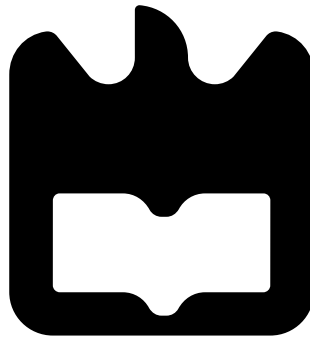




**Ricardo
Costa Godinho**

**Desenvolvimento do Tronco e Braços de uma
Plataforma Humanóide Híbrida**





**Ricardo
Costa Godinho**

**Desenvolvimento do Tronco e Braços de uma
Plataforma Humanóide Híbrida**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Vítor M. Ferreira dos Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica do Prof. Doutor Rui A. da Silva Moreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Jorge Manuel Mateus Martins

professor auxiliar do Instituto Superior Técnico

Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos

professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira

professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração de diversas pessoas. Desta forma gostaria de deixar os meus agradecimentos:

À minha família em especial aos meus pais e irmãos, por toda a ajuda demonstrada ao longo do meu percurso académico, bem como pelo seu apoio ao longo destes anos.

Ao Prof. Doutor Vítor Santos pela orientação e disponibilidade demonstrada ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Rui Moreira pela sua disponibilidade e colaboração neste projecto.

Ao Eng. António Festas pela sua disponibilidade e apoio no desenvolvimento e concepção assim como no fabrico dos inúmeros componentes que constituem esta estrutura.

Por fim gostaria de agradecer a todos os meus amigos, bem como a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a evolução deste trabalho.

Palavras-chave

Tronco, membros superiores, cabeça, actuação híbrida, actuação directa, actuação passiva.

Resumo

O desenvolvimento da robótica humanóide permitirá um dia criar uma máquina que seja capaz de imitar os seres humanos nas suas acções, na sua forma de pensar, e na sua complexidade em perceber o seu próprio funcionamento. Actualmente é possível criar máquinas autónomas capazes de se adaptarem ao ambiente que as rodeia e auxiliar os seres humanos nas mais diversas tarefas. Muito trabalho tem vindo a ser desenvolvido, no entanto ainda existe um longo caminho a percorrer.

Iniciado em 2003, o Projecto Humanóide tem vindo a ser desenvolvido pelo GAR (*Grupo de Automação e Robótica*) numa colaboração do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) com o Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática (DETI) da Universidade de Aveiro.

Este projecto pretende marcar mais uma etapa na evolução desta plataforma. Com o culminar da construção do novo protótipo pretende-se obter uma nova estrutura que responda as limitações encontradas no anterior modelo e que desta forma potencie o desenvolvimento de novos trabalhos de investigação.

O principal objectivo deste trabalho é o desenvolvimento e construção do tronco e membros superiores da nova plataforma humanóide, bem como a sua integração na estrutura previamente desenvolvida.

O resultado foi a construção de uma estrutura relativamente leve e compacta, capaz de acomodar os principais elementos necessários ao seu funcionamento. Foi possível desenvolver articulações capazes de representar um grande espectro de movimentos do corpo humano, sempre com o objectivo de respeitar as suas relações antropométricas. Nesta estrutura, e tal como anteriormente utilizado, foi implementada a actuação híbrida. Pretende-se que com este tipo de actuação e seja possível reduzir os esforços que ocorrem nos servomotores durante os movimentos das juntas.

Neste documento são descritos todos os componentes desenvolvidos, assim como as simulações realizadas no âmbito da validação dos mesmos.

Keywords

Trunk, upper limbs, head, hybrid actuation, direct actuation, passive actuation.

Abstract

The development of humanoid robots will one day create a machine that is able to mimic humans in their actions, in their thinking, and their complexity to perceive their own functioning. Currently it is possible to create autonomous machines capable of adapting to their surrounding environment and assist humans in various tasks. Much work has been developed, however there is still a long way to go.

Started in 2003, the Humanoid Project has been developed by the GAR (*Group of Automation and Robotics*) a collaboration of the Department of Mechanical Engineering (DEM) with the Department of Electronics, Telecommunications and Informatics (DETI), from University of Aveiro.

This project pretends to mark another step in the evolution of this platform. With the culmination of the construction of the new prototype it is intended to obtain a new structure that solves the limitations found in the previous model and stimulates the development of new work in research.

The main objective of this work is the development and construction of the trunk and upper limbs of the new humanoid platform and its integration into the structure previously developed.

The result was the construction of a relatively light and compact structure, capable of accommodating the key elements needed for its own operation. It was possible to develop joints capable of representing a wide spectrum of movements of the human body, always with the objective of respect their anthropometric relationships. In this structure, and as it was previously used, the hybrid actuation was implemented. This type of actuation intends to reduce the efforts that occur at the servomotors during the movements of the joints.

This document describes all components developed as well as the simulations held in the validation of the same.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objectivos	1
1.2	Enquadramento	2
1.3	Definição	2
1.4	Evolução dos Robôs Humanóides	3
1.5	Caso de Estudo	10
1.6	Anatomia do corpo Humano	13
1.7	Termos e definições anatómicas	13
1.7.1	Posição anatómica	13
1.7.2	Planos anatómicos	14
1.8	Articulações	15
1.8.1	Coluna	16
1.8.2	Ombro	18
1.8.3	Cotovelo	22
1.8.4	Pulso	23
1.9	Premissas Antropométricas	26
1.10	Organização	27
2	Projecto Humanóide	29
2.1	Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro	29
2.1.1	Modelo 2005	29
2.1.2	Modelo 2009	32
2.2	Actuação Híbrida	34
2.3	Correcção estrutural nas pernas	35
3	Concepção e desenvolvimento estrutural	39
3.1	Constrangimentos no Desenvolvimento	39
3.1.1	Dimensões finais da plataforma	39
3.1.2	Acomodação do controlador central (PC-104)	41
3.1.3	Dimensionamento das juntas e actuadores	42
3.1.4	Dimensionamento das baterias	43
3.2	Desenvolvimento conceptual	44
3.2.1	Tronco	44
3.2.2	Braços	55
3.2.3	Cabeça	59
3.3	Implementação da actuação passiva	61

3.4	Maquinação e materiais	63
4	Dimensionamento e Simulações	65
4.1	Dimensionamento	65
4.1.1	Dimensionamento estrutural	65
4.1.2	Dimensionamento dos servomotores	71
4.1.3	Dimensionamento dos actuadores passivos	77
4.2	Simulações	82
4.2.1	Tronco	82
4.2.2	Membros superiores	86
5	Conclusões	91
5.1	Conclusões	91
5.2	Trabalhos Futuros	95
A	Instalação do Sistema Operativo	97
A.1	Pré-requisitos	97
A.2	Criação imagem USB	99
A.3	Instalação Lubuntu	100
A.4	Pós-Instalação	103
B	Resultados Simulação Numérica	107
C	Desenho dos Componentes	123
C.1	Membros Superiores	123
C.2	Cabeça	126
C.3	Tronco	127
D	Dados Inerciais	133
	Referências	137

Lista de Figuras

1.1	Músicos autômatos de Al-Jazari	3
1.2	Modelo baseado no robô de Leonardo da Vinci	4
1.3	Autômatos de Jacques de Vaucanson	5
1.4	Autômatos de Pierre e Henry-Louis	5
1.5	Steam Man	6
1.6	Electric Man	6
1.7	Robô <i>ELEKTRO</i> de 1938	6
1.8	Robô <i>WASUBOT</i> de 1985	6
1.9	Série Waseda Legged WL-1 a WL-5	7
1.10	Série Waseda Legged WL-9DR a WL-16	7
1.11	Série <i>WABIAN</i>	8
1.12	Plataforma humanóide da <i>Honda</i>	8
1.13	Robô humanóide da <i>NASA</i> Robonaut-R2	9
1.14	Robô ARMAR III e a sua cadeia cinemática	10
1.15	Vista da articulação do ombro	12
1.16	Vista da junta do tronco	12
1.17	Posição anatômica do corpo humano	13
1.18	Planos e lados anatômicos	14
1.19	Eixos anatômicos	14
1.20	Lados anatômicos	15
1.21	Graus de Liberdade de um corpo rígido	16
1.22	Coluna vertebral	16
1.23	Movimentos de flexão extensão e de hiperextensão do tronco	17
1.24	Movimentos de flexão lateral e rotação do tronco	18
1.25	Articulação do ombro	18
1.26	Movimentos de flexão extensão e de hiperextensão do ombro	19
1.27	Movimentos de abdução e adução do ombro	20
1.28	Movimentos de rotação lateral e medial do ombro	20
1.29	Movimentos de elevação e depressão do ombro	21
1.30	Movimento de circundução do ombro	21
1.31	Articulação do cotovelo esquerdo	22
1.32	Movimentos de flexão e extensão do cotovelo	23
1.33	Movimentos de pronação e supinação do cotovelo	23
1.34	Articulação do pulso	24
1.35	Movimentos de flexão extensão e hiperextensão do pulso	24
1.36	Movimentos de abdução e adução do pulso	25

1.37	Movimento de circundação do pulso	25
1.38	Comprimento dos segmentos corporais	26
2.1	Robô humanóide desenvolvido	30
2.2	Cadeias cinemáticas	30
2.3	Imagem do tronco montado	31
2.4	Desenhos CAD 3D da montagem tronco	31
2.5	Pé desenvolvido	31
2.6	Robô humanóide desenvolvido em 2009 e respectiva cadeia cinemática	32
2.7	Articulação do pé	33
2.8	Rotação da perna	33
2.9	Sensores de força no pé	33
2.10	Rotação longitudinal do tronco	33
2.11	Método de ajuste do entre-eixo	34
2.12	Junta universal	34
2.13	Implementação da actuação passiva no joelho.	35
2.14	Sistema de ajuste de tensão na correia tornozelo	36
2.15	Flexão do eixo servo junta joelho	36
2.16	Esticador do joelho	37
2.17	Esticador do tornozelo	37
2.18	Componentes do esticador do tornozelo	37
2.19	Componentes do esticador do joelho	38
2.20	Sistema completo do tornozelo	38
2.21	Sistema completo do joelho	38
3.1	Dimensões das pernas e comprimentos dos segmentos corporais	40
3.2	Dimensões do PC-104 e representação do módulo em CAD 3D	41
3.3	Atravancamento do módulo do PC-104	41
3.4	Dimensões da perna	42
3.5	Bateria Turnigy®	43
3.6	Junta do tronco previamente desenvolvida	44
3.7	Montagem da junta do tronco	45
3.8	Sistema de correcção da junta do tronco	45
3.9	Amplitudes dos movimentos do tronco	46
3.10	Esboço do tronco	46
3.11	Suporte do tronco final	47
3.12	Laterais e topo tronco final	47
3.13	Integração da estrutura	48
3.14	Amplitudes da inclinação lateral	48
3.15	Componentes suporte tronco	48
3.16	Junta da inclinação lateral	49
3.17	Vista explodida do actuador para inclinação lateral	50
3.18	Estrutura completa do tronco	50
3.19	Vista explodida da acomodação actuador ombro	51
3.20	Vista isométrica da acomodação actuador ombro	52
3.21	Vista explodida e de conjunto do módulo de processamento	52
3.22	Montagem final do tronco	53

