre o vetor do espaço operacional \vec{r} , vetor constituído pelas coordenadas cartesianas, e o vetor do espaço de juntas \vec{q} , vetor constituído pelos valores das juntas do manipulador, é definida pela equação (4.3) onde F representa a matriz de transformação entre espaços.

$$\vec{r} = F \cdot \vec{q} \quad (4.3)$$

$$d\vec{r} = J \cdot d\vec{q} \quad (4.4)$$

Derivando a equação (4.3), surge a equação (4.4) onde J representa o jacobiano de F . Para $\vec{r} = \{x, y, z\}$ e $\vec{q} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5\}$ a matriz do Jacobiano com a qual se obtém a velocidade da anca no espaço cartesiano em função das velocidades das diferentes juntas, é determinada pelo processo apresentado em (4.5).

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x}{\partial \theta_4} & \frac{\partial x}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y}{\partial \theta_4} & \frac{\partial y}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial z}{\partial \theta_4} & \frac{\partial z}{\partial \theta_5} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para a obtenção dos valores da aceleração da extremidade do manipulador, isto é, da anca do humanóide, é necessária a diferenciação da equação (4.4). Sendo esta última equação um produto entre a matriz Jacobiana e o vetor da velocidade angular do espaço de juntas, o resultado da sua diferenciação é obtido através da regra da diferenciação do produto, sendo que a equação originada, pode ser observada na equação (4.6) [42].

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = J \cdot \frac{d^2 \vec{q}}{dt^2} + \frac{d}{dt} J \cdot \frac{d\vec{q}}{dt} \quad (4.6)$$

A equação (4.6) é utilizada para o cálculo do vetor de aceleração tridimensional para o regime contínuo, no entanto, as experiências apenas fornecem informação discreta. Sendo assim, a melhor forma de proceder aos cálculos da aceleração tridimensional é recorrer à equação (4.7), a qual utiliza a diferença entre iterações.

$$\Delta r = J \cdot \Delta q + \Delta J \cdot \Delta q \quad (4.7)$$

Com a equação (4.7) é possível proceder ao cálculo dos valores da aceleração linear no espaço cartesiano da anca. Para o cálculo de acelerações de zonas anteriores à anca, a cinemática deverá ser simplificada.

Inclinação

O cálculo da inclinação ou orientação da extremidade de um manipulador é realizada com base numa terminologia, sendo neste projeto utilizada a terminologia dos ângulos de *Euler*. Segundo esta, a orientação de um ponto no espaço é definida pela combinação de três ângulos, *roll*, *pitch* e *yaw*. Segundo a Figura 4.10, *roll* representa a rotação em torno do eixo X (a vermelho), *pitch* a rotação em torno do eixo Y (a verde) e *yaw* a rotação em torno do eixo Z (a azul).

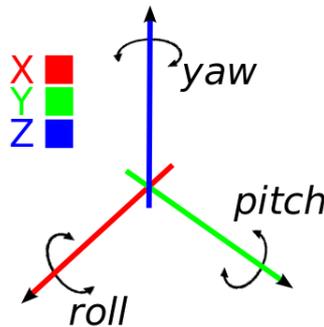


Figura 4.10: Ilustração dos ângulos de *Euler*.

Sabendo que a matriz 3×3 composta pelas três primeiras linhas e colunas da matriz ${}^R T_n$ apresentada em (4.8) apresenta a relação da orientação entre dois referenciais a partir da cinemática direta, e que a matriz R apresentada em (4.9) apresenta a mesma orientação entre dois referenciais, mas em função dos respetivos ângulos de *Euler*, é possível estabelecer uma relação entre as duas matrizes 3×3 e a partir daí, calcular os valores dos ângulos de *Euler* a partir das equações (4.10) e (4.11).

$${}^R T_n = \begin{bmatrix} r_{x,x} & r_{x,y} & r_{x,z} & x \\ r_{y,x} & r_{y,y} & r_{y,z} & y \\ r_{z,x} & r_{z,y} & r_{z,z} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Apenas se representam os ângulos *pitch* e *roll* nesta secção, pois o estudo das inclinações apenas será realizado partindo dos dados obtidos pelos acelerómetros. No entanto, é também possível de obter o ângulo *yaw*, através de relações das matrizes (4.8) e (4.9).

$$pitch = \arctan \left(\frac{-r_{z,x}}{\sqrt{r_{z,y}^2 + r_{z,z}^2}} \right) \quad (4.10)$$

$$roll = \arctan \left(\frac{r_{z,y}}{r_{z,z}} \right) \quad (4.11)$$

Esta metodologia de cálculo dos ângulos de *Euler* será utilizada com os dados obtidos na cinemática. Para o cálculo das orientações a partir dos dados dos acelerómetros, a metodologia a utilizar encontra-se descrita em 2.6.4. O cálculo da orientação através dos destes sensores apresenta-se teoricamente restrito a situações puramente estáticas, onde apenas o vetor da aceleração gravitacional atua sobre os acelerómetros. Na prática o cálculo pode ser realizado com movimentos de acelerações reduzidas, admitindo a presença de um erro que será tanto maior quanto maior for o valor da aceleração. Para os movimentos realizados, as Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 representam os valores da magnitude de aceleração no agachamento, flexão do joelho e movimento lateral, respetivamente, medidos pelo acelerómetro 1, posicionado na zona da anca anca (a azul) e a vermelho os limiares estabelecidos. O limiar da aceleração que foi arbitrariamente estabelecido para distinguir uma situação estática de uma situação de movimento é $9.8 \pm 0.04 m/s^2$. Como se pode observar nas três imagens, as acelerações apresentam magnitudes maioritariamente dentro dos limites do limiar estabelecido.

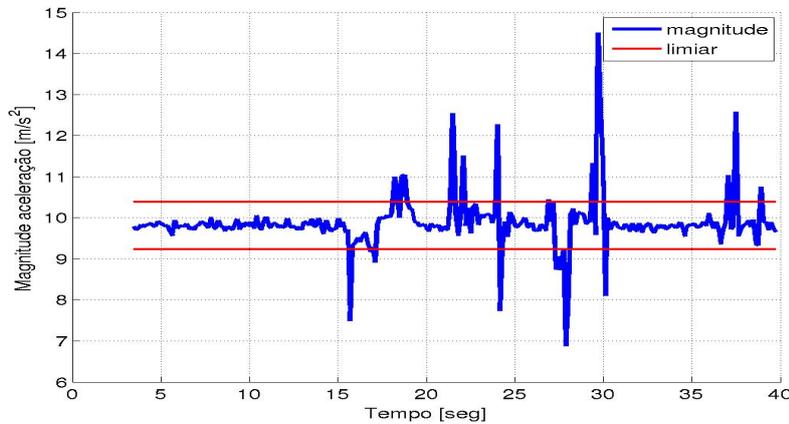


Figura 4.11: Magnitude do acelerómetro 1 durante agachamento.

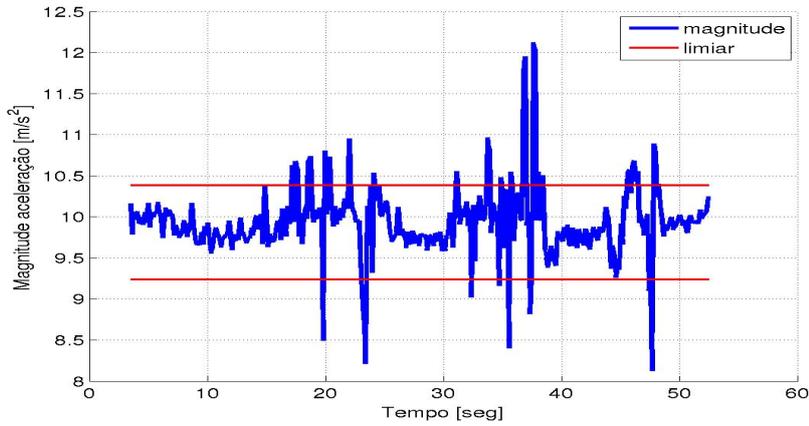


Figura 4.12: Magnitude do acelerómetro 1 durante flexão do joelho.

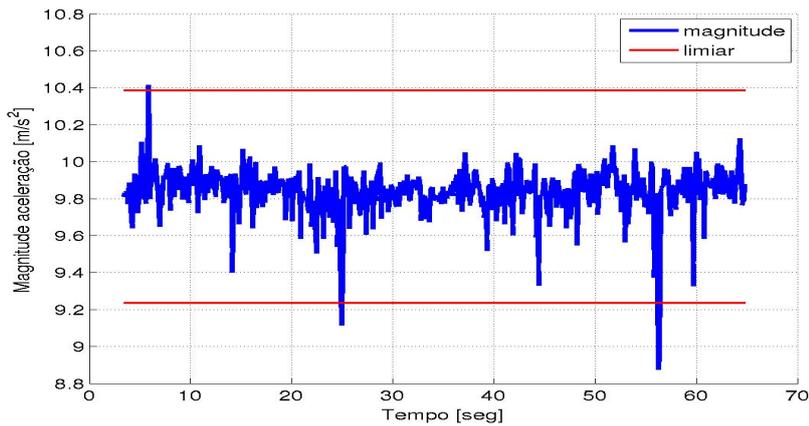


Figura 4.13: Magnitude do acelerómetro 1 durante movimento lateral.

4.3.2 Métodos Numéricos Comparativos

A avaliação numérica será avaliada segundo o cálculo de parâmetros como:

- erro quadrático médio;
- coeficiente de correlação;
- coeficientes de regressão linear.

Erro Quadrático Médio

O erro quadrático médio é uma forma de avaliar a diferença entre uma curva de referência e a respetiva curva de valores reais. Dado um conjunto de n valores reais obtidos, o seu erro quadrático médio é calculado, como se observa na equação (4.12),

pela média do quadrado da diferença entre os valores reais \hat{x}_i e os respectivos valores teóricos x_i .

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n} \quad (4.12)$$

Através deste erro pretende-se estabelecer uma relação numérica entre os vários resultados obtidos, de forma a realizar uma avaliação quantitativa de comparação entre curvas.

Uma vez que a taxa de aquisição das grandezas a comparar (dados dos sensores e dados dos servomotores) são diferentes, em cada experiência as duas grandezas apresentam diferente número de iterações, sendo este um fator que impossibilita a comparação direta entre curvas. Para contornar este problema, procedeu-se à interpolação de uma das curvas, de forma a ser possível obter o seu comportamento na escala temporal da segunda curva. Neste processo, a grandeza a sofrer a interpolação foi a grandeza adquirida pelos servomotores, que é adquirida a uma taxa mais elevada (próximo dos $10Hz$).

Recorrer à interpolação dos valores de uma grandeza vem adicionar incerteza aos resultados. No entanto, como a melhor alternativa, esta é uma escolha necessária face à necessidade de obter relações numéricas entre curvas.

Coefficiente de Correlação

O coeficiente de correlação de duas curvas traduz a sua relação linear e está compreendido entre -1 e 1. Para o valor 1 as curvas são positivamente relacionadas ou iguais, para -1 são negativamente relacionadas, ou seja, apresentam valores simétricos, e para 0 não existe relacionamento entre as curvas.

Este parâmetro permite destacar o grau de semelhança existente entre duas curvas, deixando de parte fatores como a existência de *offsets*, ou fatores de escala constantes.

Regressão Linear

A regressão linear entre duas curvas é o processo a partir do qual se calculam os coeficientes que permitem obter a relação linear entre estas. Por outras palavras, sendo y e x duas curvas aleatórias, a regressão linear obtém os parâmetros A e b que para cada iteração i , permitem calcular y a partir de x como se pode observar na equação (4.13).

$$y_i = Ax_i + b \quad (4.13)$$

Esta metodologia ajuda a quantificar o fator de escala existente entre curvas, bem como o *offset* existente.

4.4 Avaliação dos resultados

De forma a facilitar a consulta dos gráficos e dados apresentados, no apêndice D apresenta-se a imagem da numeração das unidades constituintes da rede inercial, a imagem dos eixos de cada unidade da rede e a imagem onde se pode consultar cada *ID* dos servomotores do robô humanoide. Também é possível encontrar no mesmo apêndice os gráficos referentes aos valores angulares dos servomotores para cada tipo de movimento.

4.4.1 Agachamento

Neste movimento pretende-se avaliar a velocidade angular de todos os servomotores em movimento para ambas as pernas, a aceleração linear na zona da anca obtida através do acelerómetro 1 para as direções cartesianas X e Y, e através do acelerómetro 9 para a direção Z. Na zona da tibia a aceleração será avaliada com os dados do sensor 6 na direção Z. Para a inclinação pretende-se avaliar os ângulos *pitch* e *roll* para a zona da tibia, o *pitch* na zona do fémur, e na anca o *pitch* com os acelerómetros 1 e 9 e o *roll* com o acelerómetro 9. Finalmente será realizada a avaliação dos resultados obtidos com a redundância sensorial para a zona da anca, através da comparação das grandezas velocidade angular e inclinação na zona da anca.

Dos três tipos de movimento, o agachamento é o que apresenta maior continuidade do movimento. Tal ocorre pois nenhuma das posições final ou inicial, se encontra próxima de uma situação de desequilíbrio do robô, permitindo ao utilizador do *joystick* háptico executar os movimentos livremente sem que ocorra o risco do robô entrar em desequilíbrio.

Velocidade Angular

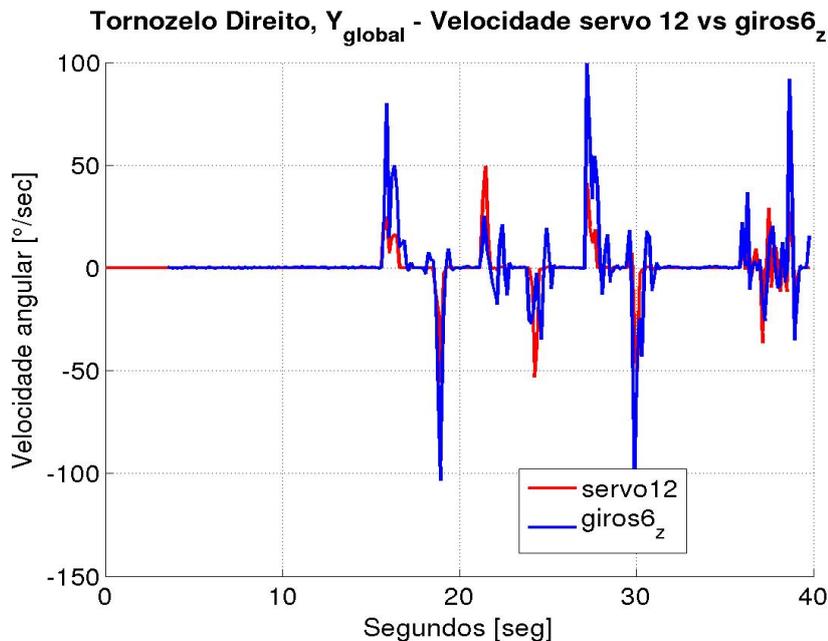


Figura 4.14: Agachamento - tornozelo direito - servomotor 12 e giroscópio de IMU 6.

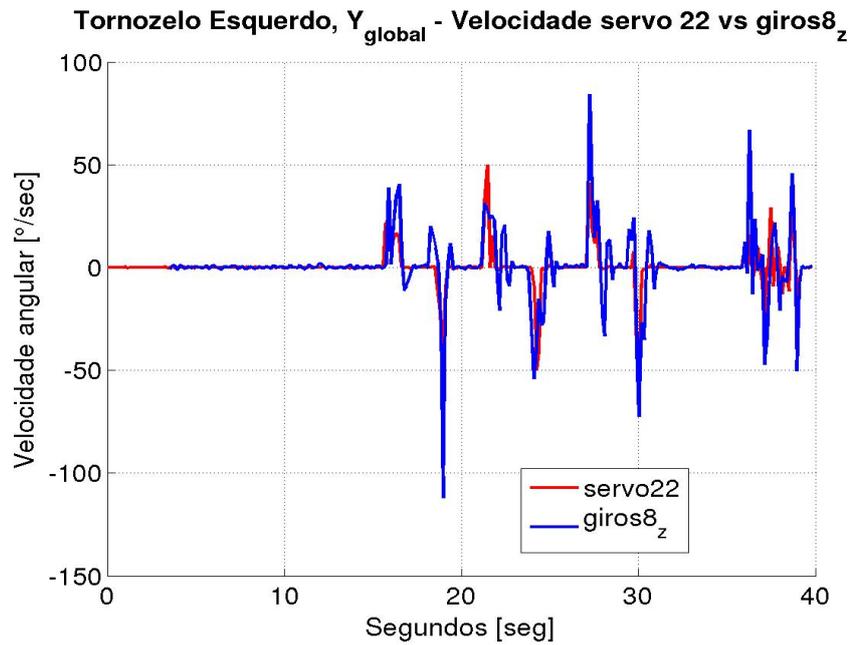


Figura 4.15: Agachamento - tornozelo esquerdo - servomotor 22 e giroscópio de IMU 8.

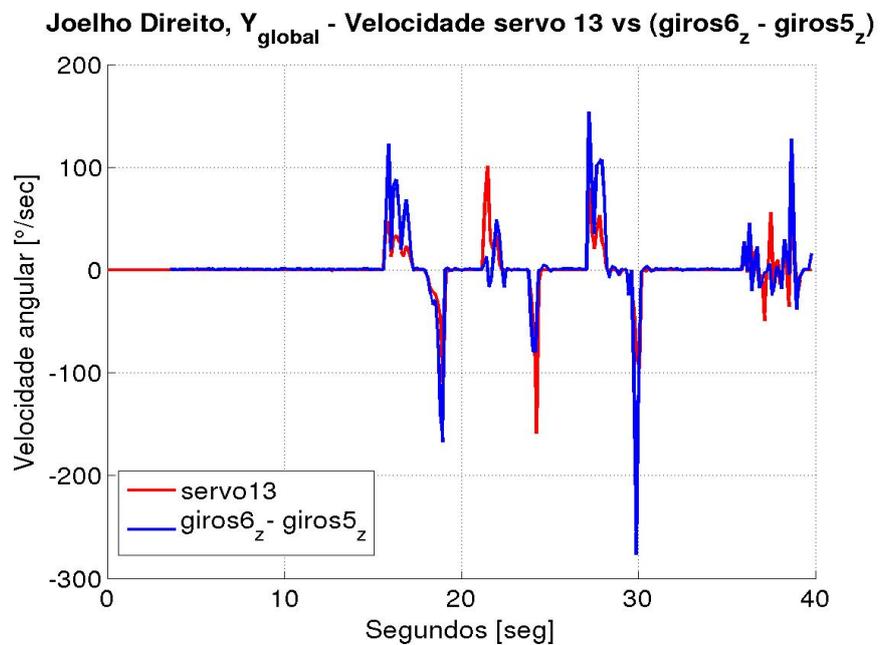


Figura 4.16: Agachamento - joelho direito - servomotor 13 e diferença entre giroscópios de IMUs 6 e 5.

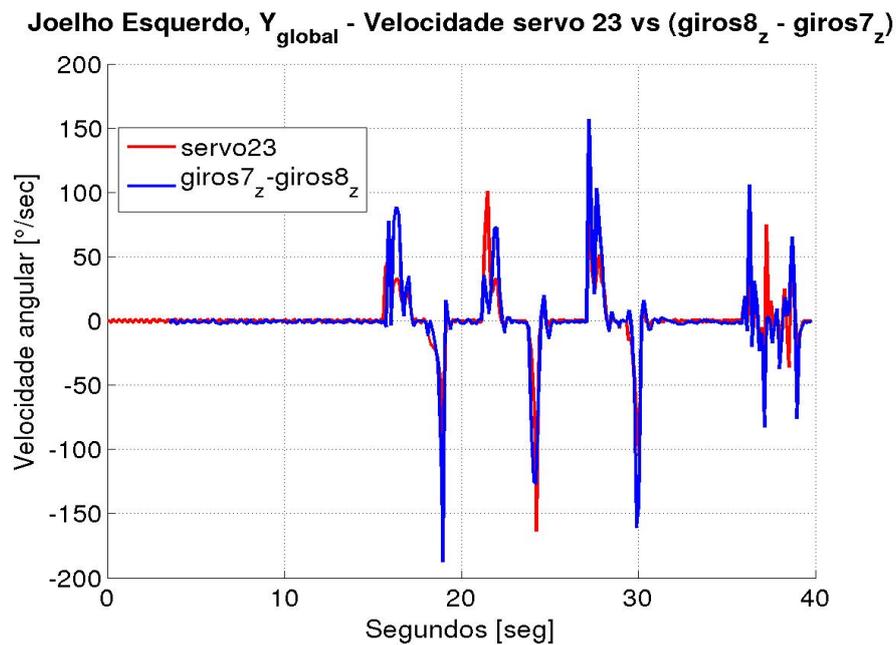


Figura 4.17: Agachamento - joelho esquerdo - servomotor 23 e diferença entre giroscópios de IMUs 8 e 7.