3.23	Vista explodida e de conjunto do módulo das baterias	54
3.24	Montagem final no tronco	54
3.25	Componentes da estrutura do braço e suporte servomotor ombro	55
3.26	Sistema de rotação do braço	56
3.27	Suporte para a junta universal para a articulação do cotovelo	57
3.28	Braço completo	57
3.29	Montagem final dos braços no tronco	58
3.30	Vista explodida cabeça	59
3.31	Montagem completa da cabeça com as duas camaras	60
3.32	Montagem completa do tronco do robô humanóide	60
3.33	Elementos da actuação passiva	61
3.34	Actuação dos elementos passivos e limites de hiperextensão	62
3.35	Alteração na actuação dos elementos passivos	62
3.36	Funcionamento da nova configuração de fixação	63
3.37	Fresadora CNC	64
4.1	Comprimento dos segmentos corporais	66
4.2	Pélvis e eixo da anca do robô humanóide	67
4.3	Comprimentos finais do robô humanóide	68
4.4	Graus de liberdade do ombro	70
4.5	Graus de liberdade do cotovelo	70
4.6	Graus de liberdade do pulso	70
4.7	Graus de liberdade da cabeça	70
4.8	Graus de liberdade do tronco	70
4.9	Movimentos de flexão/extensão e de abdução/adução do ombro	73
4.10	Movimento de rotação do ombro	73
4.11	Movimento de flexão/extensão do cotovelo	74
4.12	Movimentos de flexão/extensão e de rotação da cabeça cotovelo	74
4.13	Movimento de flexão/extensão do tronco	75
4.14	Movimento de inclinação lateral do tronco	75
4.15	Posições do centro massa: inicial e final	78
4.16	Diagramas de corpo livre	78
4.17	Posições do centro massa: inicial e final	79
4.18	Diagramas de corpo livre	80
4.19	Componentes de suporte do tronco	82
4.20	Definição das condições impostas: base posterior	83
4.21	Resultado dos deslocamentos da base posterior. Vista isométrica	83
4.22	Campo de tensões da base posterior	84
4.23	Definição das condições impostas: base anterior	84
4.24	Resultado dos deslocamentos da base anterior. Vista isométrica	85
4.25	Campo de tensões da base anterior	85
4.26	Suporte servomotor ombro e elementos de rotação do antebraço	86
4.27	Definição das condições impostas: suporte servo	87
4.28	Resultado dos deslocamentos do componente do braço	87
4.29	Campo de tensões do componente de suporte do servomotor	87
4.30	Definição das condições e resultado dos deslocamentos do componente	88
4.31	Campo de tensões do componente de suporte do servomotor	89

4.32	Definição das condições e resultado dos deslocamentos do componente	90
4.33	Campo de tensões do componente de rotação do braço	90
5.1	Estrutura desenvolvida do robô humanóide	92
5.2	Estrutura desenvolvida do robô humanóide	93
5.3	Sistema actuação passiva desenvolvido	94
5.4	Estrutura desenvolvida do robô humanóide	95
A.1	PC-104	98
A.2	Placa expansão do PC-104	98
A.3	Unetbootin	99
A.4	Seleção de opções	100
A.5	Fim da criação da imagem USB	100
A.6	Menu selecção idioma	101
A.7	Menu configuração instalação.	101
A.8	Menu configuração disco	102
A.9	Menu selecção fuso horário	102
A.10	Menu selecção disposição teclado	102
A.11	Menu configuração utilizador	103
A.12	Instalação sistema operativo	103
A.13	Ambiente gráfico LXDE	104
A.14	Gestor de Actualizações	105
A.15	Menu selecção camara	106
A.16	Ambiente de visualização	106
B.1	Campo de deslocamentos da base posterior. Vista de frente	107
B.2	Deformada da base posterior	107
B.3	Campo de tensões da base posterior	108
B.4	Campo de deslocamentos da base anterior. Vista de frente	108
B.5	Deformada da base anterior	109
B.6	Campo de tensões da base anterior	109
B.7	Campo de deslocamentos e deformada do componente do braço	110
B.8	Campo de tensões do componente do braço	111
B.9	Campo de deslocamentos e deformada do componente do braço	112
B.10	Campo de tensões do componente do braço	113
B.11	Definição das condições impostas e campo de deslocamentos do componente do braço	114
B.12	Deformada do componente do braço	114
B.13	Campo de tensões do componente do braço	114
B.14	Campo de tensões do componente do braço	115
B.15	Definição das condições impostas e campo de deslocamentos do componente do braço	115
B.16	Deformada do componente do braço	115
B.17	Campo de tensões do componente do braço	116
B.18	Campo de tensões do componente do braço	116
B.19	Campo de deslocamentos do componente do braço	117
B.20	Deformada do componente do braço	117

B.21	Campo de tensões do componente do braço	117
B.22	Campo de tensões do componente do braço	118
B.23	Campo de deslocamentos do componente do braço	118
B.24	Deformada do componente do braço	118
B.25	Campo de tensões do componente do braço	119
B.26	Campo de tensões do componente do braço	119
B.27	Campo de deslocamentos e deformada do componente do braço	120
B.28	Campo de tensões do componente do braço	121
B.29	Campo de deslocamentos e deformada do eixo de rotação do ombro	121
B.30	Campo de tensões do componente de rotação do braço	122
B.31	Campo de deslocamentos e deformada do eixo de rotação do ombro	122
B.32	Campo de tensões do componente de rotação do braço	122
C.1	Suportes dos servomotores do ombro do pulso e do cotovelo	123
C.2	Componente da junta ombro	124
C.3	Componente da junta cotovelo	124
C.4	Apoio do eixo do servomotor	124
C.5	Caixa do rolamento KT 8118N	124
C.6	Apoio superior e inferior do servomotor	124
C.7	Suporte do servomotor e veio rotação do antebraço	125
C.8	Caixa do rolamento NTB 1226	125
C.9	Ligador dos suportes no braço	125
C.10	Veio de extensão do ombro	125
C.11	Caixa do rolamento KT 2226	125
C.12	Estrutura de base da cabeça	126
C.13	Estrutura de tilt	126
C.14	Estrutura de suporte e fixação do servomotor de tilt	126
C.15	Estrutura de pan da cabeça	126
C.16	Componentes anterior e posterior da base do tronco	127
C.17	Componentes laterais esquerda e direita da base do tronco	127
C.18	Elemento de ligação de componentes	127
C.19	Exterior esquerdo e interior direito dos componentes laterais do tronco	128
C.20	Elemento da parte de cima do tronco	128
C.21	Elemento de suporte do PC-104	129
C.22	Elemento de suporte à estrutura do PC-104	129
C.23	Elemento de suporte das baterias	130
C.24	Componente central de suporte das baterias	130
C.25	Componente lateral de suporte das baterias	131
C.26	Elemento de fixação das baterias	131

Lista de Tabelas

1.1	Graus de liberdade da parte superior do corpo	11
1.2	Amplitudes dos movimentos para cada grau de liberdade	11
2.1	Graus de liberdade do robô humanóide	30
2.2	Graus de liberdade dimensionados	32
3.1	Características da bateria Turnigy	43
4.1	Comparação entre comprimentos dos segmentos	67
4.2	Comparação entre alturas em relação ao chão	68
4.3	Comparação das amplitudes de movimentos	69
4.4	Resultados dos cálculos efectuados para cada junta	76
4.5	Comparação de binários para cada junta	77
4.6	Resultados dos cálculos efectuados para k	81
D.1	Dados do dimensionamento dos actuadores passivos	133
D.2	Dados do dimensionamento dos actuadores passivos	134

Capítulo 1

Introdução

*A imaginação é mais importante que o conhecimento.
O conhecimento é limitado. A imaginação envolve o mundo.*

Albert Einstein

Neste capítulo são apresentados os objectivos pretendidos com este trabalho.

Será feita uma pequena introdução à origem da robótica e à necessidade de evolução das plataformas humanóides, bem como quais os objectivos pretendidos com essa evolução.

Será também feita uma análise a trabalhos realizados por empresas dedicadas à pesquisa e desenvolvimento de robôs, assim como a trabalhos de investigação de algumas universidades espalhadas pelo mundo. Será também realizada uma descrição de alguns conceitos de biomecânica fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação.

Na secção 1.10 é descrita a forma como esta tese se encontra organizada.

1.1 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é desenvolver e construir o tronco e membros superiores de uma plataforma humanóide iniciada anteriormente. O tronco deverá permitir a acomodação das unidades de processamento necessárias bem como elementos adicionais, tais como baterias, unidades de distribuição de energia, etc.

Para além dos membros superiores, o sistema a desenvolver deverá prever a extensão para a cabeça com uma unidade de "pan&tilt" para suportar uma unidade de visão prevista para o futuro.

Durante a concepção mecânica e estrutural deverá ter-se em conta os esforços, potências e características dos actuadores a usar. Estes deverão ser escolhidos em função dos requisitos e especificações de movimentação, utilizando para o efeito ferramentas computacionais de simulação adequadas.

É igualmente objectivo fazer a sua integração no sistema global já desenvolvido, respeitando as premissas antropométricas de semelhança as do ser humano, embora numa escala inferior e dos princípios do sistema de actuação híbrido onde se julgar necessário, para assim manter o compromisso de criar uma estrutura ágil e energeticamente mais eficiente.