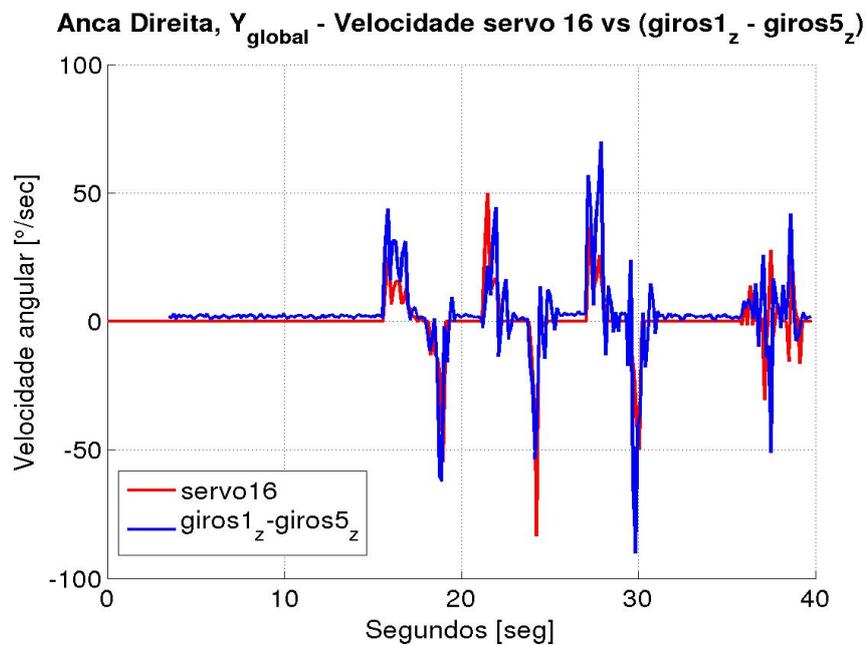


Figura 4.18: Agachamento - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 1.

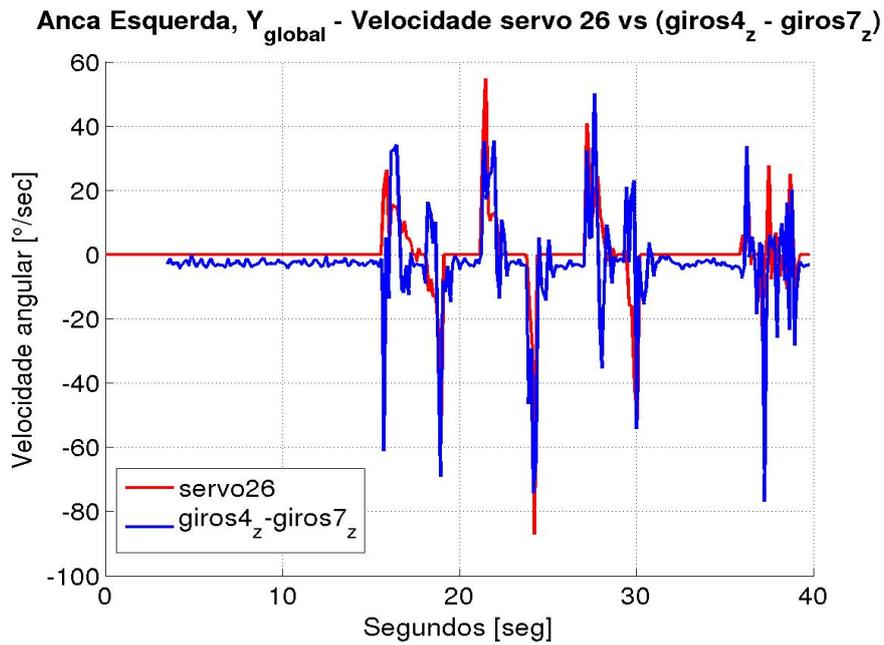


Figura 4.19: Agachamento - anca esquerda - servomotor 26 e diferença entre giroscópios de IMUs 7 e 4.

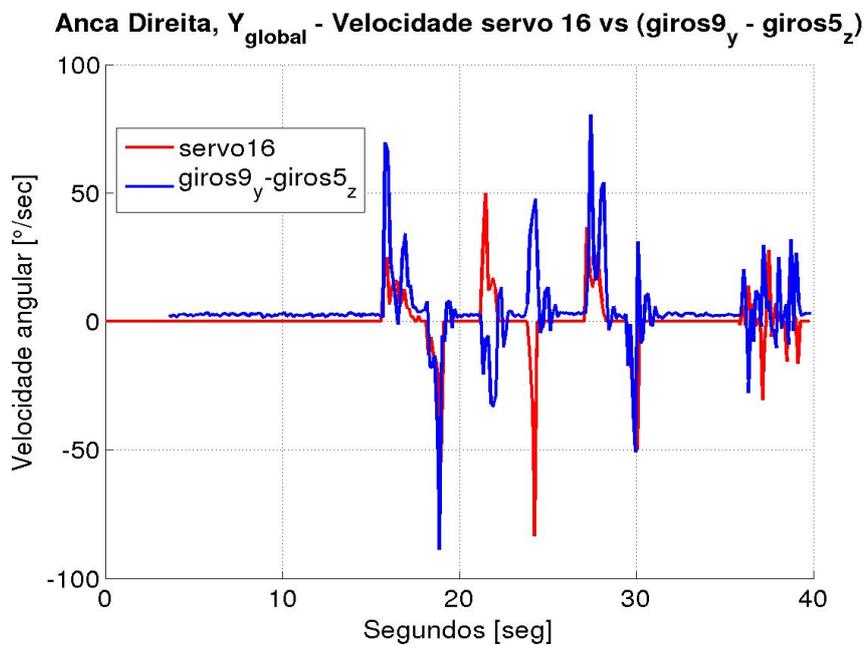


Figura 4.20: Agachamento - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 9.

As Figuras 4.14,4.16, 4.18, 4.20, referentes à perna direita e as Figuras 4.15,4.17, 4.19, referentes à perna esquerda apresentam as curvas da comparação dos valores obtidos nos giroscópios com os valores de velocidade calculados através das posições dos servomotores.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os gráficos das curvas correspondentes aos servomotores localizados nas juntas dos tornozelos de ambas as pernas, comparadas diretamente com os giroscópios das unidades 6 e 8 respetivamente, uma vez que para cada perna, a junta do tornozelo é a primeira da cadeia cinemática. Em cada um dos dois gráficos é possível observar que existe correspondência entre o comportamento das curvas, isto é, quando a curva de um servomotor apresenta alteração da velocidade angular, a curva do correspondente giroscópio varia no mesmo sentido. No entanto, salienta-se a diferença de amplitudes observadas durante a variação de velocidades. Para além disso, é possível observar que no final de cada movimento dos servomotores, os giroscópios apresentam pequenas oscilações de velocidade originadas pelas oscilações do robô devido à sua inércia.

Nos gráficos das Figuras 4.16 e 4.17, que apresentam as curvas dos servomotores dos joelhos comparados com as curvas das diferenças entre os giroscópios adjacentes a cada curva, é possível observar que a técnica de operação em modo diferencial dos giroscópios 5 e 6 para a perna direita, e 7 e 8 para a perna esquerda, diminui a existência de oscilações externas originadas devido à inércia do robô. No comportamento da curva dos giroscópios é ainda possível observar que os valores destes variam no mesmo sentido das curvas dos respetivos servomotores, mas também ainda se observa a existência de diferentes amplitudes entre as curvas para o mesmo movimento.

Os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as curvas obtidas dos servomotores da anca e dos giroscópios 1 e 5 para a perna direita, e 4 e 7 para a perna esquerda. A semelhança entre o comportamento das curvas e a diferença entre as amplitudes das mesmas continua a verificar-se de forma similar aos casos anteriores, no entanto, é também notório que as amplitudes das oscilações no final de cada movimento aumentaram relativamente às oscilações observadas na zona do joelho. Este fato leva a concluir que a zona da anca sofre de perturbações externas à movimentação dos servomotores diferentes das perturbações causadas até à zona do fémur.

A Figura 4.20 apresenta o gráfico no qual se encontram as curvas na zona da anca para a comparação entre o servomotor da anca e a curva obtida pelo operação diferencial dos giroscópios 5 e 9. Uma vez que a unidade inercial 9 se encontra também na zona da anca, mesmo que colocada numa zona que contém outros servomotores, seria de esperar desta unidade aproximadamente os mesmos valores da unidade 1, uma vez que os servomotores da unidade 9 não apresentam variação dos valores angulares. No entanto, os resultados da curva dos giroscópios da Figura 4.20 apresentam valores de amplitudes maiores do que a curva dos giroscópios da Figura 4.18. Para além disso, a curva que incorpora os resultados do giroscópio 9, entre os 20 e 25 segundos apresenta valores bem diferentes comparativamente aos dados da curva que incorpora o giroscópio 1. Isto deve-se ao fato do giroscópio 9 apresentar valores de velocidade angular maiores que o giroscópio 1. A diferença existente na amplitude dos dois giroscópios 1 e 9, leva a concluir a existência de novas oscilações às quais apenas o IMU 9 está sujeito, com origem nas juntas sobrepostas ao mesmo.

A Tabela 4.3 apresenta os valores do EQM, coeficiente de correlação e parâmetros de regressão linear calculados para os gráficos da velocidade angular apresentados anterior-

mente. Segundo a tabela, os dados da zona do joelho apresentam, maior valor de EQM pois nesta zona, os giroscópios apresentam maiores diferenças de amplitude comparativamente aos dados dos servomotores. No entanto, são precisamente as curvas da zona do joelho que apresentam os valores de coeficiente de correlação mais elevados, concluindo assim que os resultados da zona do joelho são os que apresentam maior semelhança no comportamento das curvas. Quanto aos resultados dos giroscópios (1 e 9) da anca, tanto o EQM e o coeficiente de correlação da curva do giroscópio 1 mostram que este sensor apresenta uma curva com melhor comportamento face ao servomotor da anca.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Tornozelo dir. Y 4.14	168.58	0.74	1.42	0.70
Tornozelo esq. Y 4.15	124.04	0.74	1.28	0.08
Joelho dir. Y 4.16	506.19	0.77	1.25	1.15
Joelho esq. Y 4.17	313.05	0.84	1.21	-1.01
Anca dir. Y 4.18	149.77	0.63	0.86	2.19
Anca esq. Y 4.19	176.46	0.49	0.64	-3.11
Anca dir. Y 4.20	294.77	0.14	0.18	3.56

Tabela 4.3: Parâmetros de avaliação para as curvas de velocidade angular no agachamento.

Todos os movimentos realizados envolvem a movimentação das duas pernas, mas como foi possível observar nos gráficos atrás apresentados, a similaridade dos resultados entre pernas observa-se. Posto isto, para os restantes casos, a análise será realizada apenas para a perna direita.

Aceleração Linear

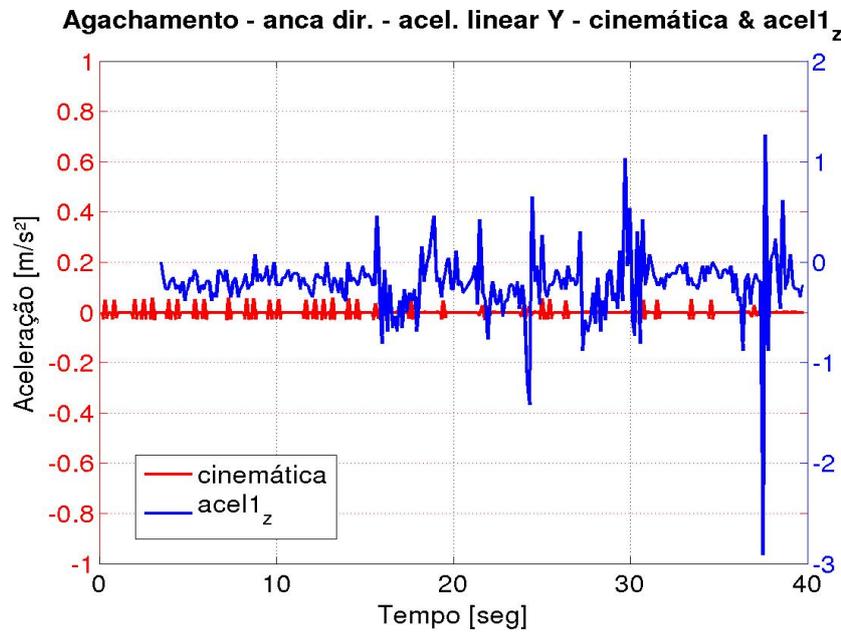


Figura 4.21: Agachamento - anca direita - aceleração em Y.

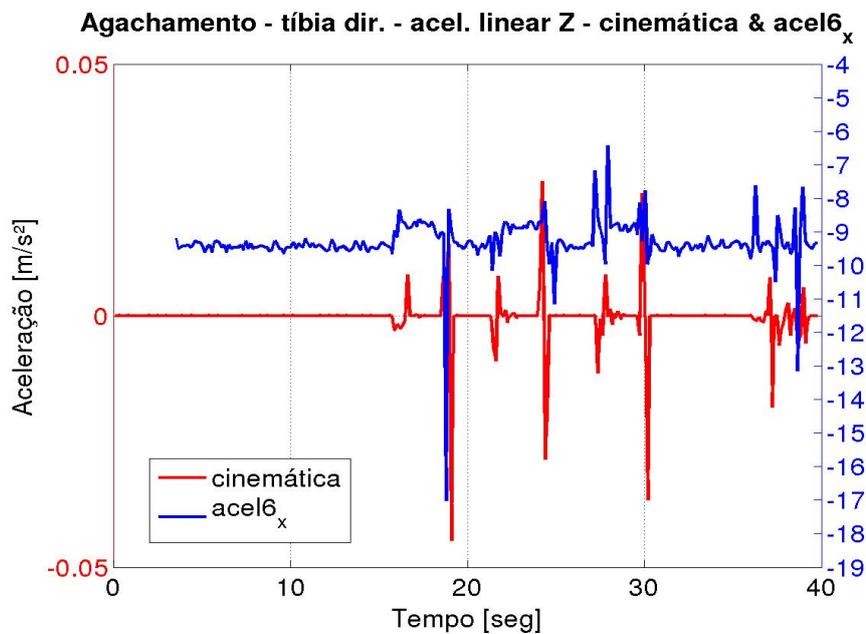


Figura 4.22: Agachamento - tíbia direita - aceleração em Z.

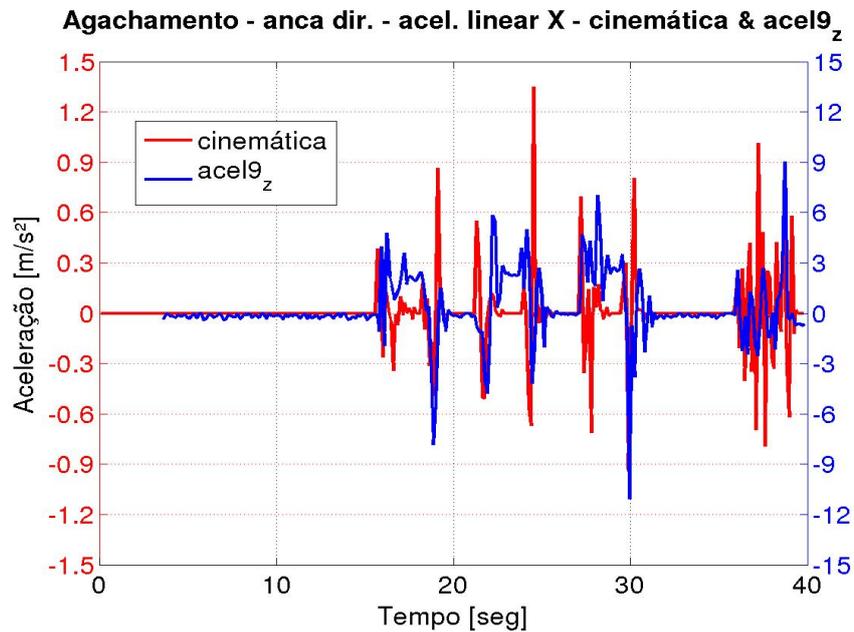


Figura 4.23: Agachamento - anca direita - aceleração em X.

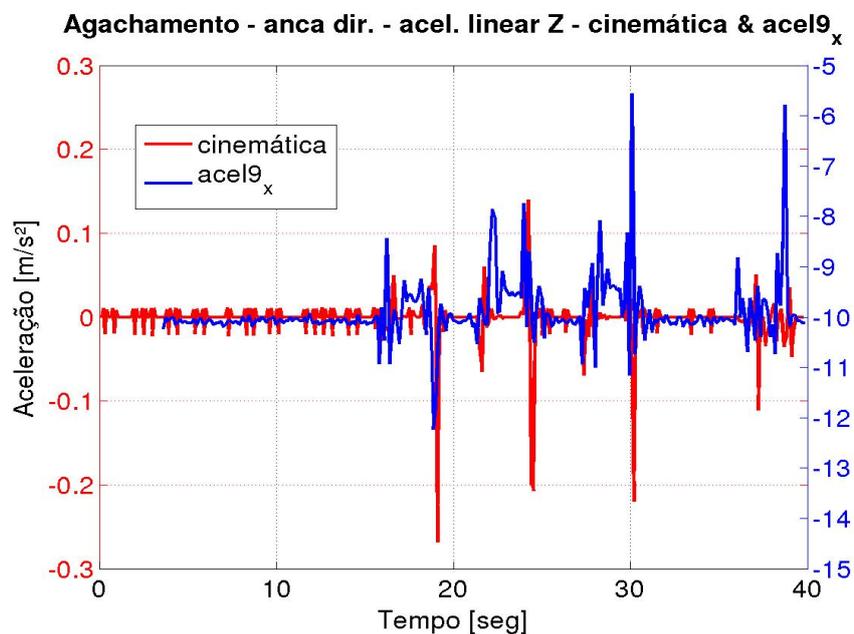


Figura 4.24: Agachamento - anca direita - aceleração em Z.

As Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam as curvas da comparação dos valores obtidos nos acelerómetros com os valores da aceleração linear calculada através da cinemática direta completa para a perna direita, e suas formas simplificadas.

Ao observar as curvas de cinemática de todos os gráficos do parágrafo anterior, é possível constatar que em nenhum dos casos se verificaram amplitudes de aceleração superiores a $1.5m/s^2$, sendo que para cada um destes gráficos, os correspondentes acelerómetros apresentam sempre valores de aceleração mais elevados, chegando mesmo a valores com uma ordem de grandeza superior.

O gráfico da Figura 4.21 apresenta os resultados das curvas obtidas pela cinemática e pelo acelerómetro 1 na direção Y global do robô. Neste tipo de movimento, não se verifica deslocamento segundo este eixo, e como a curva a vermelho indica, apenas se verificam pequenas perturbações, que são originadas por pequenas variações dos servomotores. Para esta situação em particular o acelerómetro 1 da anca apresenta valores próximos de $0m/s^2$ com pequenas flutuações onde um dos "picos" chega à amplitude máxima de $3m/s^2$.