1.2 Enquadramento

Desde o nascimento, o ser humano sente uma enorme necessidade em compreender-se a si mesmo e aquilo que o rodeia, de uma forma por vezes obsessiva e quase inexplicável. Talvez por sermos animais sociais, sintamos essa ânsia de desenvolver certas características por forma a sermos compreendidos por nós mesmo e pelos outros. Muitas vezes, somos caracterizados como sendo exímios observadores, apegados a características que nos definem, como por exemplo as feições do rosto, o som da nossa voz, ou mesmo a forma e aos movimento do nosso corpo. [1]

Não existe uma só explicação à qual possamos atribuir a necessidade do desenvolvimento de robôs humanóides. No entanto, alguns autores caracterizam-na como sendo o sonho inato do engenho humano [2] na criação de um ser artificial que imite, ou que seja inspirado nas muitas habilidades e capacidades humanas. Outros autores acreditam que o desenvolvimento de plataformas humanóides estão directamente relacionadas com a necessidade de se desenvolver robôs capazes de coexistir socialmente com os humanos na realização de diversas tarefas [3].

Por outro lado, muitos robôs tem sido desenvolvidos como sendo objectos de entretenimento capazes de dançar, falar e cantar. Exemplo desse desenvolvimento, é a utilização de robôs humanóides em parque de diversões da Disney, onde estes reproduzem movimentos de tal forma realistas que por vezes são difíceis de se distinguir [1].

É possível também incluir aspectos económicos, tais como, a redução de custos associados com a utilização de seres humanos na realização de certas tarefas quando podem ser facilmente substituídos por robôs, como um factor de evolução no desenvolvimento de novas estruturas. Mas, acima de tudo, foi e será a capacidade do ser humano de poder imaginar e criar mundos de fantasia onde não existam barreiras nem limites ao que é possível desenvolver e, posteriormente trazer-los para a realidade, o grande dinamizador do desenvolvimento das estruturas humanóides.

1.3 Definição

A palavra robô, tem a sua origem na palavra Checa *robot*, que significa trabalho forçado ou servidão. O termo "robô" foi introduzido pelo escritor Checo Karel Čapek na sua produção "Rossum's Universal Robots" em 1920, onde os robôs eram interpretados por actores humanos, e lidavam com os problemas da escravidão e da subjugação, que eram metáforas para as preocupações dos trabalhadores humanos no dia-a-dia [4].

Outro termo que também foi introduzido por um escritor de ficção científica foi o de robótica, em 1942 por Isaac Asimov, na sua obra *Runaround*, onde caracterizou a robótica como sendo uma ciência. Além da introdução do termo robótica, Asimov contribuiu para a área da robótica com introdução das três leis da robótica que ainda hoje perduram [5].

A definição do termo robô humanóide não é consensual no seio da comunidade da robótica e como tal, não existe uma condição específica de como se pode caracterizar um robô como sendo ou não humanóide. Segundo B. Wilcox *et al.* [4], os humanóides são máquinas que detêm forma ou funções humanas. Isto significa que o autor considera como principal característica na definição de robôs humanóides apenas a sua forma. Já outros autores afirmam que para além das formas e pareças humanas, os humanóides têm de ser capazes de desempenhar várias acções complexas, como andar e falar [5], ou serem capazes de se adaptar a mudança do ambiente que o rodeia e ainda assim cumprirem os seus objectivos [6].

1.4 Evolução dos Robôs Humanóides

Ao longo da história existiram grandes mentes cuja imaginação, aliada ao seu engenho, permitiu atingir aquilo a que actualmente é conhecido pelo campo da robótica humanóide. Esta evolução é notória desde a criação dos primeiros engenhos que, de certa forma, tentavam imitar os movimentos dos seres humanos na realização de certas tarefas, até a actualidade onde é possível constatar que sistemas mecânicos de elevada complexidade são capazes de andar, ou dançar.

Esta secção tem o objectivo de dar a conhecer algumas dessas mentes, e o seu respectivo trabalho.

Humanóides na Antiguidade

As origens da construção dos primeiros humanóides remonta à China no século III a.C. onde nos textos de Lie Zi é descrito um encontro supostamente ocorrido muitos anos antes entre o Rei Mu da dinastia de Zhou (947-928 a.C.) e o artesão Yan Shi. Yan Shi terá apresentado ao rei uma figura humana que era capaz de caminhar, de cantar e de dançar, em resposta as solicitações do seu criador [7].

Outro autor cujo trabalho na área engenharia mecânica é bastante conhecido é o do inventor árabe Ismail Al-Jazari (1136-1206). Al-Jazari é bastante conhecido devido à sua variedade de invenções, que vão desde a criação de mecanismos de elevação de água, a relógios a fontes e autómatos. O seu maior contributo na área dos humanóides foi a criação de um barco com quatro músicos autómatos (Figura 1.1). O mecanismo de accionamento era composto por um cilindro rotativo com pinos que posteriormente accionava alavancas que faziam com que os músicos actuassem [8].



Figura 1.1: Músicos autómatos de Al-Jazari. [8]

Humanóides nos Séculos XIV a XIX

Apesar de ter sido descrito um grande número de autómatos desde a antiguidade, foi apenas no século XIV que este trabalho começou a ser mais notório. Tal deve-se a grandes inventores como Leonardo da Vinci.

Leonardo da Vinci (1452-1519) terá sido talvez um dos maiores génios que a humanidade conheceu devido ao seu grande talento nas mais diversas áreas como a pintura, a escultura, a engenharia, a anatomia, entre muitas outras. Reconhecido pelos mais diversos trabalhos, desde a famosa pintura de Mona Lisa ou d'A Última Ceia, bem como o desenho do Homem Vitruviano. Em 1495 Leonardo projectou um mecanismo humanóide (Figura 1.2) que supostamente era capaz de andar, sentar-se, mexer os braços, e de mexer a cabeça enquanto abria e fechava a boca [6].



Figura 1.2: Modelo baseado no robô de Leonardo da Vinci. [9]

No século XVIII assistiu-se a um período muito produtivo no desenvolvimento de autómatos capazes de executar movimentos semelhantes aos dos seres humanos, mas no entanto foi apenas no século XIX que muito deste desenvolvimento se materializou [6].

Durante esta era, um dos inventores mais influentes foi Jacques de Vaucanson (1709-1782), que, em 1738, apresentou à Academia de Ciências três dos seus trabalhos (Figura 1.3). Estes trabalhos apresentados eram compostos por um tocador de flauta, um pato e um tocador de tambor. Ambos os músicos tocavam os instrumentos de forma semelhante ao ser humano, o pato era reconhecido por ser o primeiro automatismo capaz de simular a digestão da sua comida [10].

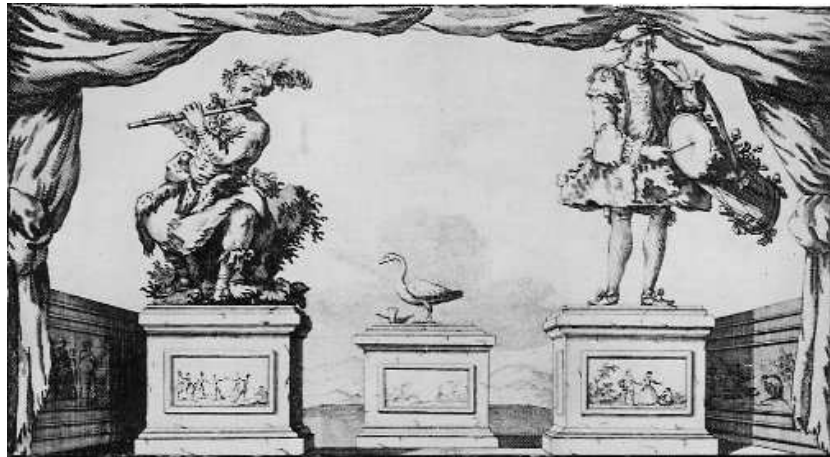


Figura 1.3: Autómatos de Jacques de Vaucanson. [11]

Em 1773, Pierre Jaquet-Droz e Jean Frédéric foram os responsáveis pelo desenvolvimento e criação dos primeiros mecanismos capazes de escrever (Figura 1.4 à direita), desenhar (Figura 1.4 à esquerda), e tocar música (Figura 1.4 ao centro), tendo este último sido obra do filho de Pierre, Henry-Louis [10].



Figura 1.4: Autómatos de Pierre e Henry-Louis. [12]

A história dos humanóides no século XIX fica essencialmente marcada pelo aparecimento do *Steam Man* e do *Electric Man*. O *Steam Man* surge do trabalho de Zadoc P. Dederick e de Isaac Grass, que em 1868 desenvolveram e construíram um homem mecânico movido a vapor que puxava uma carroça (Figura 1.5) [13]. O *Electric Man* (Figura 1.6) surgiu em 1885 pelas mãos de Frank Reade Junior, e trata-se da versão eléctrica do *Steam Man* com algumas modificações [6].



Figura 1.5: Steam Man. [14]

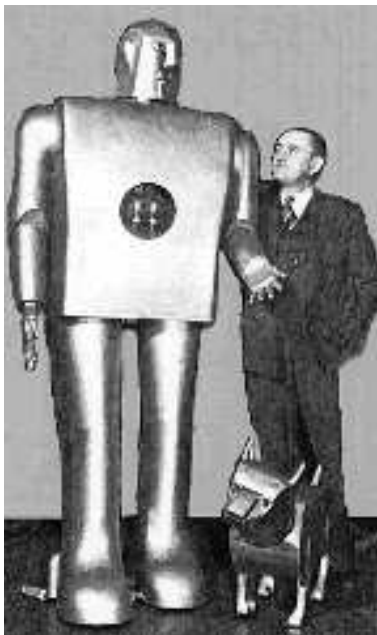


Figura 1.6: Electric Man. [14]

Humanóides na Actualidade

Foi no século XX que se deu a explosão no desenvolvimento de humanóides, tendo surgido inúmeras plataformas com capacidades extraordinárias. No entanto, nesta parte serão apenas mostradas algumas das mais importantes e cuja contribuição e desenvolvimento originou o aparecimento de ainda mais plataformas.

O primeiro robô humanóide da era moderna surgiu em 1938 e chamava-se *ELEKTRO* (Figura 1.7). Este robô foi desenvolvido pela sociedade Westinghouse e simulava o andar, falar e fumar [6].