Através dos gráficos das Figuras 4.22 para o eixo Z, 4.23 para o eixo X e 4.24 para o eixo Z, é possível constatar que as curvas referentes à cinemática da perna direita registam momentaneamente movimentos acelerados que coincidem com o início e finalização dos movimentos. Nesses momentos, é possível observar também que os acelerómetros apresentam comportamento idêntico, embora a amplitude dos registos se apresente numa ordem de grandeza superior. Nos instantes em que as curvas da cinemática não apresentam movimentos acelerados, as curvas dos acelerómetros apresentam geralmente valores constantes próximos de $0m/s^2$ ou próximos de $-9.8m/s^2$ consoante a sua inclinação em relação ao vetor da aceleração gravítica.

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores de erro quadrático médio, coeficiente de correlação e os parâmetros da regressão linear para as curvas dos gráficos apresentados para a aceleração linear no movimento de agachamento. Segundo a tabela, os maiores valores registados para o EQM ocorreram para as curvas das Figuras 4.24 e 4.22. Esta ocorrência deve-se à existência do vetor da aceleração gravítica que na ausência de movimento, faz com que os acelerómetros registem valores próximos de $-9.8m/s^2$. O coeficiente de correlação demonstra que para este tipo de movimento, a correspondência de comportamento entre as curvas dos acelerómetros e dos servomotores é praticamente desprezável. Quanto à regressão linear, a melhor combinação de parâmetros é observada para o acelerómetro 9 para a zona da anca segundo a direção X, onde o valor A (coeficiente que traduz o fator de escala) é próximo de 1 e o b (coeficiente quantifica o *offset* médio) próximo de 0. Nos gráficos referentes à direção Z é possível observar que o parâmetro b da regressão linear é próximo de $-9.8m/s^2$, confirmando que estes apresentam valores próximos do valor da aceleração gravítica como *offset* em situações estáticas.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Anca dir. Y 4.21	0.15	0.01	0.25	-0.22
Tornozelo dir. Z 4.22	87.12	-0.02	-2.76	-9.31
Anca dir. X 4.23	3.57	0.14	1.22	0.25
Anca dir. Z 4.24	98.90	0.01	0.19	-9.93

Tabela 4.4: Parâmetros de avaliação para as curvas de aceleração linear no agachamento.

Inclinação

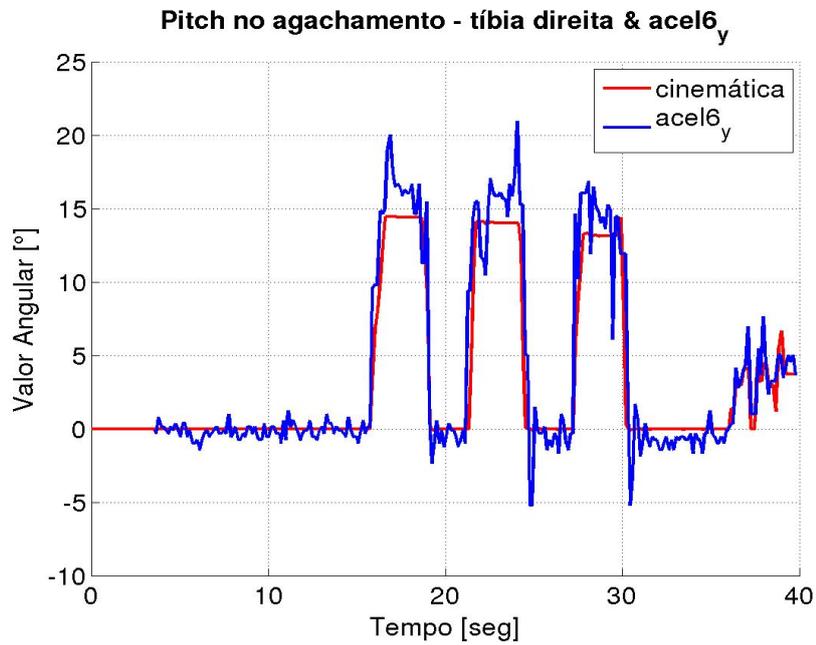


Figura 4.25: Agachamento - tíbia direita - *pitch* obtido através da cinemática e acelerómetro 6.

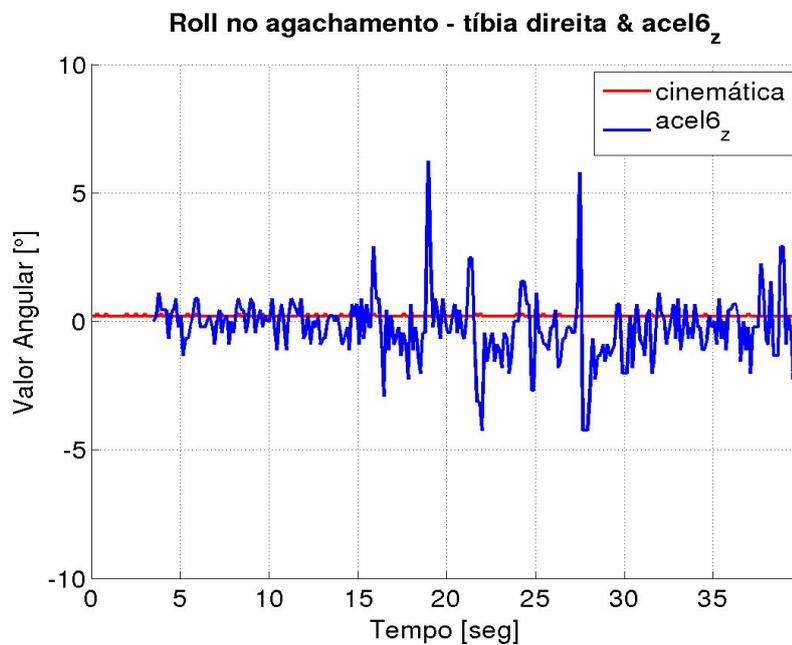


Figura 4.26: Agachamento - tíbia direita - *roll* obtido através da cinemática e acelerómetro 6.

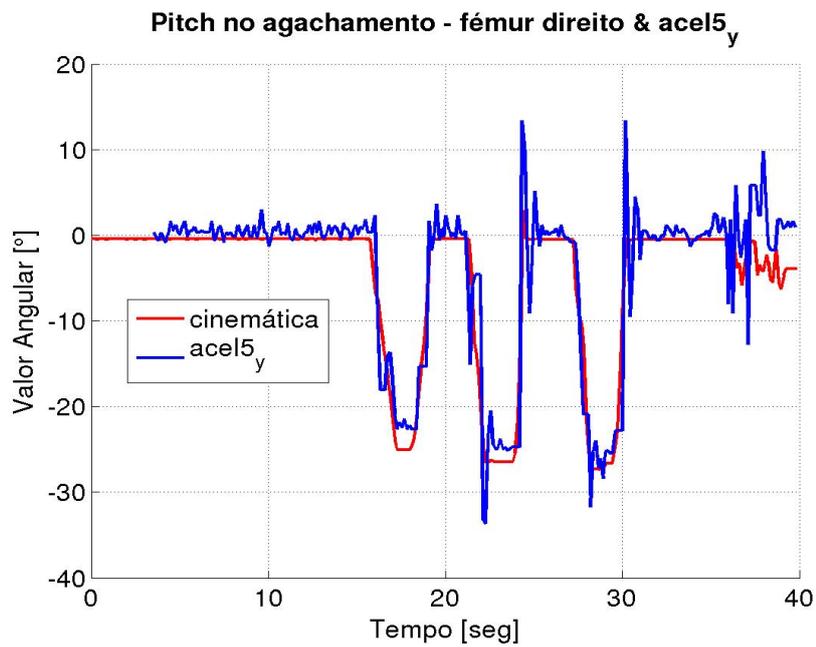


Figura 4.27: Agachamento - fémur direito - *pitch* obtido através da cinemática e acelerómetro 5.

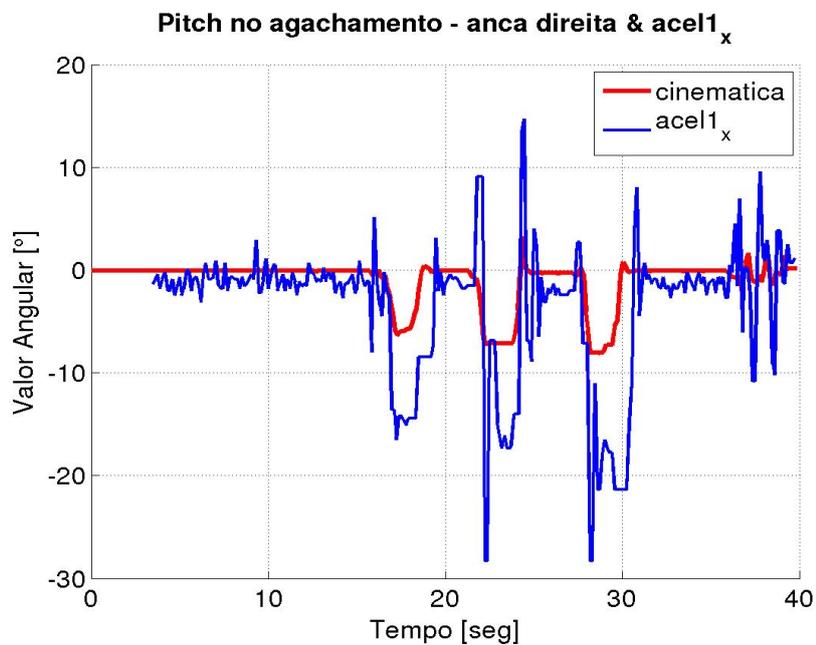


Figura 4.28: Agachamento - anca direita - *pitch* obtido através da cinemática e acelerómetro 1.

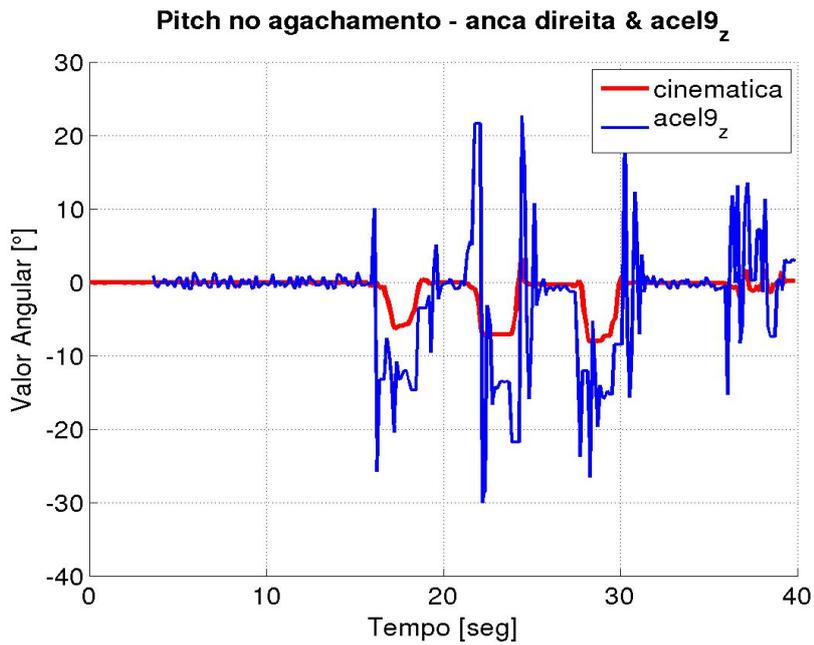


Figura 4.29: Agachamento - anca direita - *pitch* obtido através da cinemática e acelerómetro 9.

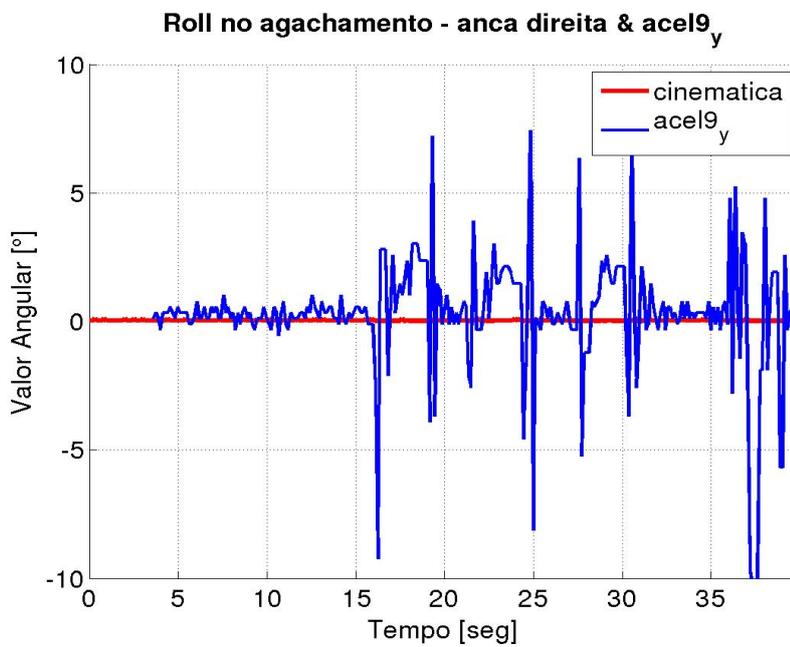


Figura 4.30: Agachamento - anca direita - *roll* obtido através da cinemática e acelerómetro 9.

As Figuras 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam as curvas da inclinação nas principais zonas da perna direita, comparando os resultados obtidos através da cinemática da perna com os resultados obtidos através dos dados dos acelerômetros correspondentes.

Os gráficos das Figuras 4.25, e 4.27 correspondentes aos valores de *pitch* para a tíbia e para o fêmur no referencial global do robô, mostram que as curvas obtidas através dos acelerômetros apresentam um comportamento idêntico ao das curvas obtidas pela cinemática, sendo que em ambos os casos, as curvas dos acelerômetros apresentam "picos" de valores resultantes das oscilações devido à inércia do robô durante a sua movimentação.

Os gráficos das Figuras 4.28 e 4.29 também correspondentes à inclinação *pitch*, apresentam os resultados obtidos pela cinemática e pelos acelerômetros dos sensores 1 e 9, respetivamente, para a zona da anca. Em ambos os gráficos é possível observar que os dados dos acelerômetros apresentam valores de inclinação no mesmo sentido que os dados da cinemática, no entanto apresentam inclinações mais acentuadas. Estes resultados devem-se ao fato de a cinemática apenas contemplar os dados angulares dos servomotores. Na execução dos movimentos, o robô humanóide em algumas configurações, sofre uma deslocação do seu centro de massa, que pode provocar uma rotação na base dos seus pés. Para além disso, as curvas dos acelerômetros para a zona da anca apresentam oscilações mais elevadas que as curvas dos gráficos anteriores, pois estes encontram-se na extremidade do robô, local onde as oscilações externas se fazem sentir com maior vigor.

Quanto ao ângulo *roll*, nos gráficos das Figuras 4.26 e 4.30 é possível observar os resultados obtidos para as zonas da tíbia e anca, respetivamente. Em ambos os gráficos, constata-se que os valores dos acelerômetros se encontram próximos de 0° , assim como as curvas da cinemática. No entanto, as curvas de ambos os acelerômetros apresentam "picos" de inclinação originados pelas oscilações sentidas pelo robô na execução dos movimentos, sendo que as oscilações se fazem sentir mais na zona da anca.

Na Tabela 4.5 é possível consultar os valores do erro quadrático médio, do coeficiente de correlação e dos parâmetros A e b da regressão linear, obtidos para os valores das inclinações no agachamento. A partir da tabela é possível observar que as curvas com maior erro quadrático médio são as curvas do *pitch* para a zona da anca, obtidas com medições dos acelerômetros 9 e 1, e para a inclinação *roll*, o mesmo parâmetro cujo valor é mais elevado corresponde à medição realizada pelo acelerómetro 9, também na anca. Com o comportamento mais aproximado às curvas calculadas através da cinemática, as curvas com maior coeficiente de correlação são as curvas correspondentes às medições de *pitch* na tíbia e no fêmur, sendo que ambas apresentam também o parâmetro A muito próximo de 1 e entre as duas curvas apenas a do fêmur apresenta um pequeno *offset* médio de 1° aproximadamente.

Redundância Sensorial

A avaliação da redundância é apenas realizada para este movimento. Neste estudo foi realizada a média das leituras dos sensores diretamente fixos na anca, ou seja, unidades 1,2,3 e 4, e de seguida, os resultados da média são comparados com os resultados obtidos pela leitura de apenas um sensor. Para esta avaliação apenas se teve em conta as grandezas que teoricamente são iguais para os quatro sensores contabilizados na média, isto é, a velocidade angular e inclinação, sendo posta de parte a aceleração linear por

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Tornozelo dir. <i>pitch</i> 4.25	4.64	0.95	1.13	-0.07
Tornozelo dir. <i>roll</i> 4.26	1.74	0.02	0.78	-0.44
Fêmur dir. <i>pitch</i> 4.27	14.82	0.93	0.99	1.02
Anca dir. <i>pitch</i> 4.28	36.37	0.75	2.20	-1.28
Anca dir. <i>pitch</i> 4.29	46.51	0.64	2.14	-0.15
Anca dir. <i>roll</i> 4.30	6.63	-0.06	-4.24	1.43

Tabela 4.5: Parâmetros de avaliação para as curvas de inclinação no agachamento.

esta ser uma grandeza que varia com a distância do acelerómetro à origem do referencial da base do pé.

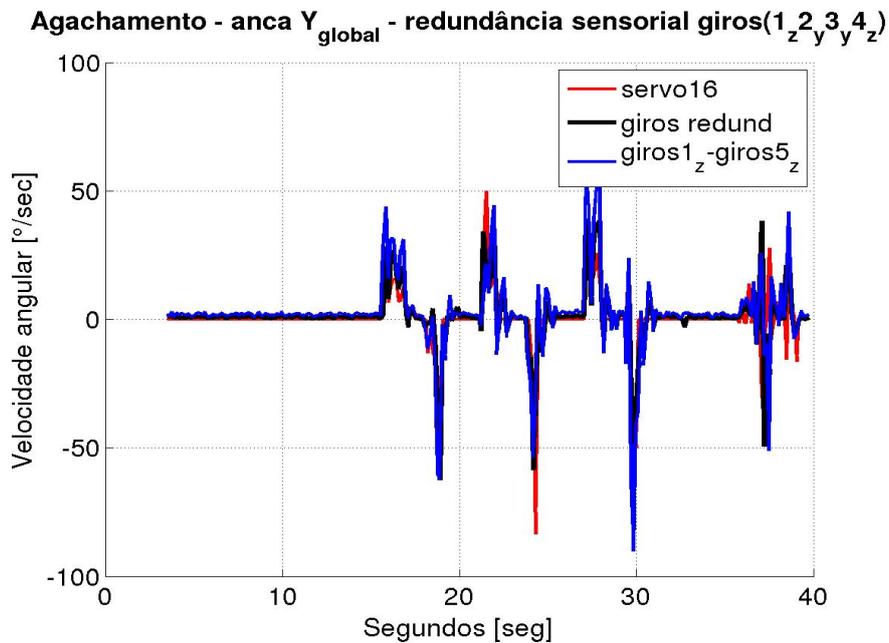


Figura 4.31: Agachamento - Redundância sensorial para a anca - velocidade angular - giroscópios 1 a 4.

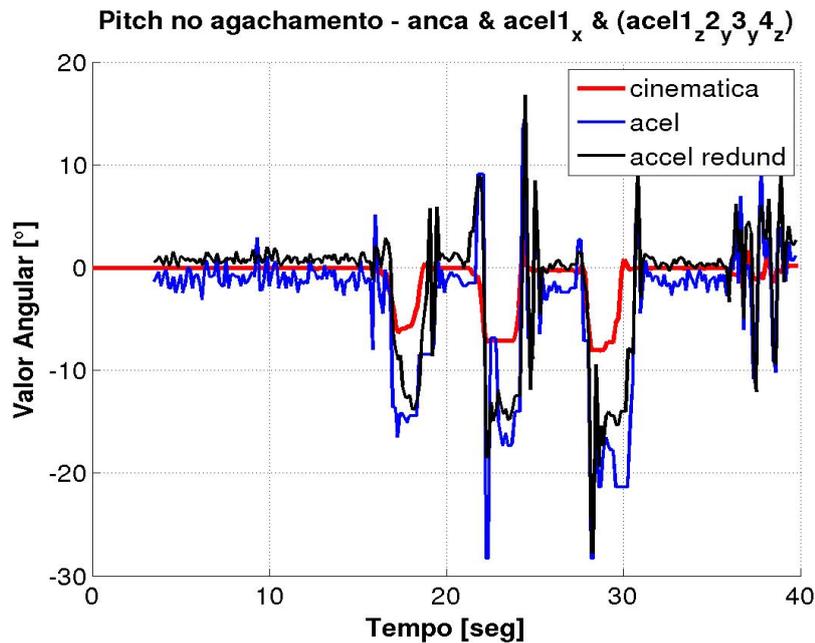


Figura 4.32: Agachamento - Redundância sensorial para a anca - *pitch* - acelerômetros 1 a 4.

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam os resultados da comparação entre a cinemática, os resultados obtidos apenas com um dos sensores da anca e os dados obtidos com a média de todos os sensores da anca para a aceleração angular e para a inclinação *pitch*, respectivamente.

O gráfico da Figura 4.31 mostra que as curvas da redundância e as curvas de um sensor apenas, de forma geral, apresentam um comportamento idêntico. A maior diferença entre as duas metodologias reside essencialmente no fato de que a curva obtida pela redundância apresenta valores de amplitude um pouco mais próximos da curva dos servomotores.

O gráfico da Figura 4.32 mostra que a redundância comparada com a utilização de um só sensor da anca mudou o valor de *offset*, e também melhorou um pouco os dados obtidos quando comparados com os dados calculados pela cinemática.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados do erro quadrático médio, coeficiente de correlação e parâmetro da regressão linear para as curvas obtidas através da redundância sensorial e também para as curvas obtidas para um sensor apenas. Na tabela é possível observar que em ambos os casos de velocidade angular e de inclinação existem melhorias no valor do EQM, sendo a melhoria mais acentuada para a curva de inclinação. Também os valores do coeficiente de correlação sofreram uma ligeira melhoria para ambos os casos. No que diz respeito aos parâmetros da regressão linear, o parâmetro *A*, ou fator de escala sofreu alterações muito pequenas em ambos os casos, mas a alteração do parâmetro *b* foi mais notória, sendo que em ambos os casos se verificou a diminuição dos *offsets*.

Com os dados obtidos da redundância sensorial é possível concluir que esta metodologia, ao tirar partido de vários sensores, consegue diminuir eventuais *offsets* que possam

existir, bem como estabilizar o resultado final, ao diminuir também "picos" de valores obtidos por uma curva que não correspondam á realidade.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Redundância Sensorial				
Anca dir. Y 4.31	84.63	0.67	0.75	0.84
Anca dir. <i>pitch</i> 4.32	21.27	0.82	2.18	0.73
Apenas Um Sensor				
Anca dir. Y 4.18	149.77	0.63	0.86	2.19
Anca dir. <i>pitch</i> 4.28	36.37	0.75	2.20	-1.28

Tabela 4.6: Parâmetros de avaliação para análise de redundância sensorial.

4.4.2 Flexão do Joelho

O movimento da flexão do joelho foi realizado de uma forma menos suave que o movimento anteriormente avaliado, pois a posição final deste deixa o corpo do robô na situação limite de estabilidade, correndo o risco deste entrar em desequilíbrio.

Para este movimento, pretende-se avaliar a velocidade angular na junta do joelho, e na junta da anca recorrendo à combinação dos giroscópios 5 com 1 e 5 com 9, a aceleração linear na anca segundo o eixo Y no acelerómetro 1 e segundo o eixo Z nos acelerómetros 1 e 9. Finalmente pretende-se também avaliar a inclinação calculada a partir dos dados obtidos pelos acelerómetro 5, sendo que os acelerómetros 1 e 9 para a zona da anca não serão apresentados pois não foi possível concluir sobre os resultados apresentados nesta zona.

Velocidade Angular

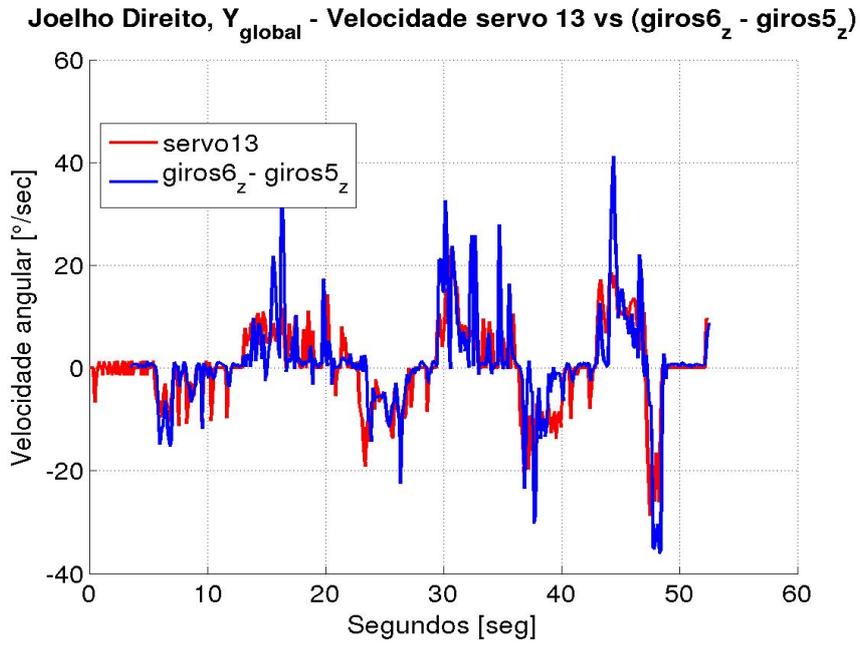


Figura 4.33: Flexão do joelho - joelho direito - servomotor 13 e diferença entre giroscópios de IMUs 6 e 5.

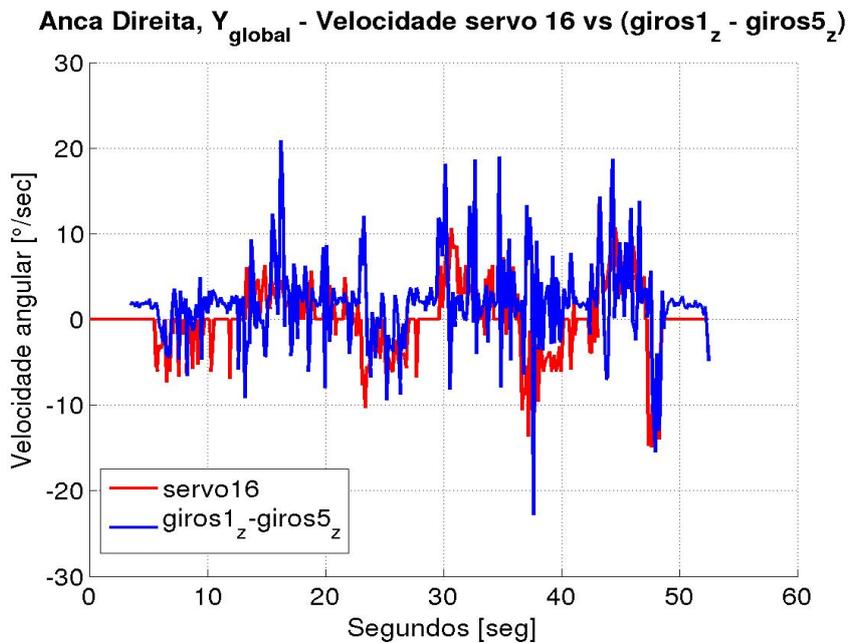


Figura 4.34: Flexão do joelho - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 1.

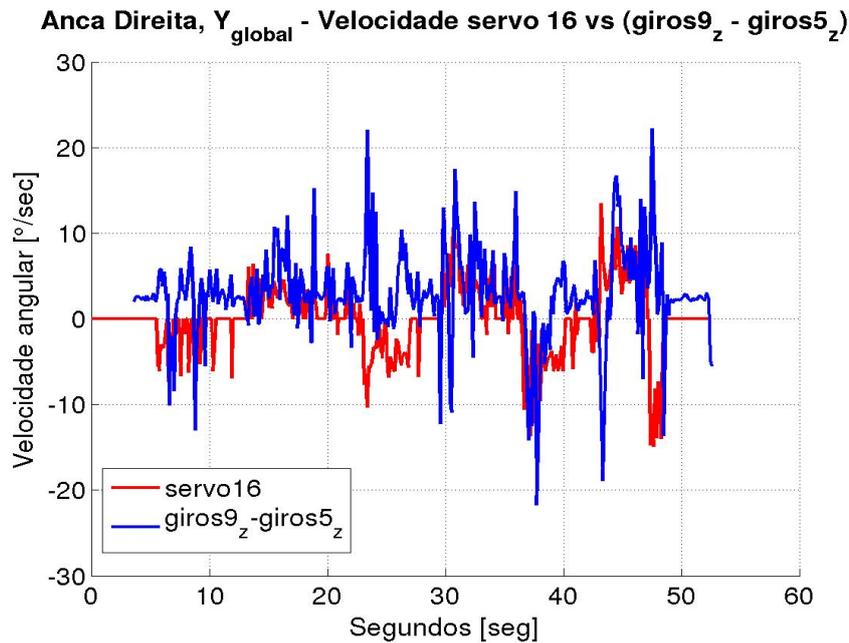


Figura 4.35: Flexão do joelho - anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 5 e 9.

Os gráficos das Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam comparações das curvas da velocidade dos servomotores com as velocidades angulares detetadas pelos giroscópios.

Nos gráficos das três figuras é possível observar que as velocidades dos servomotores não apresentam curvas contínuas devido à realização da experiência de uma forma interrompida.

As curvas obtidas pelos giroscópios apresentam geralmente variações com o mesmo sentido das variações dos servomotores, apresentando maiores amplitudes. Para além disso, uma vez que a execução do movimento não é contínua, evidenciam-se falhas do comportamento das curvas dos giroscópios face às curvas dos servomotores.

Dos três gráficos apresentados, o gráfico da Figura 4.33 é o que contém a curva do giroscópio com comportamento mais próximo ao da respetiva curva de servomotor, enquanto que os restantes gráficos apresentam curvas de giroscópios com variações que se afastam mais do comportamento dos respetivos servomotores.

O gráfico da Figura 4.35 demonstra uma vez mais a existência de valores do giroscópio 9 com valores contrários aos valores obtidos pela cinemática, nomeadamente entre os 20 e os 30 segundos da experiência deste movimento. Mais uma vez, este fenómeno acontece porque os valores detetados pelo giroscópio 9 apresenta um valor de amplitude mais elevado que o valor do giroscópio 1, e na diferença entre os giroscópios 9 e 5 os resultados surgem com valores contrários aos valores obtidos pelos servomotores.

Na Tabela 4.7, apresentam-se os resultados do erro quadrático médio, do coeficiente de correlação e dos parâmetros A e b da regressão linear para os gráficos apresentados da velocidade angular no movimento de flexão do joelho. Nesta tabela é possível observar que

a curva com menor EQM é a curva do giroscópio 1, no entanto, esta apresenta um valor do coeficiente de correlação mais baixo comparativamente à curva dos giroscópios do joelho direito. Este fato indica que apesar da curva dos giroscópios do joelho apresentar maior diferença em relação à curva do servomotor do joelho, apresenta maior correspondência no comportamento. Para além disso, a curva dos giroscópios do joelho, no que diz respeito aos parâmetros da regressão linear apresenta o menor valor de b e o valor de A mais próximo de 1 de entre as curvas dos três gráficos para este caso em particular.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Joelho dir. Y 4.33	42.06	0.74	0.87	0.65
Anca dir. Y 4.34	28.94	0.38	0.44	1.69
Anca dir. Y 4.35	44.24	0.20	0.25	2.78

Tabela 4.7: Parâmetros de avaliação para as curvas de velocidade angular na flexão do joelho.

Aceleração Linear

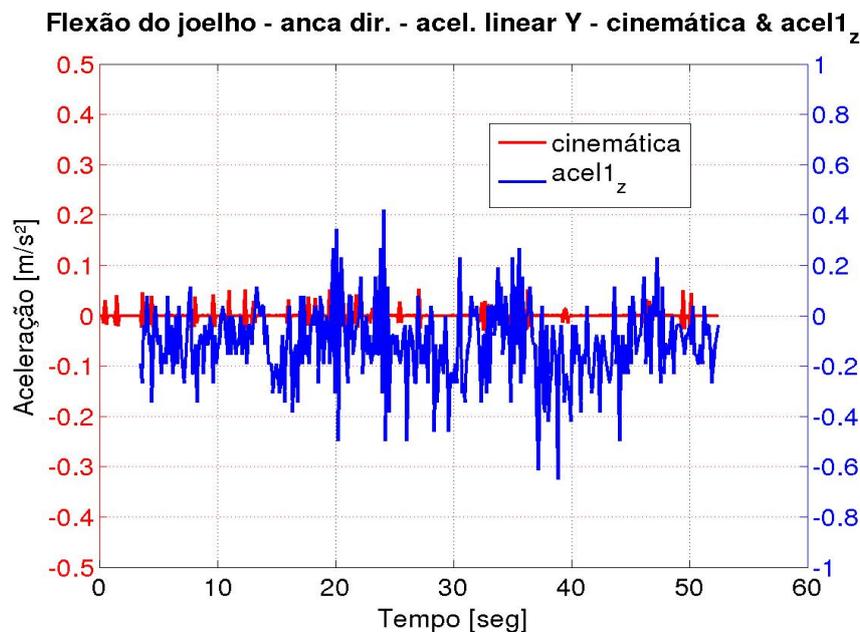


Figura 4.36: Flexão do joelho - anca direita - aceleração em Y.

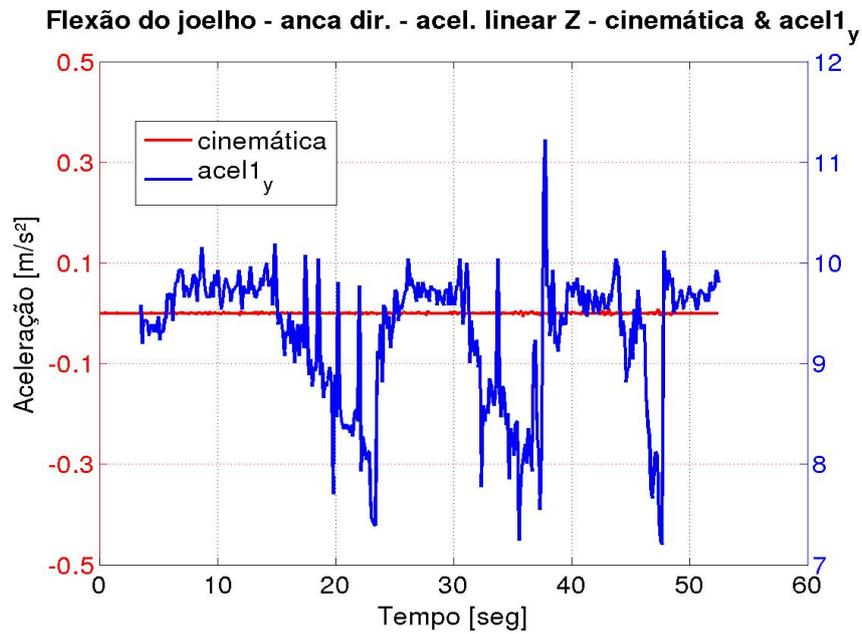


Figura 4.37: Flexão do joelho - anca direita - aceleração em Z.

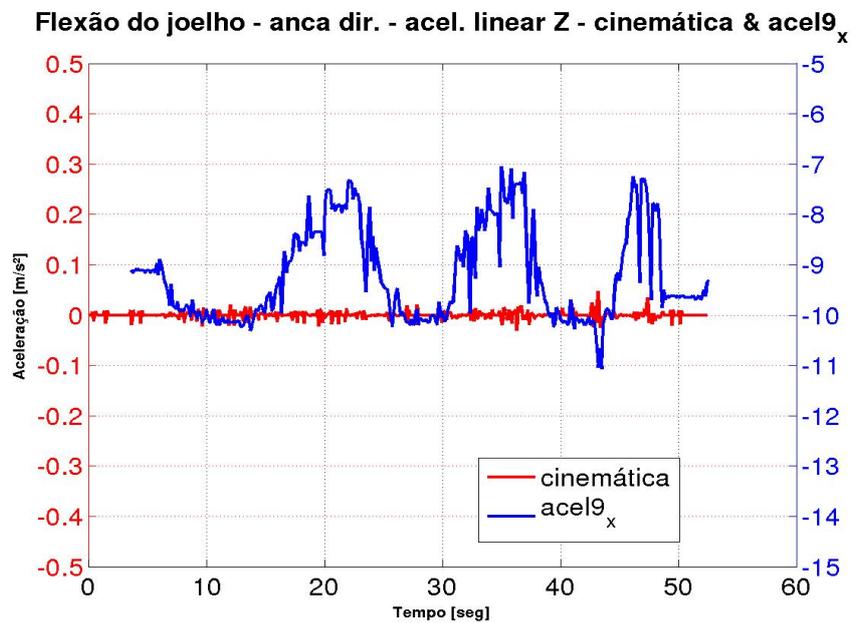


Figura 4.38: Flexão do joelho - anca direita - aceleração em Z.

As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 apresentam os gráficos da aceleração linear na zona da anca da perna direita do robô. Nestes gráficos, encontram-se as curvas calculadas a partir da cinemática e as curvas obtidas dos acelerômetros correspondentes.

No gráfico da Figura 4.36 a curva representante da cinemática para o eixo Y global apresenta uma situação praticamente estática, na qual é possível observar apenas pequenas perturbações inferiores a $0.5m/s^2$. Comparativamente a esta, a curva do correspondente acelerómetro, para o mesmo eixo, apresenta oscilações em torno de um valor muito próximo dos $0m/s^2$, com oscilações de maior amplitude e pequenos "picos" próximos dos $0.6m/s^2$. No entanto, esta curva do acelerómetro pode ser considerada representativa de uma situação estática para este eixo, dadas as amplitudes registadas.

As Figuras 4.37 e 4.38 contêm os gráficos referentes às acelerações registadas pelos dois processos (cinemática e acelerómetros) para o eixo Z global do robô. Uma vez mais, as curvas da cinemática para este tipo de movimento apresentam-se com valores baixos e sempre inferiores a $0.05m/s^2$, podendo-se considerar uma situação estática. Em ambas as figuras, as curvas dos acelerómetros 1 e 9 apresentam variações dos seus valores com o mesmo comportamento da movimentação dos servomotores. Inicialmente, cada um dos acelerómetros apresenta valores próximos de $9.8m/s^2$ e $-9.8m/s^2$ e com o decorrer da experiência, os seus valores variam entre $\pm 9.8m/s^2$ e $\pm 7m/s^2$ consoante o gráfico, o que indica que neste movimento as acelerações observadas nestas duas curvas, são referentes ao vetor da aceleração gravítica que se faz sentir nestes.

Na Tabela 4.8 encontram-se os resultados do EQM, do coeficiente de correlação e dos parâmetros da regressão linear obtidos para as curvas dos gráficos da aceleração linear para o movimento da flexão do joelho. Através dos valores do coeficiente de correlação, e do parâmetro A da regressão linear das três comparações de curvas, que nenhuma das curvas dos acelerómetros se enquadram nas correspondentes curvas obtidas pela cinemática. O valor do EQM e do parâmetro b apresentam a existência de um valor de *offset* igual ao valor do vetor da aceleração gravítica.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Anca dir. Y 4.36	0.04	-0.002	-0.02	-0.12
Anca dir. Z 4.37	86.87	-0.04	-15.76	9.30
Anca dir. Z 4.38	85.88	-0.024	-2.58	-9.22

Tabela 4.8: Parâmetros de avaliação para as curvas de aceleração linear na flexão do joelho.