Figura 1.7: Robô *ELEKTRO* de 1938. [15]Figura 1.8: Robô *WASUBOT* de 1985. [16]

Em 1967 surgiu no Japão uma plataforma humanóide desenvolvida na Universidade de Waseda por Ichiro Kato. O trabalho desenvolvido por Ichiro Kato centrou-se essencialmente na área da locomoção bípede, contudo também ficou conhecido pelo seu trabalho na construção de um robô, o WASUBOT (Figura 1.8), que era capaz de ler e tocar uma partitura num sintetizador [16]. O trabalho desenvolvido por esta universidade ao longo dos anos pode ser dividido em duas séries, a série Waseda Legged (WL) e a série WABIAN. A série WL (figuras 1.9 e 1.10) teve início em 1967 com o primeiro modelo o WL-1, e como último modelo o WL-16 em 2004.

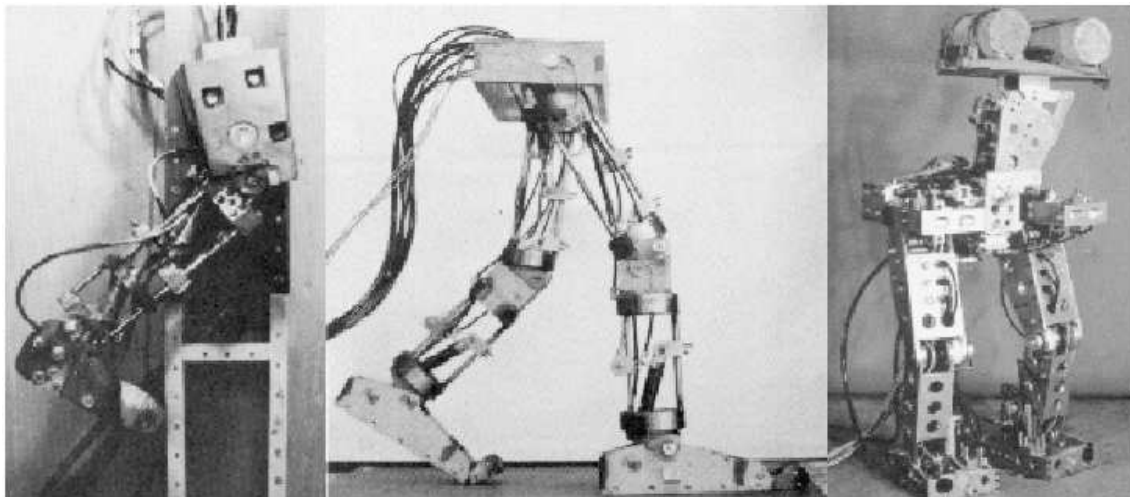


Figura 1.9: Série Waseda Legged - WL-1 (1967) WL-3 (1969) WL-5 (1971) [17]

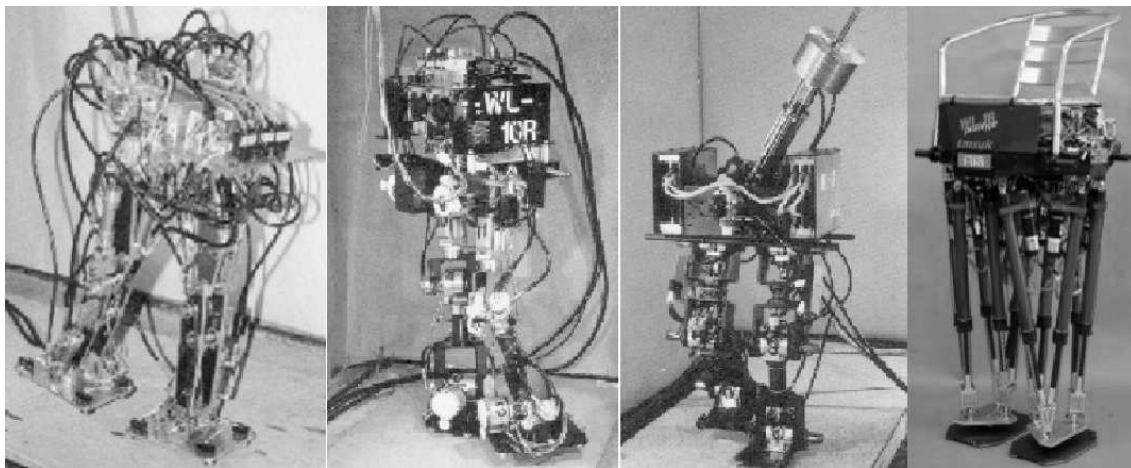


Figura 1.10: Série Waseda Legged - WL-9DR (1979) WL-10R (1983) WL-12 (1986) WL-16 (2004) [17]

A série WABIAN (Figura 1.11) começou a ser desenvolvida em 1996, e consistia na criação de um robô à escala humana com 35 graus de liberdade que conseguisse caminhar à mesma velocidade que um ser humano. O modelo mais recente desta série é o WABIAN-2R e é composto por 41 graus de liberdade com uma altura de 1,5 metros e 64 quilogramas.

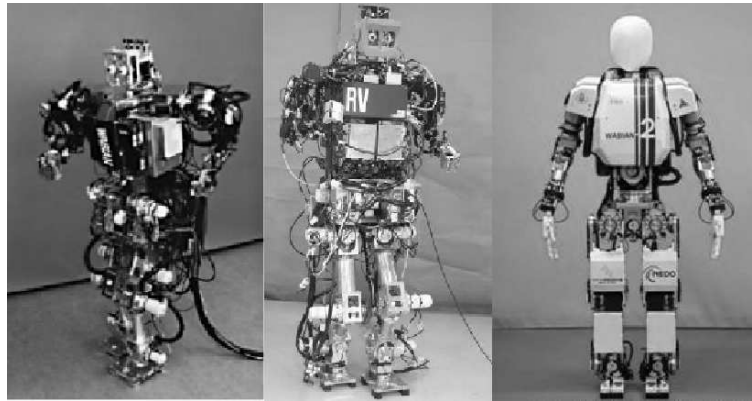


Figura 1.11: Série *WABIAN* - *WABIAN* (1996) *WABIAN-RV* (2000) *WABIAN-2R* (2006) [17]

Também no Japão, surgiu uma outra plataforma humanóide que estava a ser desenvolvida pela Honda. O seu primeiro humanóide, a versão o E0, surgiu em 1986, tinha um total de 6 graus de liberdade, pesava cerca 16,5 quilogramas e era capaz de caminhar. A série E foi concluída em 1993 com a versão E6, que tinha 12 graus de liberdade e pesava cerca de 150 quilogramas; contudo, a velocidade de marcha atingida por este modelo era bastante inferior à conseguida em outros modelos dessa série. No mesmo ano surgia a versão P1, um humanóide com 1,91 metros de altura e pesando 175 quilogramas, capaz de desenvolver velocidades de marcha na ordem dos 2 quilómetros por hora, graças aos seus 30 graus de liberdade. A série P foi concluída em 1997 com a construção do modelo P3 [6].

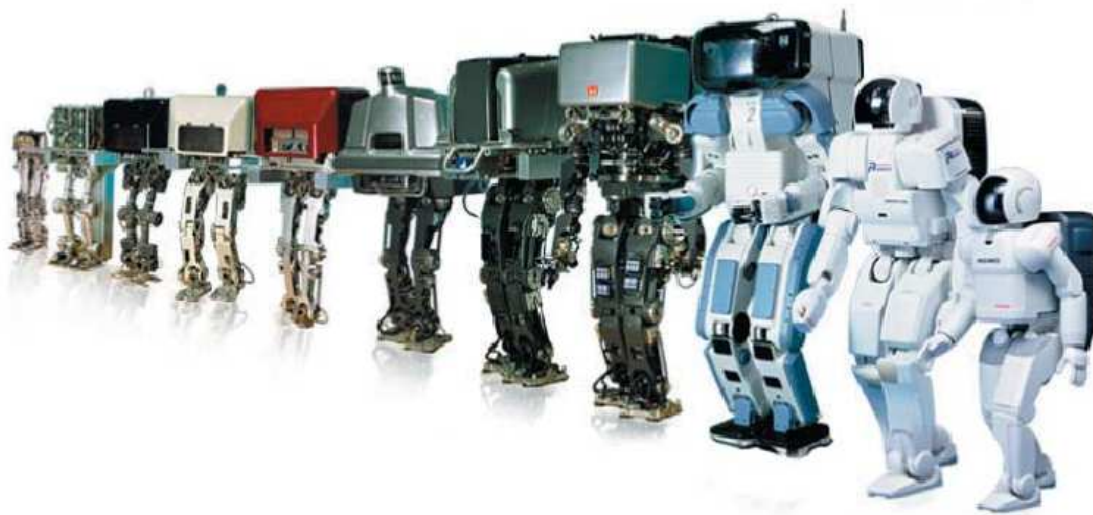


Figura 1.12: Plataforma humanóide da *Honda* desde o E0 ao ASIMO (2000) [18]

Em 2000 surgiu a primeira versão do que talvez seja o humanóide mais conhecido em todo o mundo: o ASIMO. Esta versão era composta por um total de 26 graus de liberdade permitindo alcançar velocidade de marcha na ordem dos 1,6 quilómetros por hora e uma velocidade de

corrida de cerca de 6 quilómetros por hora. A versão actual do ASIMO apareceu em 2005 e é composta por uma estrutura que comporta 34 graus de liberdade, pesando um total de 54 quilogramas com uma altura de 1,3 metros. Esta última versão consegue atingir velocidades de marcha na ordem dos 2,7 quilómetros por hora [6].

No que concerne a tronco e membros de um robô humanóide, o desenvolvimento destas estruturas tem tido pouca evolução, a maioria dos braços humanóides encontrados tem menos de seis graus de liberdade e a sua utilização tem um propósito meramente estético [4]. No entanto tem vindo a aparecer alguns conceitos interessantes. Exemplo disso é o robô desenvolvido pela Toyota que é capaz de tocar violino com uma grande destreza, ou também o humanóide desenvolvido pela TOSY, uma empresa Vietnamita que desenvolveu e criou uma estrutura que é capaz de jogar ping pong.

O melhor exemplo que é possível mostrar no que respeita aos membros superiores é a plataforma Robonaut. Iniciada em 1997 pela NASA, esta plataforma tem como objectivo o auxílio a astronautas na realização de tarefas em ambiente extremamente perigosos como o espaço. O desenvolvimento desta plataforma culminou na construção do primeiro protótipo o Robonaut R1 em 2006. Em 2010 foi revelada uma nova versão o Robonaut R2 (Figura 1.13). Constituído por um total de 47 graus de liberdade, com uma altura aproximada de 1 metro e um peso total de cerca de 150 quilogramas, este robô era mais rápido e mais ágil que o seu antecessor [19].