Inclinação

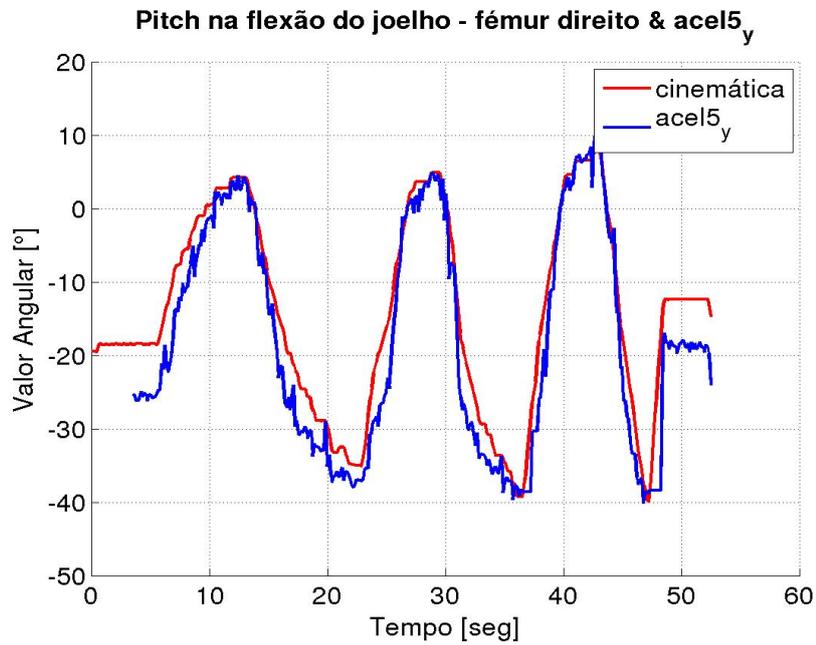


Figura 4.39: Flexão do joelho - fémur direito - *pitch* obtido através da cinemática e acelerómetro 5.

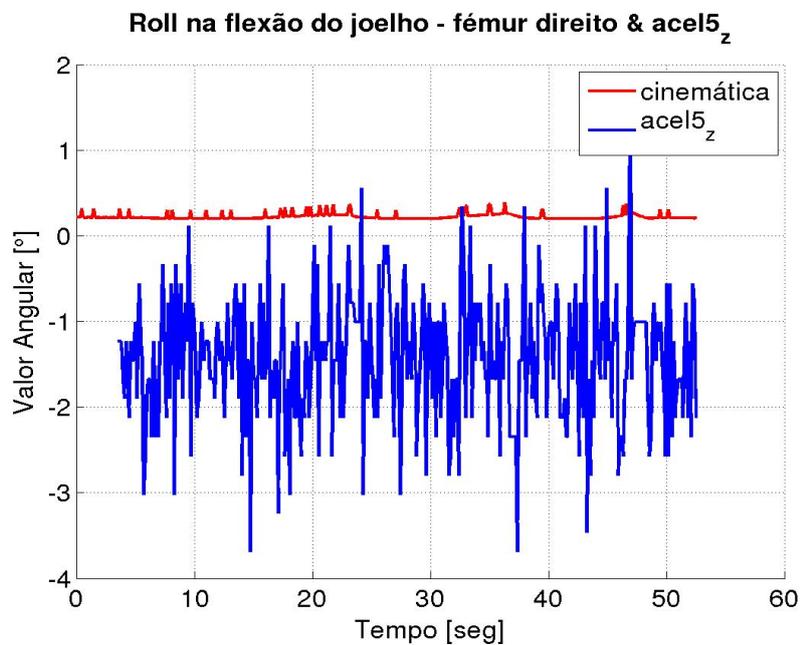


Figura 4.40: Flexão do joelho - fémur direito - *roll* obtido através da cinemática e acelerómetro 5.

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam os gráficos correspondentes às inclinações *pitch* e *roll* para zona do fêmur direito do robô, calculadas através da cinemática e dos dados do acelerômetro 5. Apenas se apresentam os resultados para a inclinação desta zona, uma vez que noutra zona de interesse, nomeadamente a anca, os dados foram inconclusivos.

O gráfico da Figura 4.39 apresenta a variação do ângulo *pitch*, na zona do fêmur. Neste, é possível observar que a curva da cinemática apresenta inclinações consideráveis. A curva do acelerômetro correspondente apresenta também o mesmo tipo de movimento. É possível observar que no início e no final desta experiência, a curva do acelerômetro apresenta um *offset* próximo de 5° , no entanto, durante a execução do movimento as duas curvas apresentam aproximadamente os mesmos valores, como se o *offset* deixasse de existir. Este fato é possível de explicar através de uma rotação externa ao movimento, gerada pelo deslocamento do centro de pressão na base do pé do robô, fazendo com que o peso do seu corpo se concentre numa das pontas do seu pé, o que provoca uma ligeira rotação em toda a perna e que a cinemática não consegue contemplar.

O gráfico presente na Figura 4.40 apresenta os resultados para a inclinação *roll*, na zona do fêmur. Neste tipo de movimento de flexão do joelho, o movimento principal apenas faz variar o ângulo *pitch*, pelo que a curvas da cinemática e do acelerômetro deverão permanecer próximas de 0° . De fato, é possível observar, que ambas as curvas apresentam valores próximos do mesmo valor, embora a curva obtida pelos dados do acelerômetro apresente um *offset* de -1.5° , aproximadamente, e oscilações em que a amplitude máxima é próxima de 3° .

A Tabela 4.9 contém os valores do EQM, do coeficiente de correlação e dos parâmetros da regressão linear para os gráficos da aceleração linear do robô humanóide apresentados para o movimento de flexão do joelho. A partir da tabela, destaca-se o valor do coeficiente de correlação da curva do *pitch* da zona do fêmur, próximo do valor 1, assim como o parâmetro *A* da regressão linear também próximo de 1, indicando o elevado nível de correspondência tanto ao nível de comportamento como de fator de escala, embora o parâmetro *b* evidencie um *offset* médio próximo de -3° . Para o ângulo *roll*, o valor de EQM é relativamente baixo, quando comparado com o valor da curva do ângulo *pitch*, contudo, seu coeficiente de correlação e o parâmetro *A* apontam para a fraca correspondência entre as curvas da cinemática e do acelerômetro. O parâmetro *b* confirma o já referido *offset* próximo de -1.5° .

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Fêmur dir. <i>pitch</i> 4.39	26.16	0.98	1.07	-2.89
Fêmur dir. <i>roll</i> 4.40	3.34	-0.01	-0.18	-1.41

Tabela 4.9: Parâmetros de avaliação para as curvas de inclinação na flexão do joelho.

4.4.3 Movimento Lateral

Este movimento foi também realizado com movimentos descontínuos, isto é, a execução de cada movimento foi realizada com várias paragens, o que atribui às curvas dos servomotores várias oscilações.

Nas velocidades angulares segundo o eixo principal do movimento, eixo X global, através da comparação das juntas do tornozelo e da anca segundo o mesmo eixo, com os respectivos eixos dos giroscópios correspondentes. Para a avaliação das acelerações lineares serão apresentadas as comparações dos resultados da cinemática e do acelerómetro 6 para zona da tíbia, e dos acelerómetros 1 e 9 para a zona da anca, sempre segundo o eixo Y global, acrescido de uma comparação na zona da anca com o sensor 9 para o eixo global Z. Para a avaliação da inclinação serão apresentadas as curvas do ângulo *roll* para a zona da anca, obtidas através da cinemática e dos acelerómetros 1 e 9. O gráficos da inclinação *pitch* não são apresentados por conterem resultados não conclusivos.

Velocidade Angular

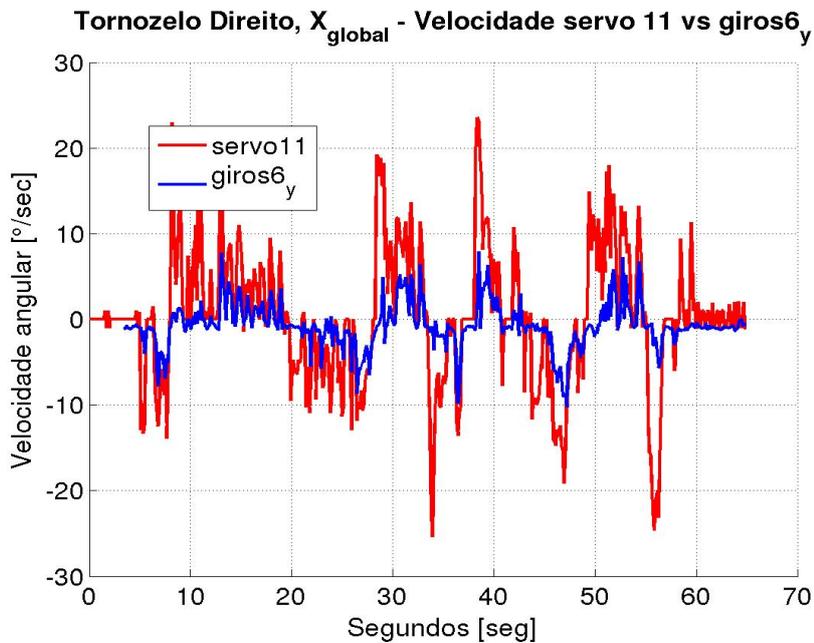


Figura 4.41: Tornozelo direito - servomotor 11 e giroscópio de IMU 6.

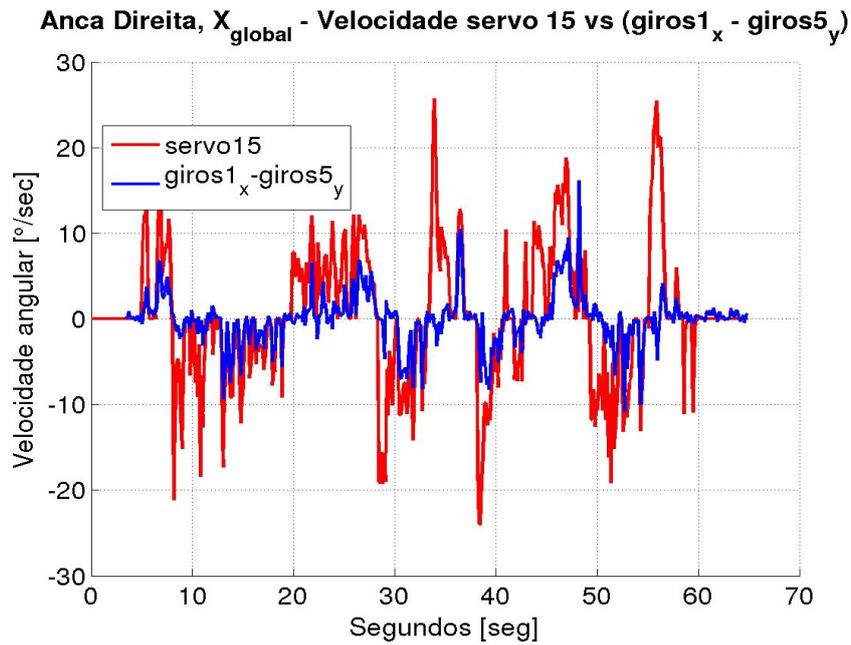


Figura 4.42: Anca direita - servomotor 15 e diferença entre giroscópios de IMUs 1 e 5.

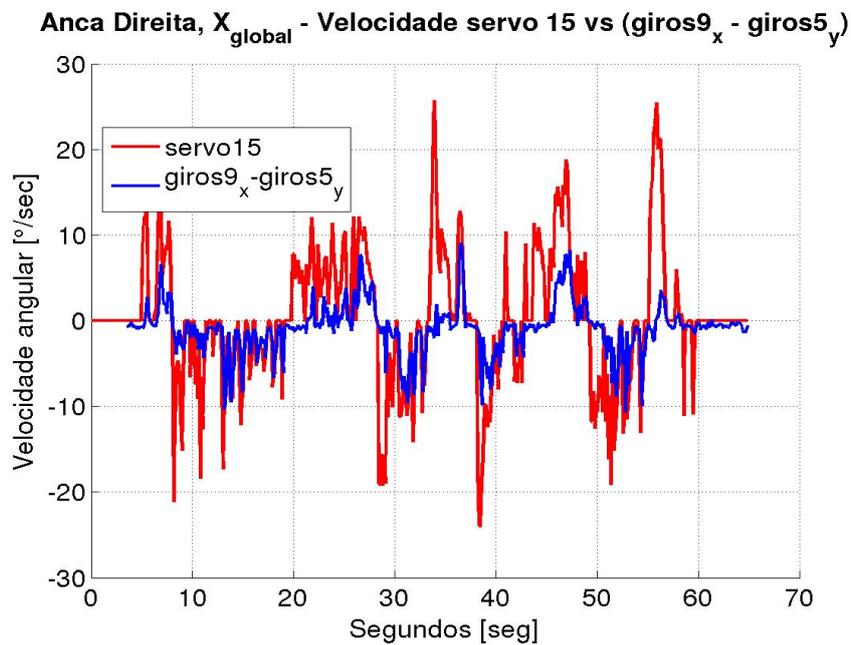


Figura 4.43: Anca direita - servomotor 16 e diferença entre giroscópios de IMUs 9 e 5.

As Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 apresentam os gráficos das velocidades angulares mais relevantes no movimento lateral, sendo que a primeira figura é referente à zona da tíbia, e as duas restantes referentes à zona da anca para os giroscópios 1 e 9 respetivamente.

Nos três gráficos é possível observar que o movimento descrito pelos servomotores não apresenta um movimento contínuo. Para além disso, observando as curvas dos giroscópios verifica-se que estes sensores apresentam variações no mesmo sentido das variações dos servomotores, falhando no entanto na amplitude dos movimentos.

A Tabela 4.10 contém os valores do EQM, do coeficiente de correlação e os parâmetros da regressão linear obtidos para os valores de velocidade angular para o movimento lateral. Pelo que se pode constatar, as três situações apresentam resultados de erro muito próximos entre si, e apesar destas curvas dos giroscópios falharem na amplitude dos seus valores, o valor do erro quadrático é inferior aos valores obtidos para o agachamento. Também os valores do coeficiente de correlação acima dos 0.6 mostram comportamentos relativamente aceitáveis, contudo, o parâmetro de regressão linear A apresenta valores muito baixos, indicando que os valores obtidos pelos giroscópios são maioritariamente mais baixos que os valores obtidos pelos servomotores.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Tornozelo dir. X 4.41	41.50	0.71	0.23	-0.81
Anca dir. X 4.42	42.65	0.61	0.23	-0.12
Anca dir. X 4.43	43.12	0.63	0.23	-0.95

Tabela 4.10: Parâmetros de avaliação para as curvas de velocidade angular no movimento lateral.

Aceleração Linear

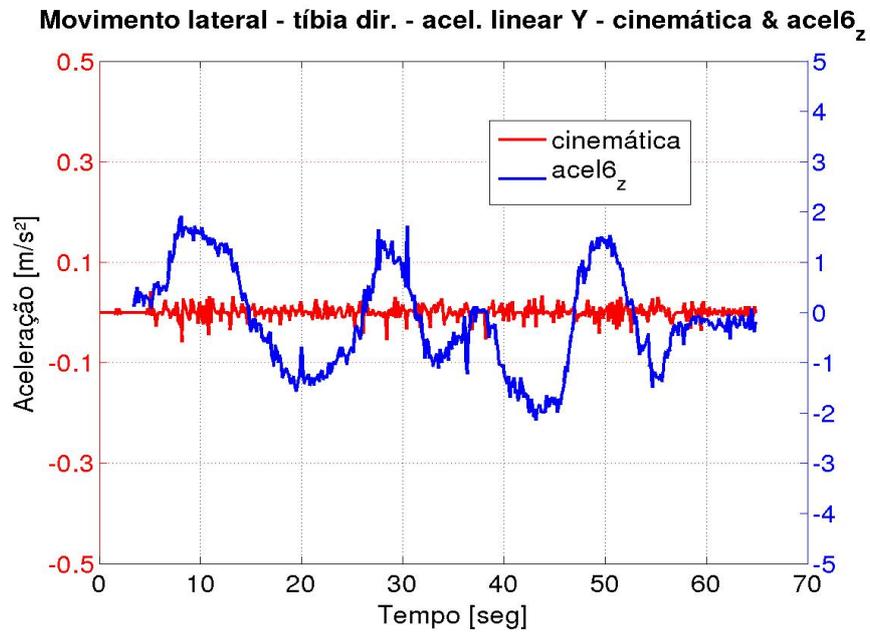


Figura 4.44: Movimento lateral - tíbia direita - aceleração em Y.

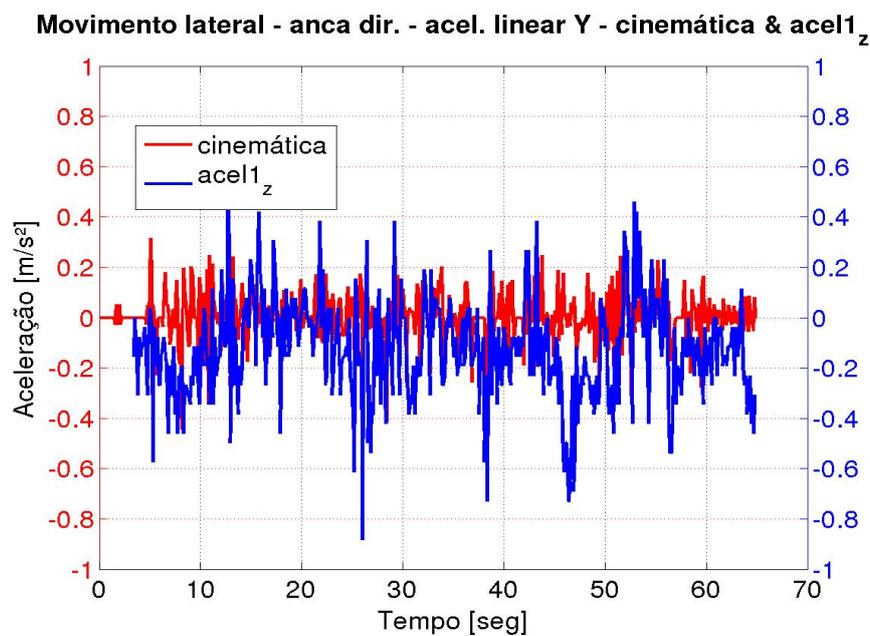


Figura 4.45: Movimento lateral - anca direita - aceleração em Y.

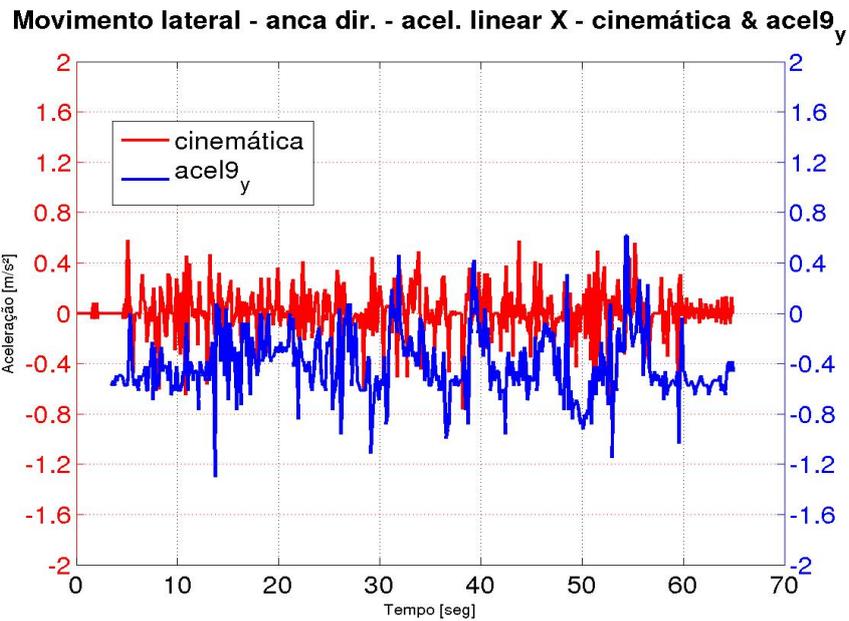


Figura 4.46: Movimento lateral - tibia direita - aceleração em Y.