Figura 1.13: Robô humanóide da NASA Robonaut-R2 [19]

1.5 Caso de Estudo

As estruturas humanóides modernas são normalmente divididas em duas grandes subestruturas, a estrutura superior do corpo e a estrutura inferior. Como é possível verificar da secção anterior existem diversos pólos de investigação que se centram apenas em desenvolver partes da estrutura dos humanóides, como o sistema de locomoção bípede, coordenação entre olho e mão. O resultado deste tipo de abordagem de investigação é a da excelência do trabalho específico final obtido [4].

Esta secção tem como objectivo mostrar alguns pormenores e conceitos apresentados em plataformas já desenvolvidas por outras entidades, e que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

ARMAR III

O robô ARMAR III (Figura 1.14), foi desenvolvido e construído no Institute of Product Development (IPEK) da Universidade de Karlsruhe na Alemanha, e foi apresentado em 2006.

Este robô é composto por um total de 45 graus de liberdade, e encontra-se dividido em uma estrutura superior do corpo, e uma plataforma holonómica para locomoção. Na estrutura superior do corpo encontram-se integrados os módulos correspondentes aos dois braços, incluindo o pulso e a mão, e as articulações do pescoço, tórax e tronco [20].

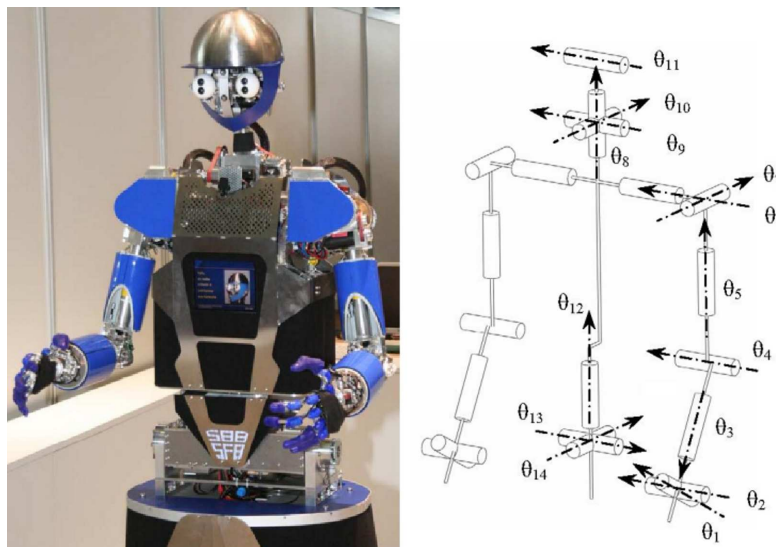


Figura 1.14: Robô ARMAR III e a sua cadeia cinemática. [20]

A envergadura e o espaço de trabalho deste robô são similares aos de um ser humano com cerca de 1,75 metros de altura. A Tabela 1.1 mostra o número de graus de liberdade correspondentes a cada uma das juntas enquanto que a Tabela 1.2 indica os limites máximos para cada junta.

Os três graus de liberdade no ombro permitem uma grande variedade de movimentos, e em conjunto com os dois graus de liberdade existentes no cotovelo e no pulso, o braço pode ser usado na execução de diversas tarefas complexas [20].

Tabela 1.1: Graus de liberdade da parte superior do corpo

Graus de Liberdade			
Componente	G.d.L.	Qtd	Total
Pulso	2	2	4
Cotovelo	2	2	4
Ombro	3	2	6
Pescoço	4	1	4
Tronco	3	1	3
Parte Superior			21

Tabela 1.2: Amplitudes dos movimentos para cada grau de liberdade

Alcance Movimentos		
Pulso	θ_1	-30° a 30°
	θ_2	-60° a 60°
Cotovelo	θ_3	-90° a 90°
	θ_4	-10° a 150°
Ombro	θ_5	-180° a 180°
	θ_6	-45° a 180°
	θ_7	-10° a 180°
Pescoço	θ_8	-180° a 180°
	θ_9	-45° a 45°
	θ_{10}	-45° a 45°
	θ_{11}	-60° a 60°
Tronco	θ_{12}	-180° a 180°
	θ_{13}	-15° a 60°
	θ_{14}	-20° a 20°

Os motores e transmissões de todas as articulações deste humanóide foram desenhados por forma a que as suas contribuições para a inércia sejam as menores possíveis. Como é mostrado na Figura 1.15, a unidade responsável pela flexão/extensão do braço (ROT1) encontra-se directamente fixa ao tronco. Isto deve-se ao facto de ser esta a unidade que necessita de fornecer o maior binário, reduzindo assim a sua contribuição para a inércia. A unidade de abdução/adução do braço (ROT2) e a unidade de supinação/pronação (ROT3) foram colocadas perto dos seus eixos de rotação para melhorar a dinâmica da articulação do ombro. Nesta articulação foram usadas transmissões harmónicas, parafuso sem fim e transmissões por correias dentadas.

A articulação do cotovelo é composta por dois graus de liberdade; os motores desta articulação encontram-se situados não no braço mas sim no tórax do robô. Este tipo de implementação permite uma redução da massa do braço assim como uma redução do espaço ocupado. A transmissão é realizada por intermédio de cordas, que vão desde o tórax, passando pelo ombro chegando ao cotovelo. Na articulação do pulso existem também dois graus de liberdade; os motores para esta articulação estão situados no antebraço e a transmissão é efectuada ou por uma correia dentada ou por cordas.

No design do tórax foi considerada a optimização do arranjo dos componentes mecânicos e eléctricos, como a inclusão dos quatro motores referentes as articulações do ombro, bem

como a inclusão de duas unidades de processamento baseado em PC-104, quatro Módulos Universais de Controlo (*UCoM - Universal Controller Modules*), conversores A/D e DC/DC, e também sensores inerciais.

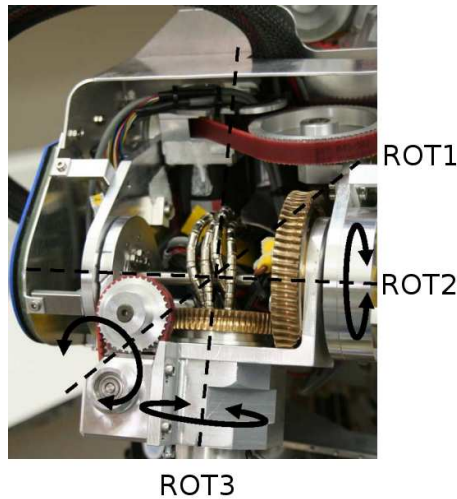


Figura 1.15: Vista da articulação do ombro. [20]

O tronco do ARMAR III encontra-se dividido em duas partes, o tórax e a junta do tronco abaixo dele. Esta junta (Figura 1.16), permite o movimento de toda a estrutura superior, relativamente à plataforma holonómica. Na junta do tronco também são usados motores eléctricos, para uma actuação homogénea, em conjunto com transmissões harmónicas, à excepção da Rot.2, onde é usada uma transmissão por correia dentada.

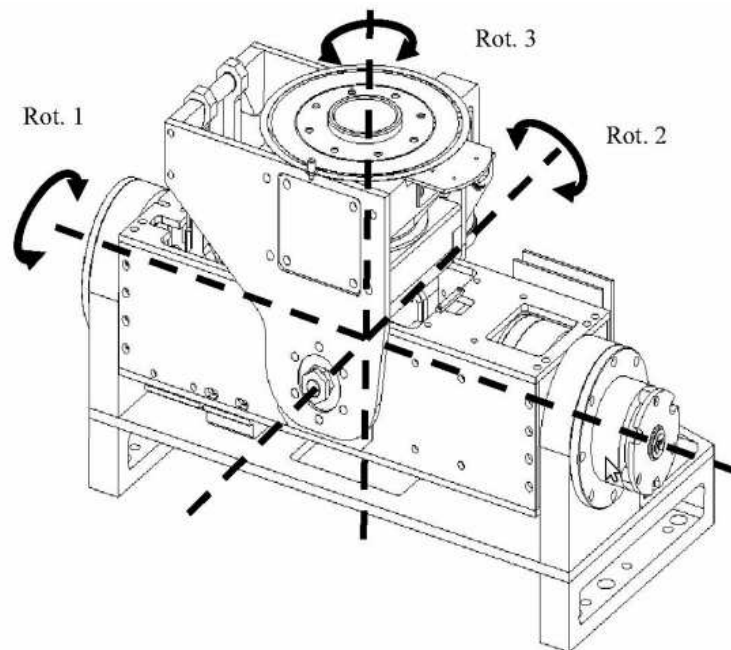


Figura 1.16: Vista da junta do tronco. [20]

1.6 Anatomia do corpo Humano

Existe uma necessidade de compreender o comportamento do corpo humano, relativamente aos seus movimentos, aos seus limites, ao modo como as articulações que, em conjunto com determinados músculos, proporcionam os movimentos que nós seres humanos utilizamos no nosso dia-a-dia, sem que muitas vezes nos sejam perceptíveis, para realizarmos uma grande variedade de tarefas, ou mesmo por forma a interagir com o ambiente que nos rodeia.

Se pretendemos criar uma estrutura robótica que seja capaz de realizar uma parte daquilo que nós, seres humanos, conseguimos, surge então a necessidade de efectuar um levantamento de alguns aspectos do corpo humano, como as dimensões, geometrias, etc, que sejam passíveis de se recriar mecanicamente. Ao enverdar-se por este caminho está-se a entrar numa área que conjuga dois campos bastante importantes, a biologia e a mecânica, sendo o resultado o campo da biomecânica. A biomecânica é assim o campo responsável pelo estudo dos sistemas mecânicos naturais dos seres vivos.

Assim, compreendendo a dinâmica da estrutura humana, pode então desenvolver-se uma estrutura humanóide, que corresponda o mais fielmente a uma imitação do ser humano no que respeita as proporções, rigidez e flexibilidade.