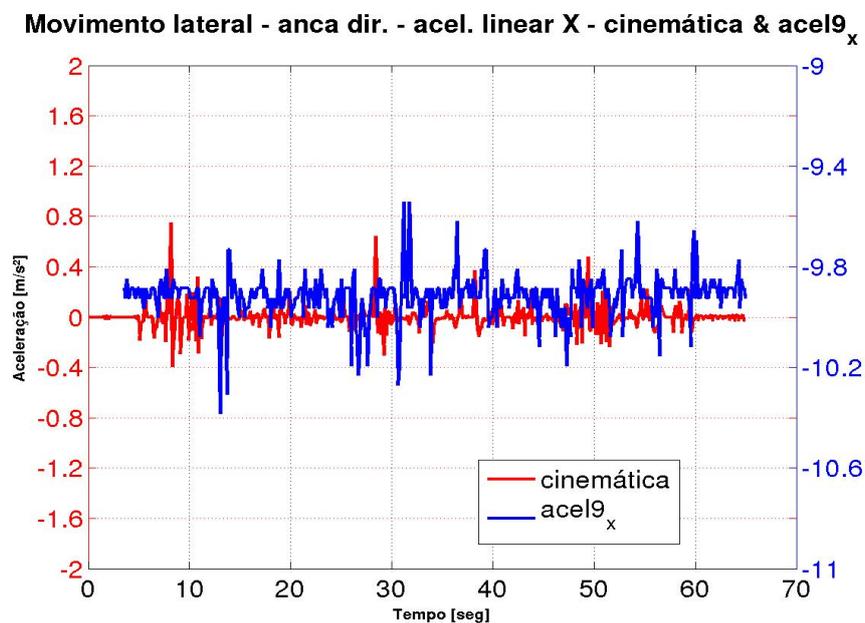


Figura 4.47: Movimento lateral - tibia direita - aceleração em Z.

As Figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47 contêm os gráficos referentes às curvas da aceleração linear obtida pela cinemática e pelos acelerômetros dos respectivos locais.

O gráfico da figura 4.44 corresponde à aceleração linear segundo o eixo Y global

do robô observada na zona da tibia, calculada pela cinemática e pelo acelerómetro 6. Neste gráfico observa-se que a aceleração obtida através da cinemática apresenta baixas oscilações, próximas de $0m/s^2$. Sendo este o eixo principal para este movimento, pode-se concluir que este movimento foi executado de forma lenta. A curva do acelerómetro apresenta oscilações de uma ordem de grandeza superior, comparativamente à curva da cinemática, contudo, os valores não passam além dos $\pm 2m/s^2$, o que leva a concluir que a variação observada pelos acelerómetros corresponde à interferência da aceleração gravítica neste sensor.

Os gráficos presentes nas Figuras 4.45, para o acelerómetro 1, 4.46 e 4.47 para o acelerómetro 9 correspondem às acelerações obtidas para a zona da anca. Nesta zona, os movimentos dos servomotores compensam-se, fazendo com que a orientação da anca permaneça praticamente constante durante a realização da experiência. Posto isto, as variações sentidas pelos acelerómetros não serão influenciadas pela aceleração gravítica. Segundo os gráficos da Figura 4.45 e 4.46 associados ao movimento no eixo Y, as curvas da cinemática mostram oscilações de aceleração que por vezes chegam aos $0.4m/s^2$, mas curvas dos acelerómetros correspondentes, mostram oscilações um pouco superiores, sendo neste caso da mesma ordem de grandeza. O gráfico da Figura 4.47 apresenta a aceleração linear no movimento lateral da anca segundo o eixo Z. A curva da cinemática mostra que neste movimento se registam pequenas acelerações também segundo este eixo, mas a curva do acelerómetro correspondente apresenta um comportamento diferente, embora as amplitudes das oscilações observadas se apresentem na mesma ordem de grandeza.

A Tabela 4.11 apresenta os valores do EQM, do coeficiente de correlação e para os parâmetros da regressão linear para cada um dos gráficos da aceleração linear do movimento lateral. Neste, é possível observar que os valores de erro se apresentam baixos, sendo isto justificável pelo fato de ambas as curvas apresentarem a mesma ordem de grandeza, à exceção das curvas do acelerómetro na direção Z, em que o seu valor elevado se deve ao efeito da aceleração gravítica que é detetada por este sensor. No que diz respeito aos valores do coeficiente de correlação, é possível observar que este é bastante baixo, bem como os valores do parâmetro A da regressão linear que em todas as situações é afastado do valor 1, no qual as curvas são correspondentes em escala. Os valores destes parâmetros apresentam a falta de similaridade quer em escala quer em comportamento entre as curvas da cinemática e dos acelerómetros, como já tem ocorrido de forma geral nas experiências avaliadas para esta grandeza.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Tornozelo dir. Y 4.44	1.02	-0.10	-7.84	-0.17
Anca dir. Y 4.45	0.06	0.23	0.45	-0.13
Anca dir. Y 4.46	0.27	0.13	0.17	-0.42
Anca dir. Z4.47	98.39	-0.07	-0.06	-9.92

Tabela 4.11: Parâmetros de avaliação para as curvas de aceleração linear no movimento lateral.

Inclinação

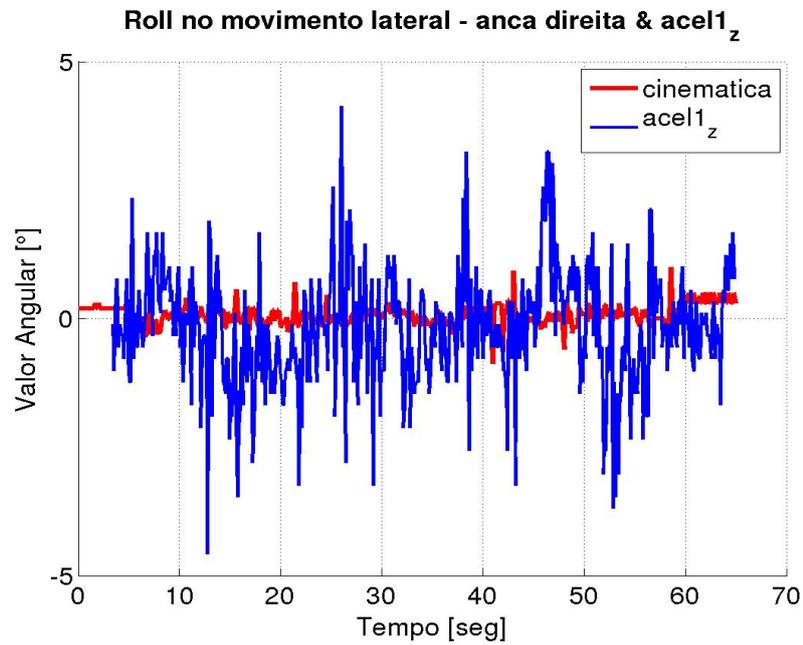


Figura 4.48: Movimento lateral - anca direita - *roll* obtido através da cinemática e acelerómetro 1.

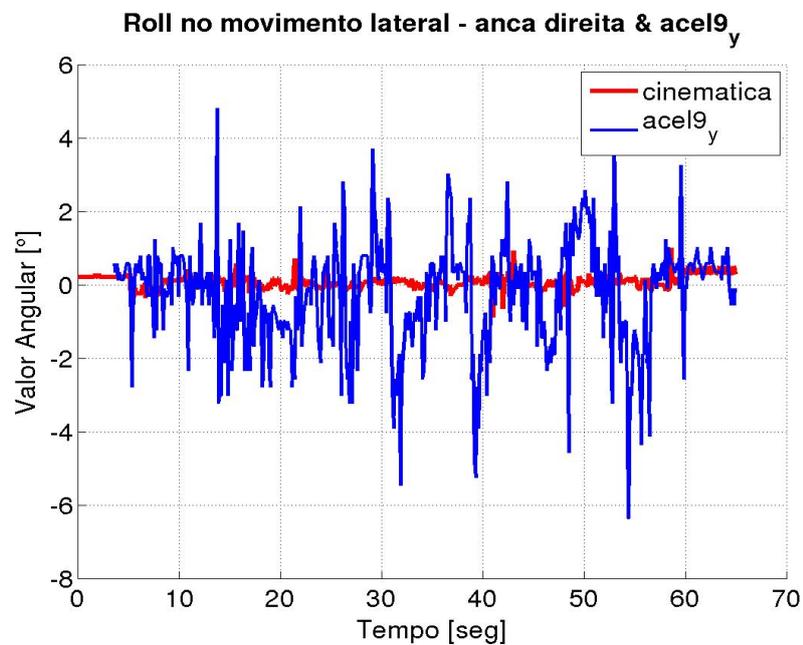


Figura 4.49: Movimento lateral - anca direita - *roll* obtido através da cinemática e acelerómetro 9.

As Figuras 4.48 e 4.49 correspondentes à zona da anca ilustram os resultados do ângulo *roll*, para o movimento lateral.

Nos gráficos das Figuras 4.48 e 4.49 as curvas da cinemática apresentam valores angulares próximos de 0° , por vezes oscilando com valores próximos de 1° , o que vem confirmar a compensação dos servomotores durante o movimento que garante a horizontalidade da anca ao longo da experiência. Nestes gráficos, as curvas calculadas através dos valores dos acelerómetros apresentam oscilações com amplitudes maiores que as oscilações observadas pela cinemática, mas também estes valores oscilam sempre próximos de 0° .

Na Tabela 4.12 apresentam-se os valores do EQM, do coeficiente de correlação e dos parâmetros da regressão linear para as curvas da inclinação durante o movimento lateral apresentadas. Na tabela é possível observar que apesar dos valores de EQM de ambas as situações serem relativamente baixos, os restantes parâmetros, coeficiente de correlação e parâmetro *A* da regressão linear apresentam valores muito baixos, traduzindo a falta de similaridade entre as curvas dos acelerómetros com as curvas obtidas através da cinemática da perna.

Figura	EQM	Coef. Correlação	Regressão Linear	
			A	B
Anca dir. <i>roll</i> 4.48	1.44	-0.05	-0.29	-0.22
Anca dir. <i>roll</i> 4.49	2.35	0.04	0.28	-0.33

Tabela 4.12: Parâmetros de avaliação para as curvas de inclinação no movimento lateral.

4.5 Discussão dos Resultados

Durante a realização dos três tipos de movimento, de uma forma geral os giroscópios apresentaram curvas com comportamento idêntico às curvas de velocidade angular dos servomotores. No entanto, em nenhuma das situações se verificou a correspondência das amplitudes entre as curvas obtidas pelos giroscópios e as curvas dos servomotores.

Para os giroscópios observou-se que apesar dos movimentos da flexão do joelho e movimento lateral serem realizados de uma forma menos suave, com movimentos interrompidos, o erro quadrático médio calculado para as curvas desses dois movimentos foram bem inferiores ao mesmo parâmetro para o movimento de agachamento. Isto deve-se ao fato das velocidades angulares envolvidas no movimento do agachamento serem maiores comparativamente às velocidades dos restantes movimentos e também ao fato de este movimento ser realizado sem interrupções durante as subidas e descidas do robô, fazendo com que os giroscópios apresentassem também velocidades angulares maiores. Mesmo com os valores do erro quadrático médio mais elevados, para os restantes parâmetros o movimento com resultados mais satisfatório foi o agachamento.

Ainda sobre os giroscópios, a técnica de medição em modo diferencial, em especial no movimento de agachamento, foi de grande utilidade, anulando as oscilações comuns

aos dois giroscópios através da subtração dos seus valores, fato que permitiu a obtenção das variações das velocidades angulares para cada junta do robô.

Nos movimentos realizados, a avaliação dos acelerómetros quanto à sua utilidade para medições de acelerações lineares não foi bem sucedida. As curvas dos acelerómetros apresentaram sempre valores com ordens de grandeza superior às curvas obtidas através da cinemática das pernas do robô humanóide. Um dos problemas reside nas baixas acelerações observadas nos movimentos, no entanto, o maior problema encontra-se no fato das curvas de referência obtidas pela cinemática, apenas abordam os movimentos realizados pelos servomotores, ignorando as acelerações criadas pela dinâmica do próprio robô.

A medição de orientações através dos dados dos acelerómetros apresentou, de forma geral, resultados satisfatórios. No entanto, em algumas ocasiões, são observadas curvas de acelerómetros com consideráveis diferenças do valor angular comparativamente às curvas obtidas pela cinemática. Mais uma vez, as curvas obtidas pela cinemática apenas contemplam os dados relativos aos servomotores, ignorando fatores da dinâmica do corpo do robô humanóide. Dada a falta de parâmetros de referência mais abrangentes que as curvas calculadas pela cinemática, resultados com curvas de grande diferença de valores ou comportamento foram considerados inconclusivos.

A comparação entre os resultados obtidos pelo IMU 1 e pelo IMU 9, mostrou que de uma forma geral, o IMU 1 apresentou melhor comportamento. No entanto, os testes realizados no capítulo 2 concluíram que ambos os tipos de unidades A e B apresentam aproximadamente o mesmo comportamento, o que leva a crer que a diferença de resultados observada tenha origem em questões externas à qualidade das medições das unidades inerciais.

Na técnica da redundância sensorial aplicada para o movimento de agachamento foi possível observar que existem essencialmente melhorias a nível de *offset*, onde se observou que o parâmetro b da regressão linear se encontrou mais próximo de $0^\circ/\text{se}$ $0^\circ/\text{s}$ para as curvas de redundância sensorial comparativamente à utilização de apenas um sensor. Também foi possível observar ligeiras melhorias ao nível do coeficiente de correlação, no entanto, consideradas desprezáveis, face à comparação entre a melhoria introduzida e o custo computacional e o aumento de complexidade que implica a adição de mais um sensor.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Face à proposta inicial de projeto, nesta dissertação realizaram-se as seguintes tarefas:

- realização do estudo de caracterização das unidades IMU disponíveis, através do desenvolvimento de rotinas de manipulação do braço robótico, comunicação com sensores e para recolha de dados, seguidas da avaliação dos resultados obtidos;
- desenvolvimento de uma rede inercial composta por várias unidades IMU, tendo sido desenvolvida e concebida uma placa de circuito impresso, bem como todas as ligações necessárias ao funcionamento, incluindo todo o *firmware* de comunicação com os elementos da rede, e também o desenvolvimento e conceção de componentes de fixação da rede ao robô humanoide;
- realização de testes de validação da rede inercial criada, realizando movimentos no robô humanoide com a rede inercial nele implementada, e posterior avaliação.

O *firmware* desenvolvido para a rede inercial permite que esta consiga operar mesmo que não se encontre em toda a sua capacidade de funcionamento, sendo capaz de funcionar mesmo com menos de nove unidades IMU conectadas. Esta característica e a possibilidade dos IMUs poderem ser acoplados em qualquer lugar do robô, garantem à rede inercial a versatilidade necessária para operar em diferentes projetos com diferente número de IMU utilizados.

Os testes realizados para a medição da aceleração linear apresentaram acelerações demasiado baixas, uma vez que os acelerómetros apresentavam na sua maioria valores que não excediam o limiar de $9.81 \pm 0.4 \text{ m/s}^2$, mostrando-se insuficientes para a avaliação da aceleração linear. Com os acelerómetros apenas se conseguiu avaliar os seus dados através do cálculo das inclinações *pitch* e *roll*.

A taxa de aquisição de 7 Hz à qual funciona a rede, é uma taxa muito baixa para o funcionamento destes sensores. Especialmente para movimentos com elevada frequência de variação, isto é, com elevada taxa de mudança de comportamento, durante a aquisição de dados, os sensores da rede perderão muita informação que na maioria dos casos acarreta uma acumulação de erro demasiado grande.

A plataforma ROS mostrou-se uma mais valia para o desenvolvimento de projetos no âmbito do PHUA, pois a sua estrutura modular permitiu o desenvolvimento de um módulo capaz de cooperar com outros módulos do PHUA. Para além disso, as suas ferramentas de troca de mensagens e gravação de dados agilizaram a realização dos testes realizados nos capítulos 2 e 3.

5.2 Trabalho futuro

De forma a dotar o *hardware* de maior resistência e durabilidade, poderá ser necessário conceber uma nova placa de circuito impresso para ligar os sensores, recorrendo a materiais e processos de fabrico mais sofisticados.

Uma vez que os resultados obtidos pelos acelerómetros para a avaliação da aceleração linear se revelaram inconclusivos, surge a necessidade de repensar noutra atividade experimental, sujeita a acelerações de maior magnitude, de forma a poder avaliar estes sensores na sua grandeza direta (aceleração linear).

A taxa média de aquisição de dados para a rede inercial a funcionar a 100% da sua capacidade é no momento de 7 Hz. Esta taxa deve ser aumentada, por forma a melhorar a performance das unidades inerciais. Um procedimento que pode ser realizado para este fim, é a substituição da placa de desenvolvimento *Arduino UNO R3* por outra placa com maior velocidade de processamento de dados. Também se pode procurar agilizar o código do *firmware* desenvolvido para melhorar a taxa de aquisição.

Com a rede de sensores inerciais desenvolvida, é agora possível obter dados provenientes desta e incorporá-los no desenvolvimento de novos algoritmos e técnicas de controlo do robô humanoíde, por exemplo, algoritmos para o equilíbrio bípede.

Referências

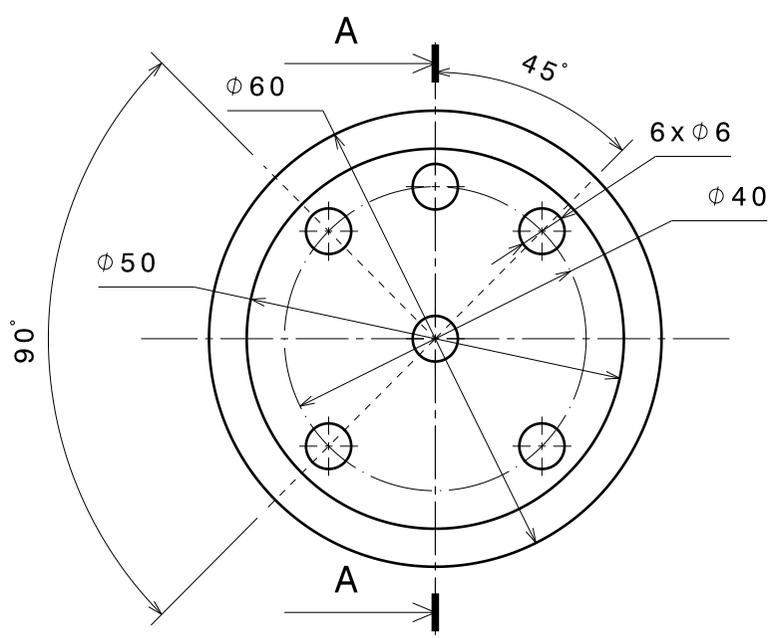
- [1] David Gameiro and Filipe Carvalho. MODULROB – concepção e desenvolvimento de componentes modulares. Technical report, 2004.
- [2] Luís Rêgo and Renato Barbosa. Estudos funcionais de uma plataforma para um sistema robótico humanóide. Technical report, July 2004.
- [3] Nuno Beça and Ângelo Cardoso. Desenvolvimento e integração das subestruturas inferior e superior para a locomoção de uma plataforma humanóide. Technical report, July 2005.
- [4] Luís Gomes and Mauro Silva. Concepção e desenvolvimento de unidades de percepção e controlo para um robot humanóide. Technical report, July 2005.
- [5] Milton Silva. Desenvolvimento de algoritmos de controlo para locomoção de um robot humanóide. Technical report, July 2006.
- [6] Daniel Baptista. Desenvolvimento da unidade central de controlo para uma plataforma humanóide. Technical report, July 2007.
- [7] Pedro Ferreira. Desenvolvimento de algoritmos de controlo para locomoção de um robot humanóide. Technical report, July 2007.
- [8] Mauro Rodrigues. Unidade de processamento e sistema de visão para robô humanóide. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [9] Milton Silva. Sistemas de comunicação e controlo para uma plataforma humanóide. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [10] Pedro Cruz. Haptic interface data acquisition system. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2012.
- [11] Rémi Sabino. Estrutura híbrida de locomoção para um robô humanóide. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2009.
- [12] Miguel Ribeiro. Desenvolvimento dos sistemas sensorial e motor para um robô humanóide. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2010.
- [13] Ricardo Godinho. Desenvolvimento do tronco e braços de uma plataforma humanóide híbrida. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2011.
- [14] William Lage. Algoritmos de controlo do movimento para um robô humanóide. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2011.

- [15] Emílio Estrelinha. Tele-operation of a humanoid robot using haptics and load sensors. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2013.
- [16] Anthony Lawrence. *MODERN INERTIAL TECHNOLOGY.: Navigation, Guidance, and Control, 2nd edition*. Springer, January 1998.
- [17] Jon S. Wilson. *Sensor Technology Handbook*. Newnes, 2005.
- [18] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, January 2010.
- [19] J. Lenz and Alan S. Edelstein. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*, 6(3):631–649, 2006.
- [20] K. Maenaka. MEMS inertial sensors and their applications. pages 71–73, 2008.
- [21] Huikai Xie and Gary K. Fedder. Integrated microelectromechanical gyroscopes. *Journal of Aerospace Engineering*, 16(2):65–75, April 2003.
- [22] Dahai Ren, Lingqi Wu, Meizhi Yan, Mingyang Cui, Zheng You, and Muzhi Hu. Design and analyses of a MEMS based resonant magnetometer. *Sensors*, 9(9):6951–6966, September 2009.
- [23] William Premerlani and Paul Bizard. Direction cosine matrix imu: Theory. *DIY DRONE: USA*, pages 13–15, 2009.
- [24] Aneeket Suresh Patkar. *Localization in Noisy Environment Using Extended Kalman Filter*. ProQuest, 2007.
- [25] Jong-Hwan Kim. *Progress in Robotics*. Springer, 2009.
- [26] Rogelio Lozano. *Unmanned Aerial Vehicles: Embedded Control*. John Wiley & Sons, February 2013.
- [27] Sung-Kyun Kim, Seokmin Hong, and Doik Kim. A walking motion imitation framework of a humanoid robot by human walking recognition from IMU motion data. pages 343–348, 2009.
- [28] Nuno Ricardo Lemos Silva. Sistema inercial diferencial para plataformas multi-corpo dinâmicas. Master's thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011.
- [29] A. Hornung, K.M. Wurm, and M. Bennewitz. Humanoid robot localization in complex indoor environments. pages 1690–1695, 2010.
- [30] Jacky Baltes, Sara McGrath, and John Anderson. The use of gyroscope feedback in the control of the walking gaits for a small humanoid robot. In Daniele Nardi, Martin Riedmiller, Claude Sammut, and José Santos-Victor, editors, *RoboCup 2004: Robot Soccer World Cup VIII*, number 3276 in Lecture Notes in Computer Science, pages 628–635. Springer Berlin Heidelberg, January 2005.
- [31] R. Renner and S. Behnke. Instability detection and fall avoidance for a humanoid using attitude sensors and reflexes. pages 2967–2973, 2006.

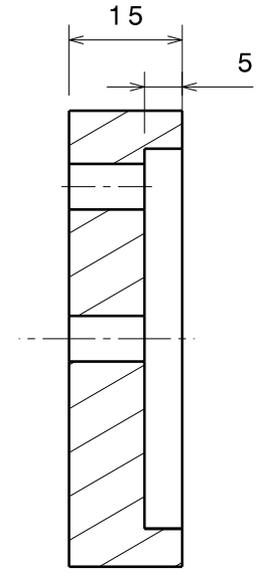
- [32] M. Vukobratovic and B. Borovac. Dynamic balance concept and the maintenance of the dynamic balance in humanoid robotics. In *6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, 2008. SISY 2008*, pages 1–11, 2008.
- [33] Ching-Chang Wong, Chi-Tai Cheng, Hao-Che Chen, Yue-Yang Hu, and Chii-Sheng Yin. Static balancing control of humanoid robot based on accelerometer. pages 2836–2840, 2008.
- [34] A. Carmona, L. Molina-Tanco, M. Azuaga, J.A. Rodriguez, and F. Sandoval. Online absorption of mediolateral balance disturbances for a small humanoid robot using accelerometer and force-sensor feedback. pages 1–6, 2007.
- [35] Sparkfun. 9 degrees of freedom - razor imu sen-10736. **[on-line]:** <https://www.sparkfun.com/products/10736>, 2013.
- [36] Pololu Robotics and Electronics. Minimu-9 v2 gyro, accelerometer, and compass (l3gd20 and lsm303dlhc carrier). **[on-line]:** <http://www.pololu.com/product/1268/>, 2013.
- [37] J. Cannan and Huosheng Hu. A multi-sensor armband based on muscle and motion measurements. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 1098–1103, 2012.
- [38] Arduino. *Arduino UNO R3*. **[on-line]:** <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>, 2013.
- [39] AllDataSheet. *Multiplexer hcf4051be*. **[on-line]:** <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/22345/STMICROELECTRONICS/HCF4051BF.html>, 2013.
- [40] Arduino. Softwareserial library. **[on-line]:** <http://arduino.cc/de/Reference/SoftwareSerial>, 2013.
- [41] Vitor M. F. Santos. Robotica industrial - introducao a robotica.
- [42] Yong-yil Kim, CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA ROBOTICS INST, and Subhas Desa. *Acceleration Sets of Planar Manipulators. Part I: Theory*. Defense Technical Information Center, 1989.
- [43] Sergio Ronaldo Barros dos Santos, Cairo Lucio Nascimento, Sidney N. Givigi, Tiago Henrique Medeiros Mercante, and Neusa Maria Franco de Oliveira. Implementation of a real-time attitude system for the stabilization control of a quad-rotor robot. pages 387–393, 2013.
- [44] D. Shivaraj, P. Cyril Prasanna Raj, and M. Lasitha. Design and development of a biped humanoid robot to generate dynamic walking pattern. 11(1):12, April 2012.
- [45] Diogo Filipe de Sousa Teixeira e Melo. Integrated system for a high resolution MEMS accelerometer. February 2012. Tese de mestrado integrado. Engenharia Electrotécnica e de Computadores (Major Telecomunicações). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 2010.

Apêndice A

Suportes Desenvolvidos para Atividade Experimental de Caraterização

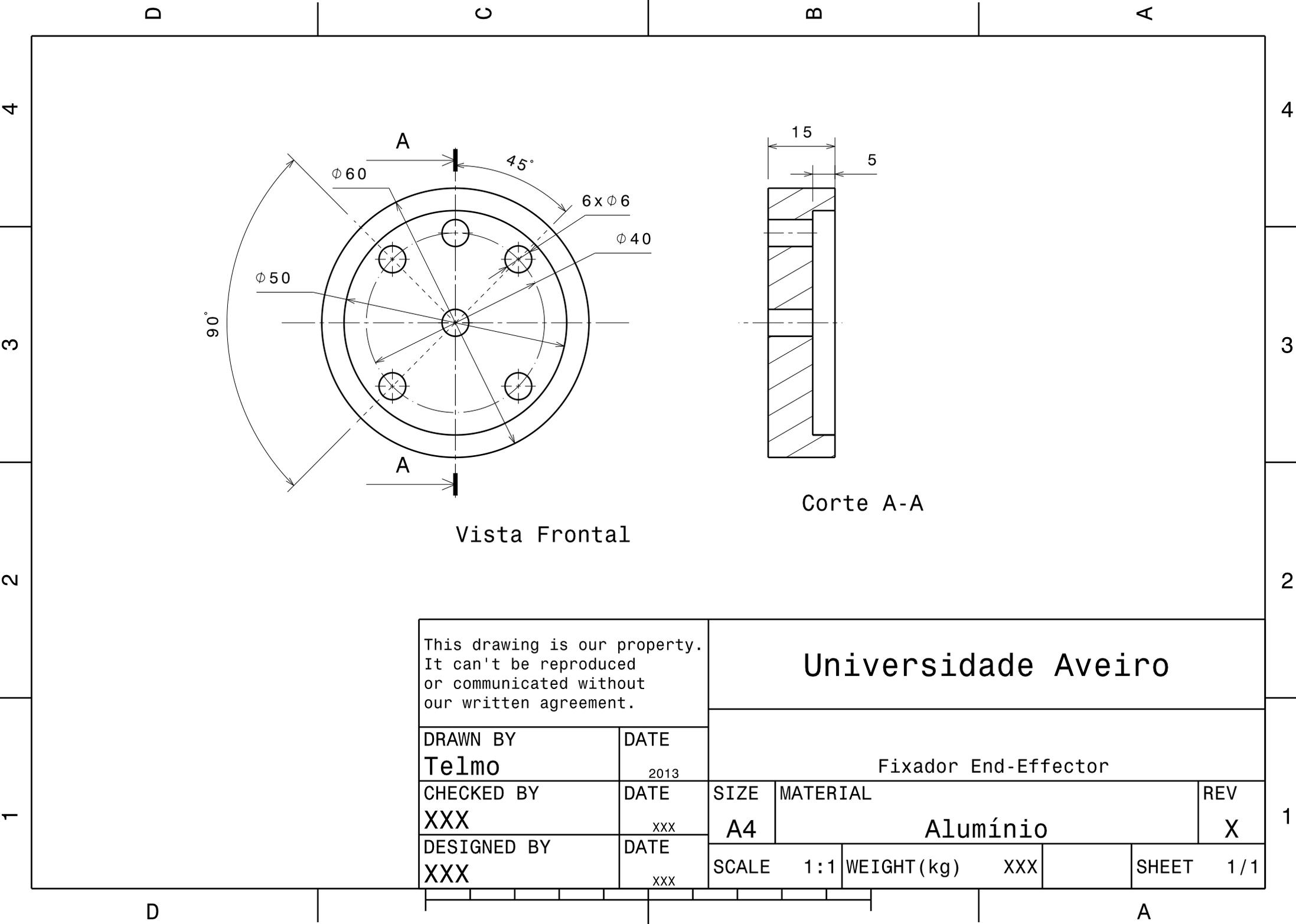


Vista Frontal



Corte A-A

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade Aveiro			
DRAWN BY Telmo		DATE 2013		Fixador End-Effector	
CHECKED BY XXX		DATE XXX		SIZE A4	MATERIAL Alumínio
DESIGNED BY XXX		DATE XXX		SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XXX
				SHEET 1/1	REV X



D

C

B

A

4

4

3

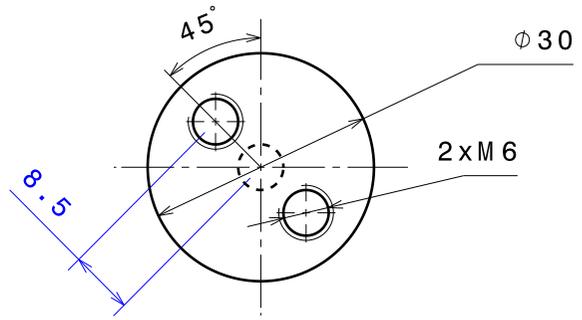
3

2

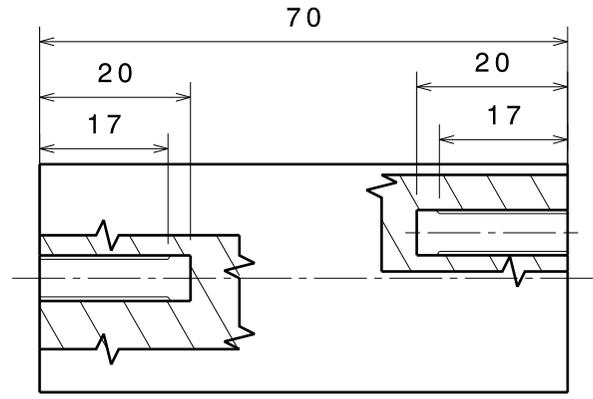
2

1

1



Vista Frontal



Vista Lateral

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

Universidade Aveiro

DRAWN BY Telmo	DATE 2013
--------------------------	--------------

DRAWING TITLE
Prolongador Suporte

CHECKED BY XXX	DATE xxx
--------------------------	-------------

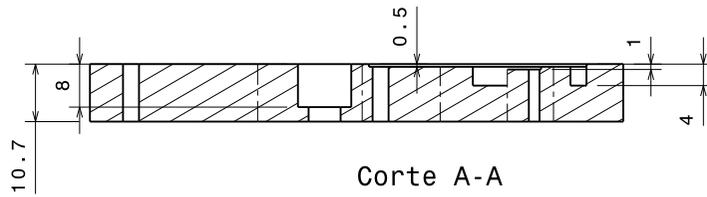
SIZE A4	MATERIAL Nylon	REV X
-------------------	--------------------------	-----------------

DESIGNED BY XXX	DATE xxx
---------------------------	-------------

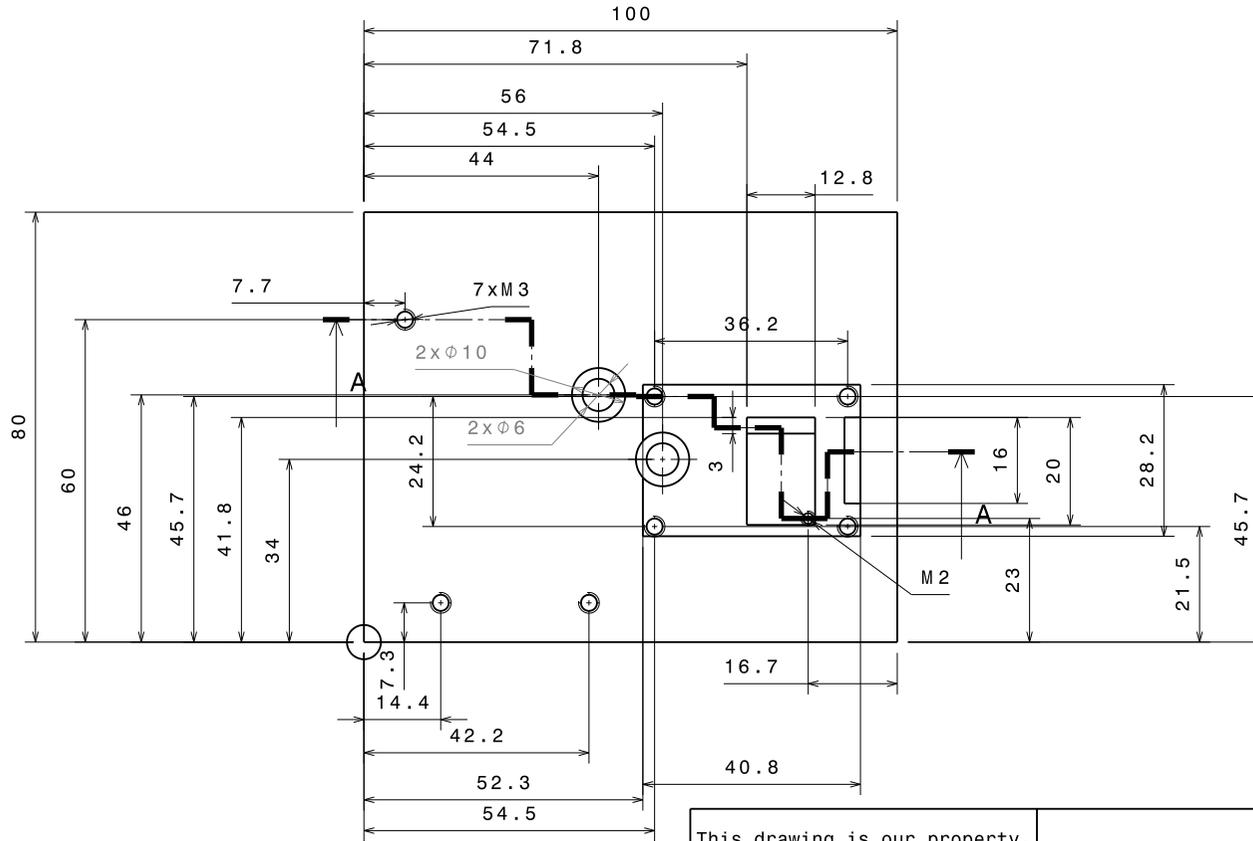
SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XXX	SHEET 1/1
---------------------	--------------------------	---------------------

D

A



Corte A-A



Vista Frente

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

Universidade Aveiro

DRAWN BY Telmo	DATE 2013
CHECKED BY XXX	DATE xxx
DESIGNED BY XXX	DATE xxx

Suporte Sensores			
SIZE A3	MATERIAL Nylon	REV X	
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) xxx	SHEET 1/1	

4

3

2

1

4

3

2

1

H

G

B

A

D

C

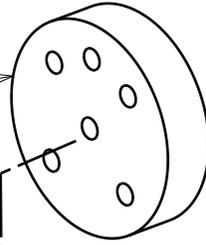
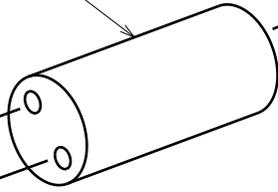
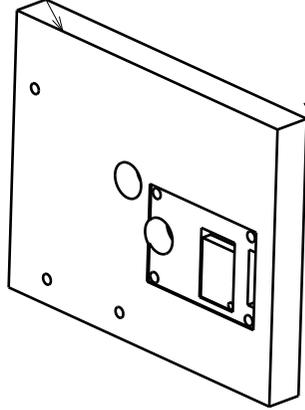
B