1.7 Termos e definições anatómicas

1.7.1 Posição anatómica

Por forma a evitar a ambiguidade e garantir a precisão da descrição e posições das estruturas do corpo humano, anatomistas e médicos concordaram na utilização de uma linguagem padronizada. Esta linguagem permite descrever qualquer movimento ou elemento corporal, tendo como referência uma certa posição do corpo, a essa referência foi dado o nome de posição anatómica (figura 1.17) e é caracterizada como sendo a posição em que o corpo se encontra em pé, erecto e voltado para a frente. Os braços encontram-se estendidos, ao lado, com os dedos unidos e as palmas das mão voltadas para frente. Os pés encontram-se ligeiramente afastados, e em conjunto com as pernas e dedos, encontram-se voltados para a frente [21,22].

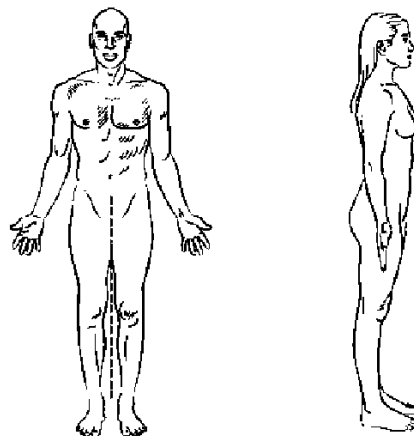


Figura 1.17: Posição anatómica do corpo humano. [23]

1.7.2 Planos anatómicos

Definida uma posição de referência, surge a necessidade de se criarem planos, imaginários, de forma a se poder descrever uma estrutura anatómica. Assim temos os três seguintes planos:

- Plano Frontal
- Plano Sagital
- Plano Transverso

O plano mediano ou sagital, é o plano que atravessa longitudinalmente o corpo dividindo-o nas partes esquerda e direita, de referir que o plano sagital é um qualquer plano vertical paralelo ao plano mediano. O plano frontal é o plano ortogonal ao plano mediano que divide o corpo nas partes anterior (frente) e posterior (trás). O plano transverso é o plano ortogonal aos dois planos anteriores, e também é paralelo ao chão. Este plano divide o corpo nas partes superior e inferior [22]. A Figura 1.18, esquematiza os planos e lados referidos anteriormente.

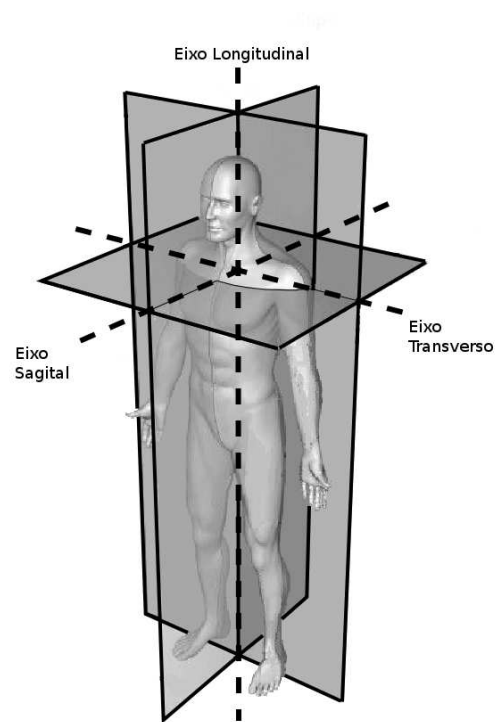
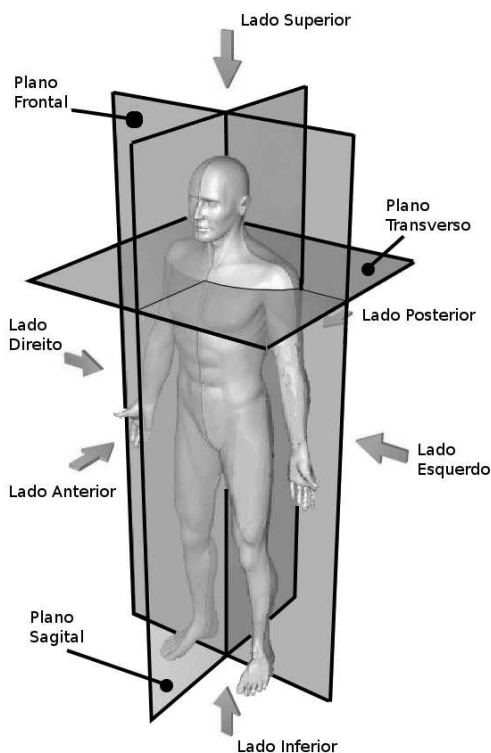


Figura 1.18: Planos e lados anatómicos. [22]

Figura 1.19: Eixos anatómicos. [22]

Da intersecção dos planos imaginários surgem os seguintes eixos anatómicos:

- Eixo Longitudinal
- Eixo Sagital
- Eixo Transverso

Estes eixos (Figura 1.19), estão orientados perpendicularmente ao plano que os define e têm como função a descrição do movimento dos segmentos anatómicos.

Para além destas convenções gerais, também são utilizados outros termos, lados, para que seja possível relacionar a posição entre segmentos anatómicos e a posição de outros segmentos ou a algum objecto externo. Os lados (Figura 1.20) de uma estrutura anatómica encontram-se divididos em dois grupos, que apenas diferem na sua relação ao plano principal. Consequentemente, temos os lados relativos ao plano sagital: o lado lateral e o lado medial, e os lados relativos ao plano transverso: o lado proximal e o lado distal.

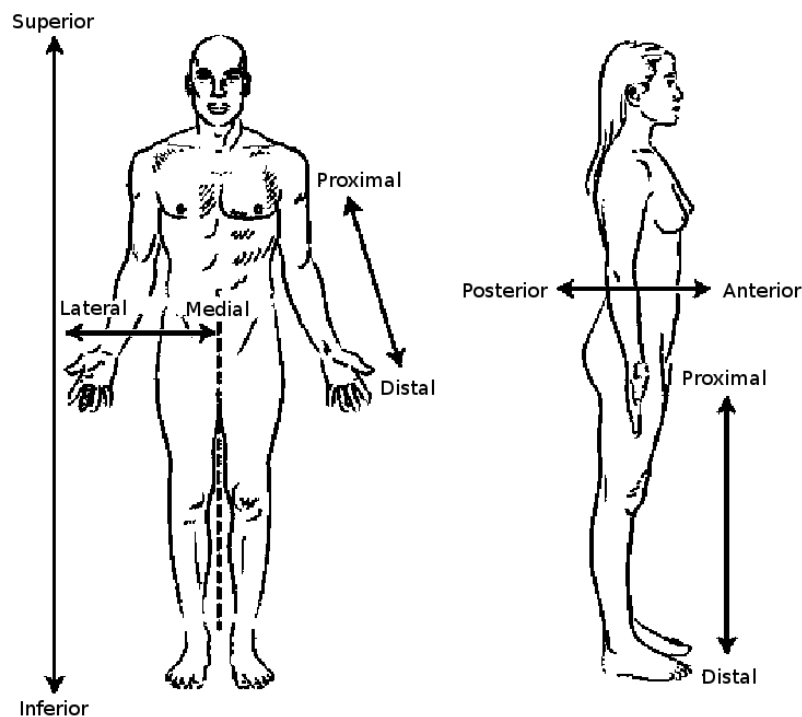


Figura 1.20: Lados anatómicos. [23]

1.8 Articulações

O corpo humano é constituído por diversas estruturas, sendo talvez o esqueleto uma das mais importantes pois é a estrutura que suporta todo o corpo. O esqueleto é por sua vez constituído por diversos ossos, cerca de 200 num adulto, que se encontram ligados através de articulações sinoviais, fibrosas e cartilaginosas [24].

São estas articulações que, em conjunto com o sistema muscular, proporcionam os movimentos que o nosso corpo é capaz de desenvolver. Para além disso as articulações também têm a função de transmitir forças entre os segmentos do corpo.

Graus de Liberdade

Um conceito inerente aos movimentos do corpo, em função das articulações, é o de grau de liberdade. Segundo *Frederic Miller*, "os graus de liberdade são o conjunto de deslocamentos

independentes e/ou rotações, que especificam completamente o deslocamento ou a posição deformada e a orientação do corpo ou sistema." [25]

Como tal, um corpo rígido possui um máximo de seis graus de liberdade, três translações e três rotações (Figura 1.21). Ao caracterizarmos sistemas constituídos por diversos corpos rígidos não existe a limitação de seis graus de liberdade, pois nestes casos é contabilizado o total do sistema. Outro aspecto importante é o de movimentos opostos, desde que sejam executados sobre o mesmo eixo, são considerados como tendo apenas um grau de liberdade.

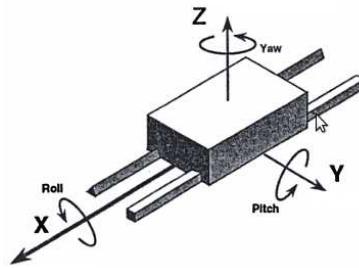


Figura 1.21: Graus de Liberdade de um corpo rígido. [26]

1.8.1 Coluna

A coluna vertebral, ou espinha dorsal (Figura 1.22) é caracterizada como sendo uma articulação curvilínea composta por diversos ossos ou vértebras. Normalmente é constituída por 33 segmentos vertebrais sobrepostos distribuídos por cinco grupos. A coluna cervical, a coluna dorsal, a coluna lombar, o sacro, e o cóccix. Os movimentos da coluna ocorrem devido à existência de três eixos de rotação, paralelos aos eixos anatómicos, em cada vértebra, sendo este movimento realizado nos discos intervertebrais.

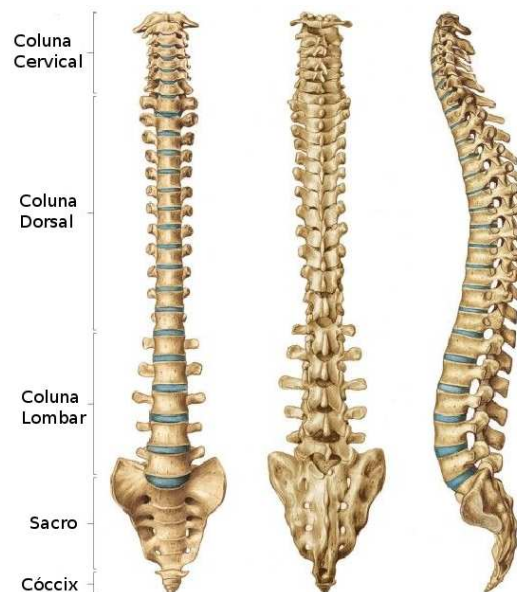


Figura 1.22: Coluna vertebral: Vistas anterior, posterior e lateral. [22]

Os movimentos que resultam da actuação dos músculos sobre as articulações são:

Flexão

O movimento de flexão (Figura 1.23) deve-se ao relaxamento do ligamento longitudinal anterior, enquanto as partes anteriores dos discos intervertebrais são comprimidas [22]. Este movimento é o resultado da soma de todas as pequenas rotações que ocorrem em todas as vértebras relativamente ao eixo paralelo ao eixo transversal. O valor máximo da amplitude na flexão do corpo é de 90° em relação ao plano frontal.