A

1

2

3



Lista Peças	
1	Suporte Sensores
2	Prolongador Suporte
3	Fixador End-Effector

Explodida 1:2

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

Universidade Aveiro

DRAWING TITLE

Explodida Aparato Experimental

DRAWN BY
Telmo

DATE
2013

CHECKED BY
XXX

DATE
XXX

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
XXX

REV
X

SCALE
1:2

WEIGHT(kg)
XXX

SHEET
1/1

D

A

4

3

2

1

4

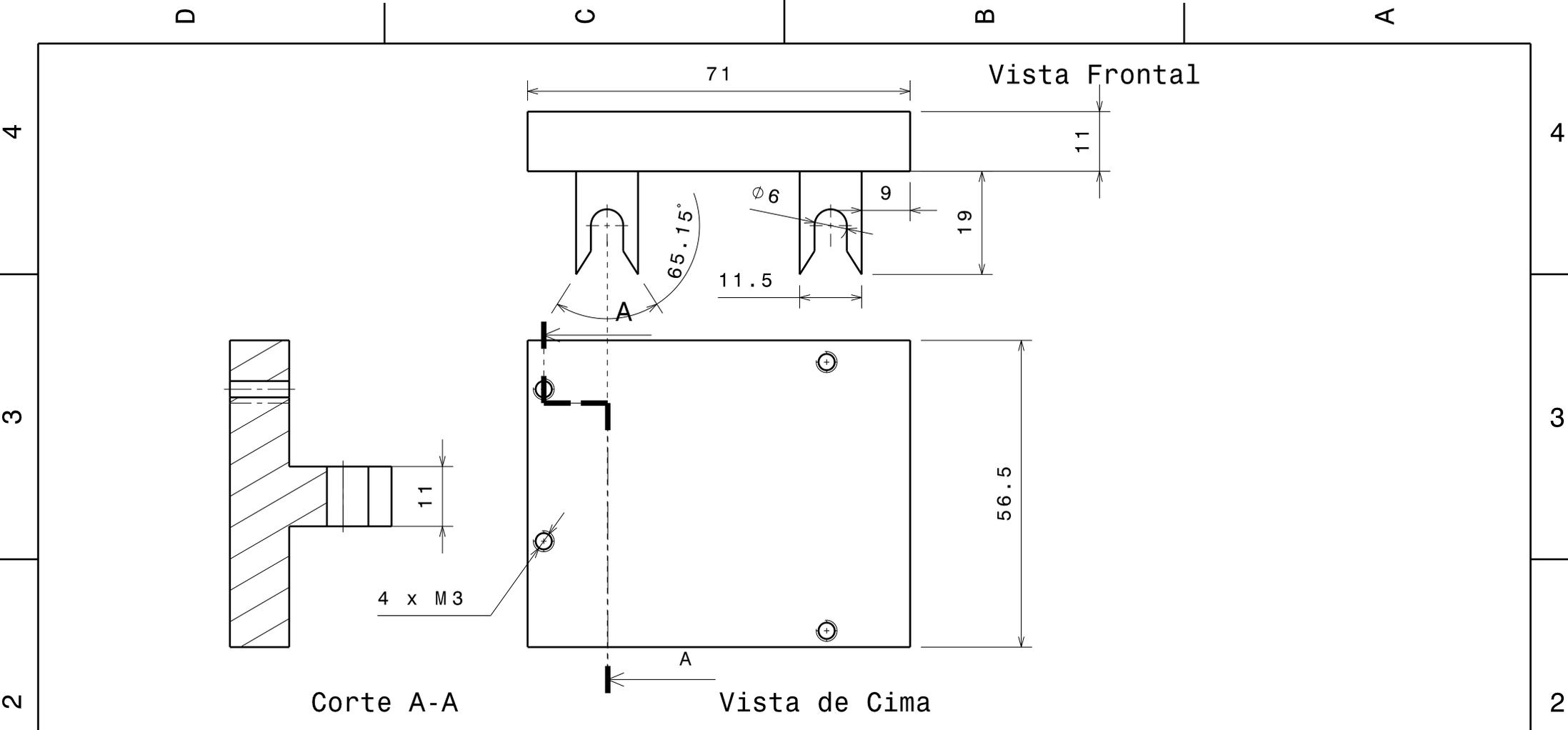
3

2

1

Apêndice B

Suportes Desenvolvidos para Fixação da Rede de Sensores no Robô



This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

Universidade de Aveiro

DRAWN BY
Telmo

DATE
2013

DRAWING TITLE
Suporte da unidade central

CHECKED BY
XXX

DATE
xxx

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
Nylon

REV
X

DESIGNED BY
XXX

DATE
xxx

SCALE
1:1

WEIGHT(kg) **0,05**

SHEET **1/1**

D

C

B

A

4

4

3

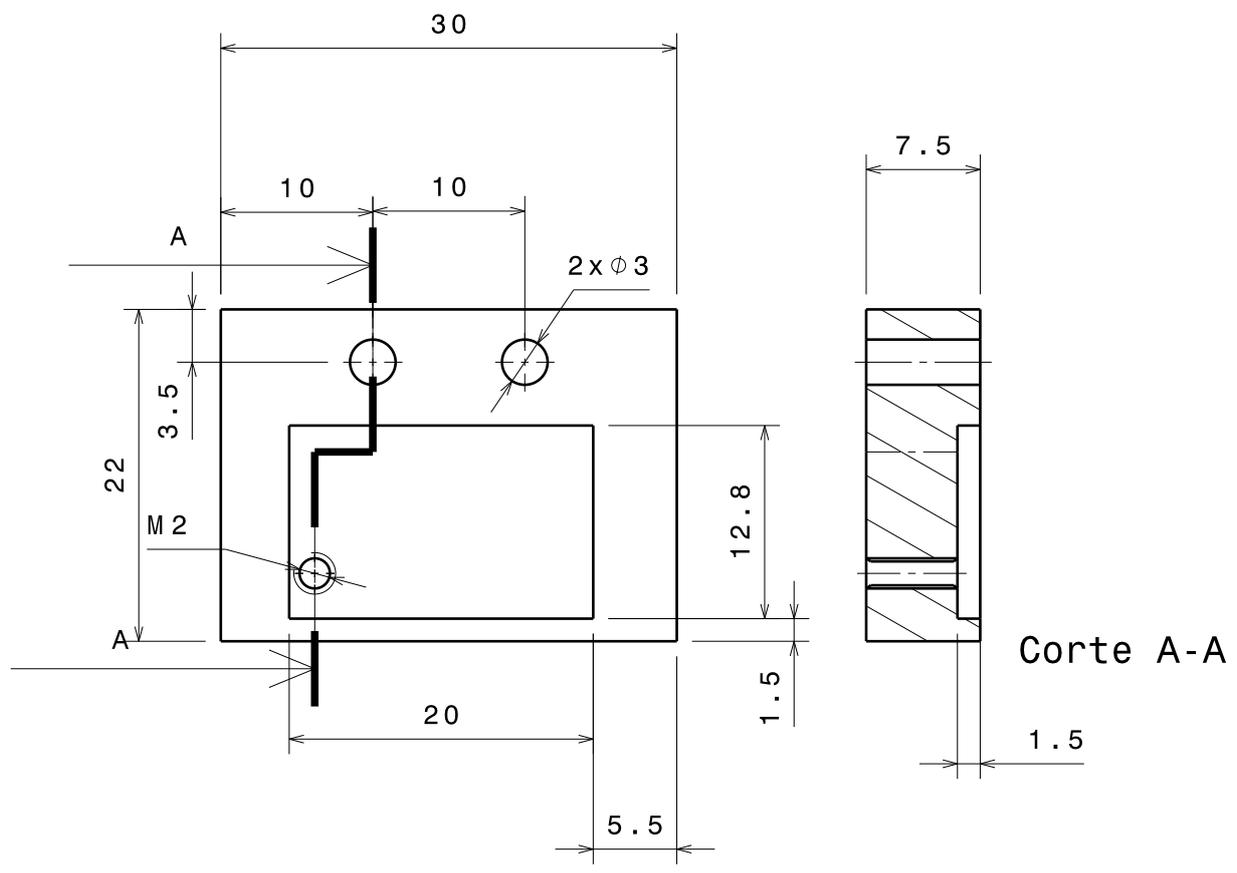
3

2

2

1

1



Vista Frontal
2:1

Corte A-A

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

Universidade de Aveiro

DRAWING TITLE

Suporte para Sensor da Anca

DRAWN BY
Telmo

DATE
2013

CHECKED BY
XXX

DATE
XXX

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
Nylon

REV
X

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE 2:1

WEIGHT (kg) XXX

SHEET 1/1

D

A

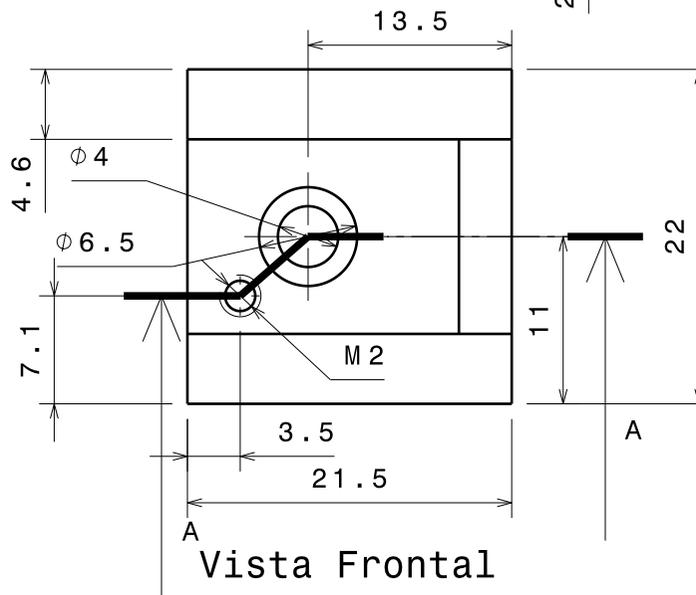
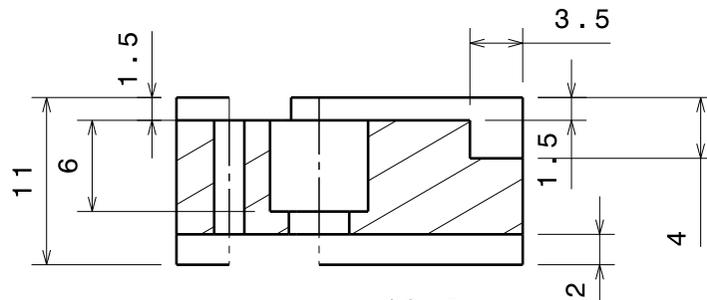
D

C

B

A

Corte A-A



Vista Frontal

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro			
DRAWN BY Telmo		DATE 2013		DRAWING TITLE Suporte de sensor para perna	
CHECKED BY XXX		DATE XXX		SIZE A4	DRAWING NUMBER Nylon
DESIGNED BY XXX		DATE XXX		SCALE 2:1	WEIGHT (kg) XXX
				SHEET 1/1	REV X

D

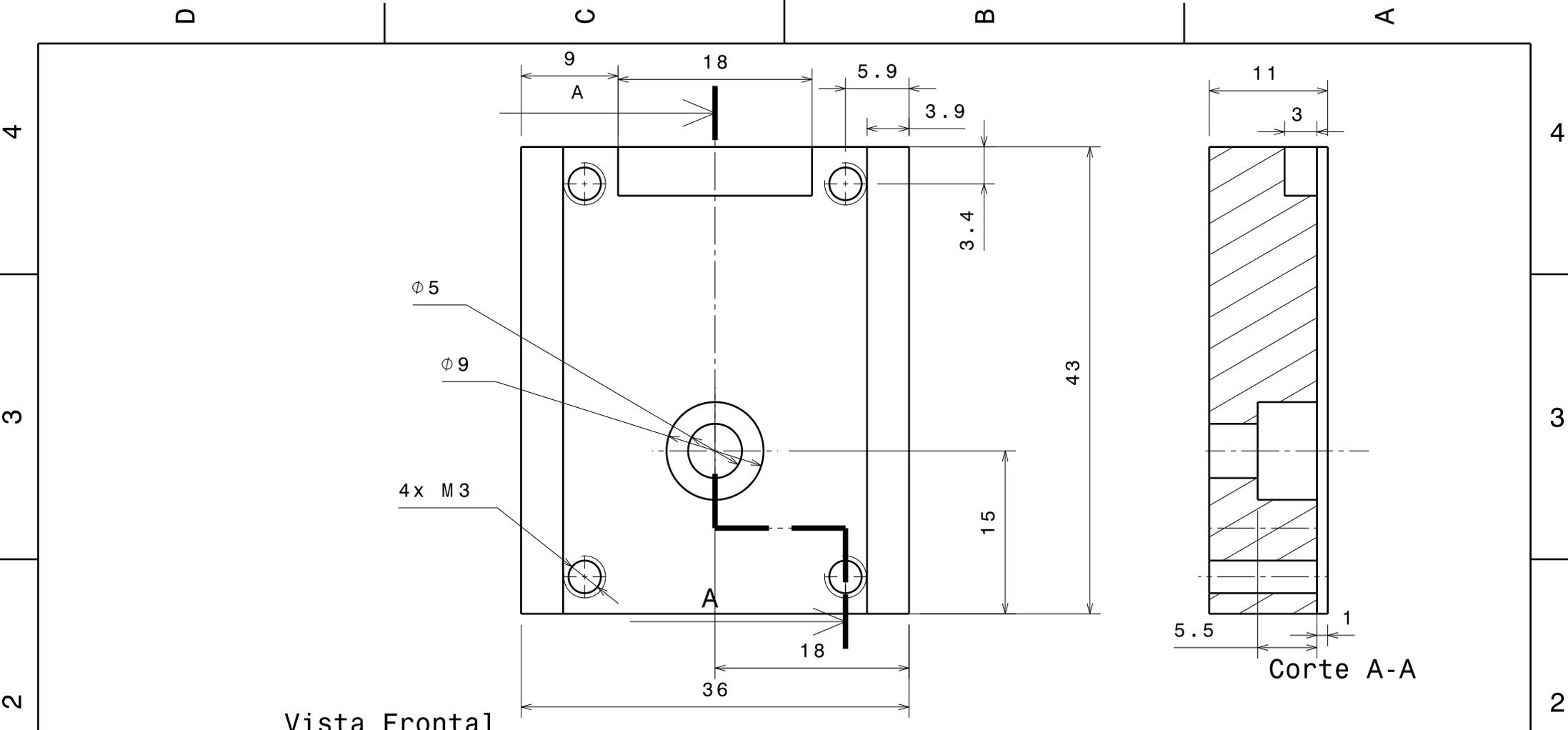
A

4

3

2

1



Vista Frontal

Corte A-A

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		Universidade de Aveiro			
DRAWN BY Telmo		DATE 2013		DRAWING TITLE Suporte de sensor A	
CHECKED BY XXX		DATE XXX		SIZE A4	
DESIGNED BY XXX		DATE XXX		DRAWING NUMBER nylon	
		SCALE 2:1		WEIGHT(kg) 0,01	
		SHEET 1/1		REV X	

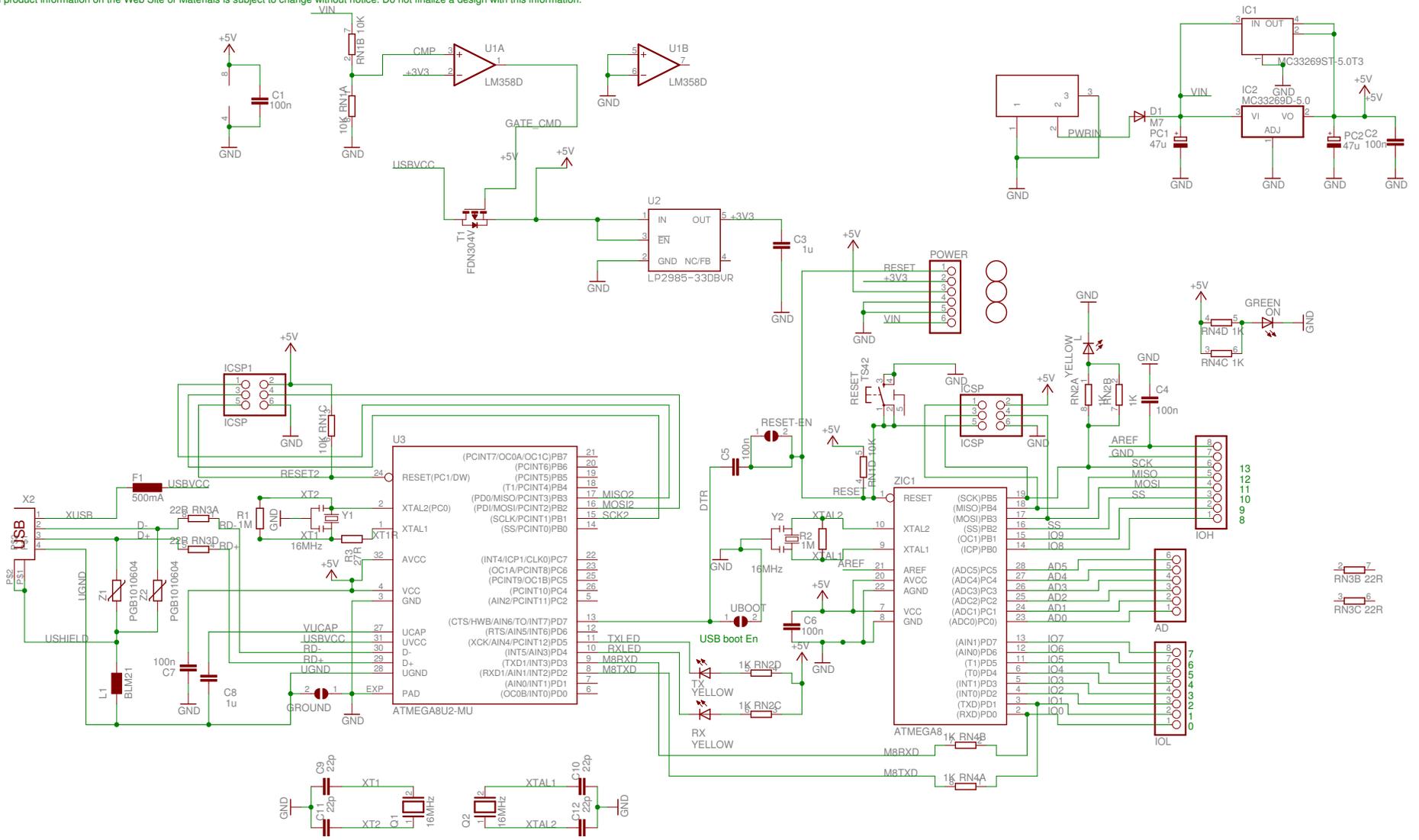
Apêndice C

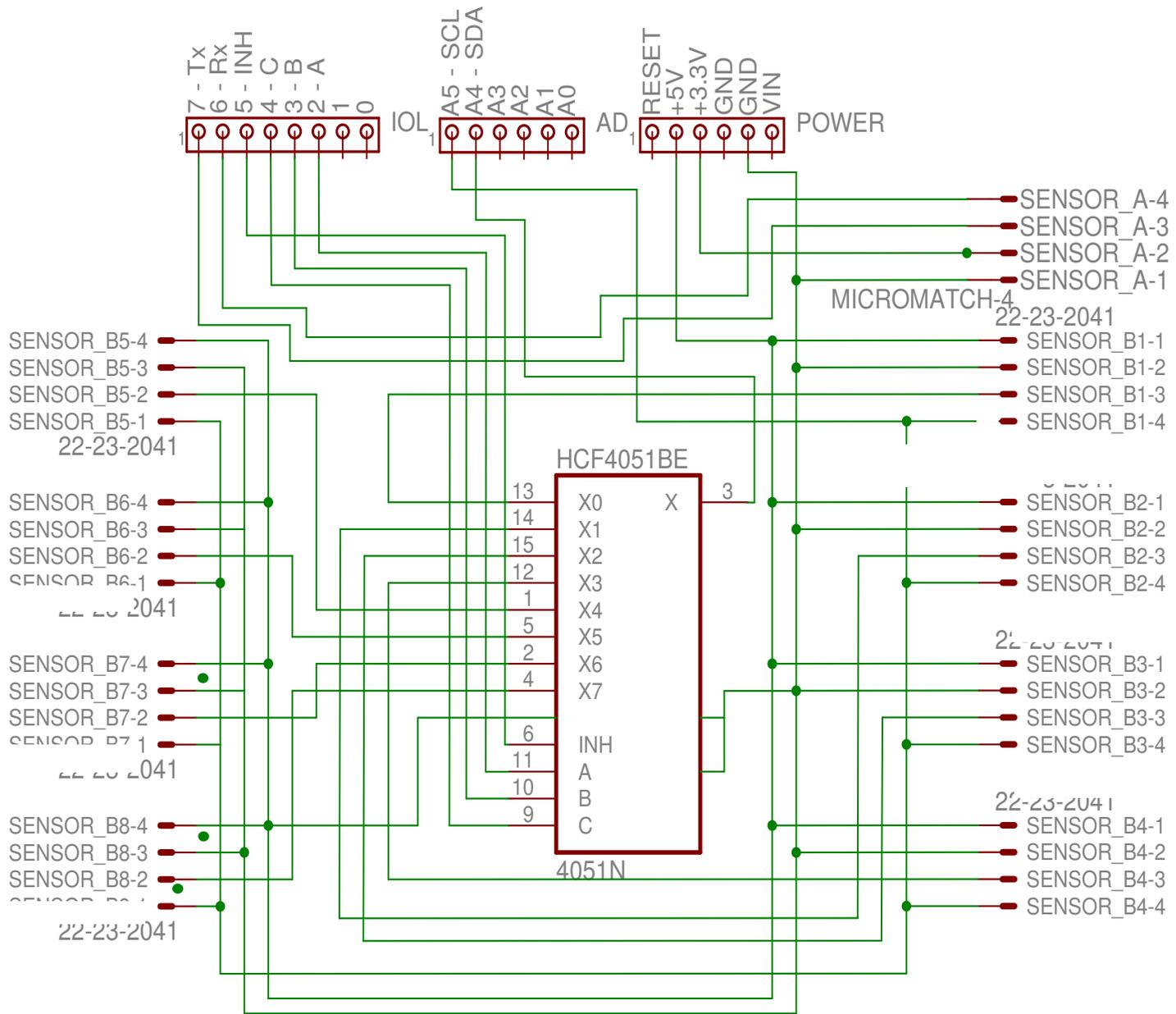
Esquema de Ligações da Rede

Arduino™ UNO Reference Design

Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS". Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE

Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.





Apêndice D

Pag informativa