Extensão

No movimento de extensão (Figura 1.23) ocorre o oposto relativo ao movimento de flexão, além disso, existe ainda uma compressão nas fibras disciais posteriores [22]. Este movimento é também resultante da soma de todas as pequenas rotações que ocorrem em todas as vértebras, relativamente ao eixo paralelo ao eixo transversal. O valor máximo da amplitude na extensão do corpo é de 120° (inclui 30° de hiperextensão) em relação ao plano frontal.

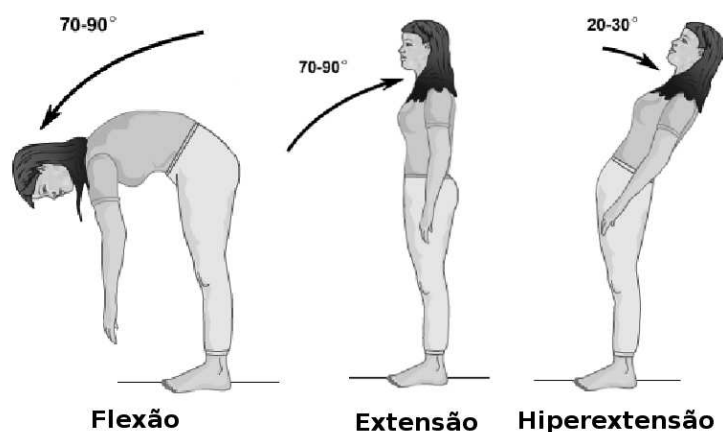


Figura 1.23: Movimentos de flexão extensão e de hiperextensão do tronco. [27]

Inclinação ou Flexão Lateral

O movimento de flexão lateral (Figura 1.24) é a combinação de dois eixos rotacionais acoplados, onde os discos intervertebrais são comprimidos lateralmente, tensionados e alongados contra-lateralmente. Os movimentos ocorrem por toda a coluna, tendo maior incidência nas regiões cervicais e lombares [22]. O movimento ocorre sobre o eixo sagital, e tem uma amplitude máxima de 90° em relação ao plano sagital.

Rotação

A rotação do corpo (Figura 1.24) é o resultado da torção das vértebras, entre umas a as outras, além disso ocorre a deformação e torção dos discos que intervêm no movimento [22]. O movimento é realizado em torno do eixo longitudinal. O valor máximo da amplitude na rotação do corpo é de 90° em relação ao plano transversal.

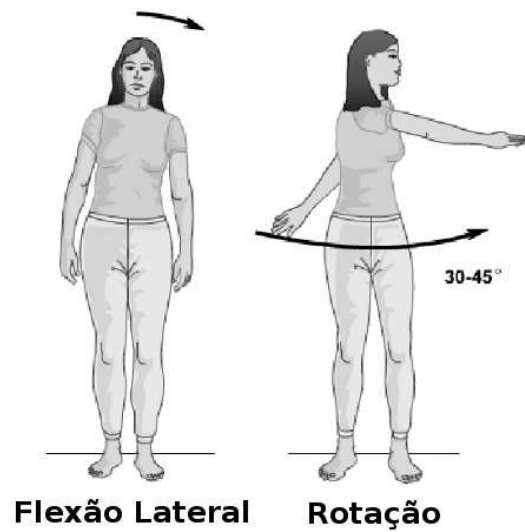


Figura 1.24: Movimentos de flexão lateral e rotação do tronco. [27]

1.8.2 Ombro

A articulação do ombro (Figura 1.25) é definida como sendo o grupo de estruturas que ligam o braço ao tórax. Os seus movimentos são o resultado da combinação de quatro articulações, a articulação gleno-umeral, acromioclavicular, esternoclavicular e escápulo-torácico. A principal função da articulação do ombro é a da elevação do braço [28].

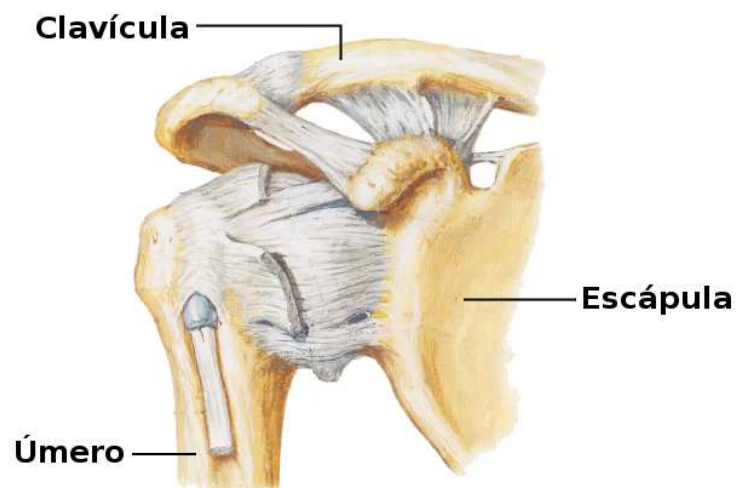


Figura 1.25: Articulação do ombro. Vista anterior. [29]

O movimentos que resultam da actuação dos músculos sobre as articulações são:

Flexão

Durante o movimento de flexão (Figura 1.26) o úmero oscila perpendicularmente ao plano escapular, estando limitado a um ângulo de 120° devido à rotação escapular. No entanto, é possível atingir o valor máximo da amplitude na flexão (180°), em relação ao plano frontal, devido a existência da abdução do úmero durante o movimento [22].

Extensão

No movimento de extensão (Figura 1.26) ocorre o oposto relativo ao movimento de flexão. O valor máximo da amplitude na extensão do corpo é de 240° (inclui 60° de hiperextensão), em relação ao plano frontal.

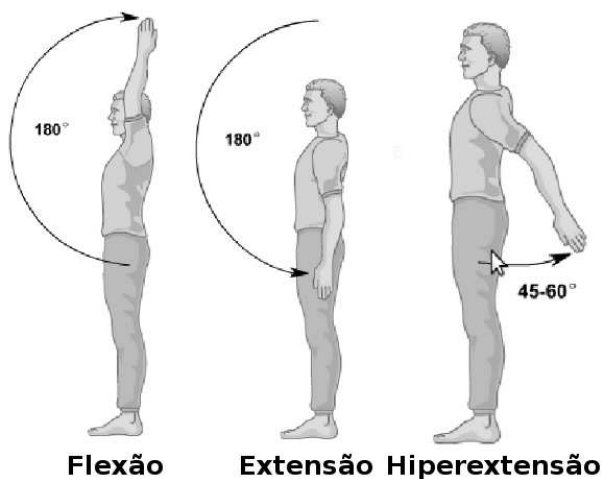


Figura 1.26: Movimentos de flexão extensão e de hiperextensão do ombro. [27]

Abdução

O movimento de abdução (Figura 1.27) ocorre quando os braços, que inicialmente estão na sua posição anatômica, são elevados segundo o plano frontal. Este movimento pode ser dividido em dois movimentos que ocorrem sequencialmente, a verdadeira abdução e a rotação ascendente. A verdadeira abdução é o movimento que leva o úmero da posição anatômica inicial até a posição perpendicular ao plano sagital. Posteriormente ocorre a rotação escapular, que eleva o úmero acima dos ombros. O valor máximo da amplitude da abdução do ombro é de 180° , em relação ao plano sagital.

Adução

O movimento de adução (Figura 1.27) é o movimento contrário ao de abdução, podendo este também ser dividido em duas fases, a rotação (neste caso descendente) e a verdadeira adução. O valor máximo da amplitude da adução do ombro é de 230° (inclui 50° de hiperadução), em relação ao plano sagital.

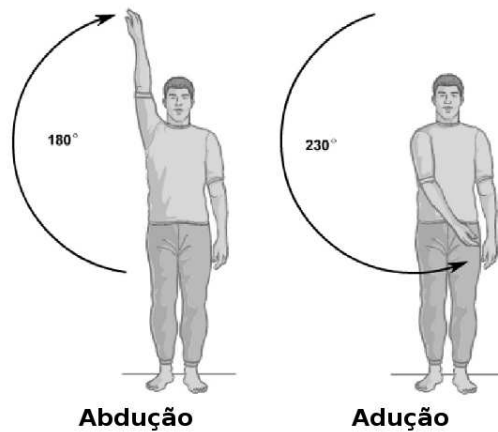


Figura 1.27: Movimentos de abdução e adução do ombro. [27]

Rotação Medial

A rotação medial é o movimento de rotação realizado segundo o eixo longitudinal do úmero, que aproxima o braço do tronco. Este movimento é mais facilmente observável se a articulação do cotovelo se encontrar a 90° . A Figura 1.28, demonstra a rotação medial, no entanto neste caso o ombro encontra-se abduzido em 90° . O valor máximo da amplitude da rotação medial do ombro é de 90°

Rotação Lateral

A rotação lateral é o movimento oposto a da rotação medial. A Figura 1.28, demonstra a rotação lateral, sendo que novamente o ombro encontra-se abduzido em 90° . O valor máximo da amplitude da rotação medial do ombro é de 90°

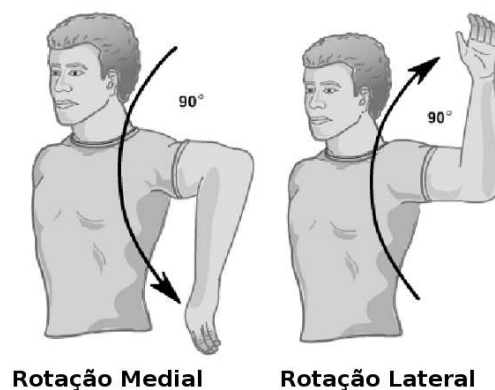


Figura 1.28: Movimentos de rotação lateral e medial do ombro. [27]

Elevação / Depressão

A elevação e a depressão do ombro (Figura 1.29) não envolve qualquer movimento na articulação do ombro. Ambos os movimentos, devem-se em parte à ocorrência de uma ligeira angulação na articulação acromioclavicular [22]. Estes movimentos caracterizam-se essencialmente como sendo movimentos auxiliares do corpo, por forma a que seja possível potenciar as amplitudes de outros movimentos.

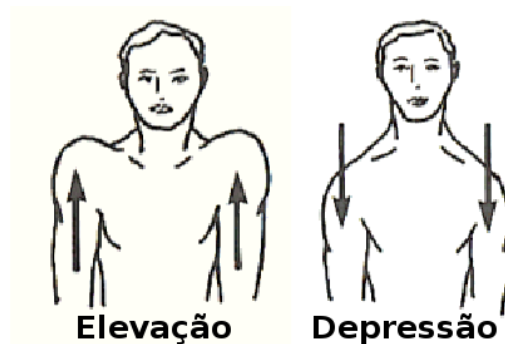


Figura 1.29: Movimentos de elevação e depressão do ombro. [30]

Circundução

A circundução do ombro (Figura 1.30) é definida como uma sucessão de movimentos circulares, que descrevem um cone. Este tipo de movimento é a combinação de outros movimentos, como a flexão, extensão, a abdução e a adução, podendo ser potenciado se ocorrer movimentos na escápula. De referir que este movimento é realizado na articulação gleno-umeral.

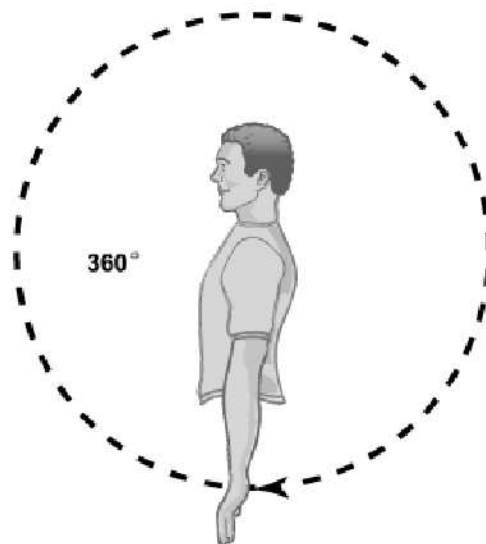


Figura 1.30: Movimento de circundução do ombro. [27]

1.8.3 Cotovelo

O complexo ósseo do cotovelo (Figura 1.31) é constituído pela extremidade distal do úmero e pela extremidade proximal do rádio e da ulna, e é caracterizado como sendo uma articulação sinovial. As articulações sinoviais são identificadas pelas faces articulares dos ossos que não estão em continuidade. Esta articulação é uma articulação uniaxial, permitindo apenas a flexão/extensão [28].

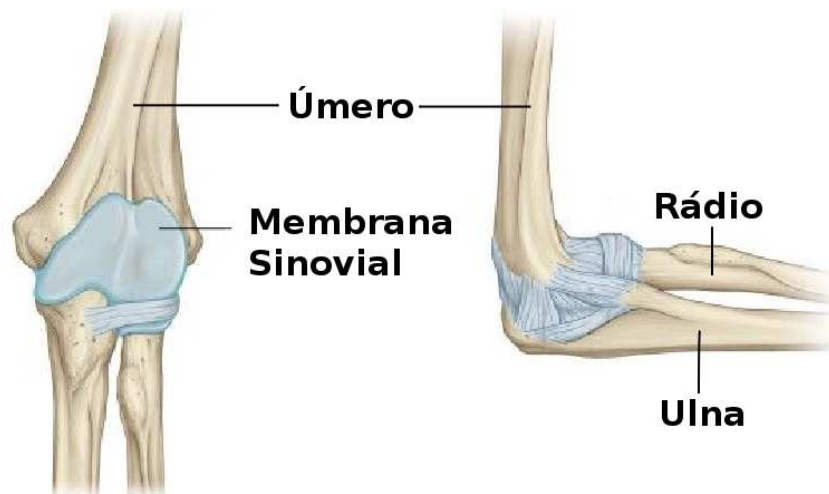


Figura 1.31: Articulação do cotovelo esquerdo, vistas anterior e medial. [22]

O movimentos que resultam da actuação dos músculos sobre as articulações são:

Flexão

O movimento de flexão (Figura 1.32) ocorre quando a ulna se desloca na tróclea e a cabeça do rádio no capitúlo. Este movimento não é um movimento simples, pois durante a flexão ocorre uma ligeira rotação, neste caso concreto uma ligeira supinação do antebraço [22]. O valor máximo da amplitude na flexão é de 150° , em relação ao plano frontal.

Extensão

O movimento de extensão (Figura 1.32) é o movimento oposto ao movimento de flexão. Este movimento também não é um movimento simples. No entanto, durante a extensão do antebraço, a ligeira rotação que ocorre é um movimento de supinação. O valor máximo da amplitude na extensão é de 150° em relação ao plano frontal.

Pronação

O movimento de pronação do antebraço (Figura 1.33) ocorre devido à rotação do rádio em torno da ulna, que se encontra numa posição fixa [22]. Este movimento é responsável por colocar a palma da mão virada para o chão. De referir que este movimento de rotação não ocorre somente na articulação do cotovelo, mas também ocorre na articulação do pulso. O valor máximo da amplitude da pronação do antebraço é de 90° , em relação ao plano transversal.

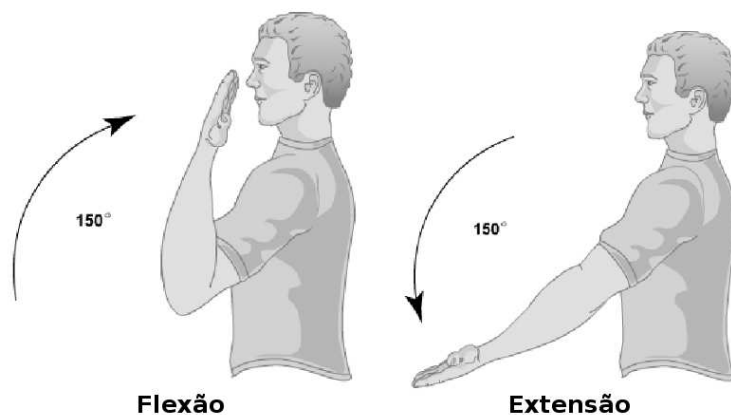


Figura 1.32: Movimentos de flexão e extensão do cotovelo. [27]

Supinação

O movimento de supinação do antebraço (Figura 1.33) é o movimento contrário ao movimento de pronação. Este movimento é responsável por colocar a palma da mão virada para cima. Tal como na pronação, a rotação não ocorre apenas na articulação do cotovelo, mas também se desenvolve na articulação do pulso. O valor máximo da amplitude da supinação do antebraço é de 90° , em relação ao plano transversal.

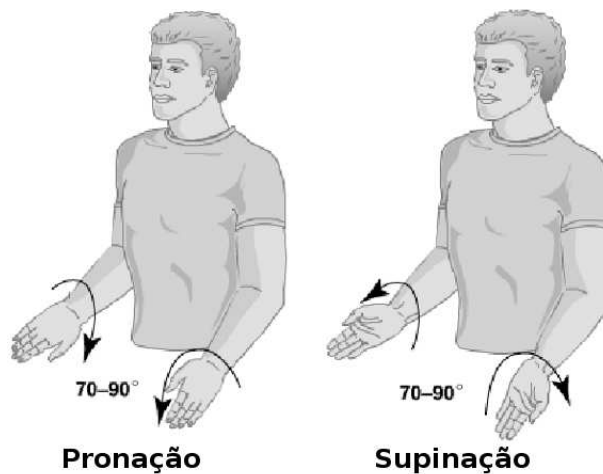


Figura 1.33: Movimentos de pronação e supinação do cotovelo. [27]

1.8.4 Pulso

A função da articulação do pulso (Figura 1.34) é permitir mudanças de direção da mão em relação ao antebraço. O pulso é caracterizado pelo conjunto de articulações entre os oito ossos do carpo e a extremidade distal do rádio (radiocarpal), pelas estruturas do espaço ulnocarpal, e pelos metacarpais. Este conjunto de ossos e tecidos moles é capaz de uma grande variedade de movimentos, aumentando as funções da mão e dos dedos [28].

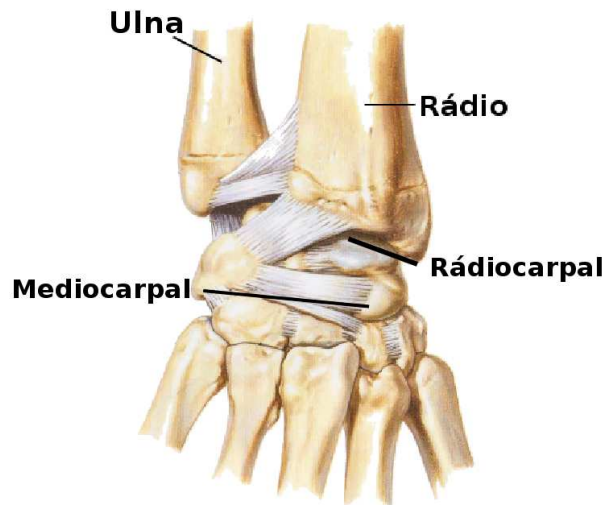


Figura 1.34: Articulação do pulso. [29]

O movimentos que resultam da actuação dos músculos sobre as articulações são:

Flexão

O movimento de flexão do pulso (Figura 1.35) ocorre principalmente na articulação radiocarpal. O movimento de flexão encontra-se limitado devido aos músculos antagonistas, resultando numa amplitude máxima de flexão diminuída quando os dedos encontram-se flectidos, devido ao aumento da tensão nos extensores [22]. O valor máximo da amplitude na flexão do pulso é de 90° , em relação ao plano transverso.

Extensão

O movimento de extensão (Figura 1.35) é o movimento oposto ao movimento de flexão. No entanto, este ocorre principalmente na articulação mediocarpal [22]. O valor máximo da amplitude na extensão do pulso é de 180° (inclui 90° de hiperextensão), em relação ao plano transverso.

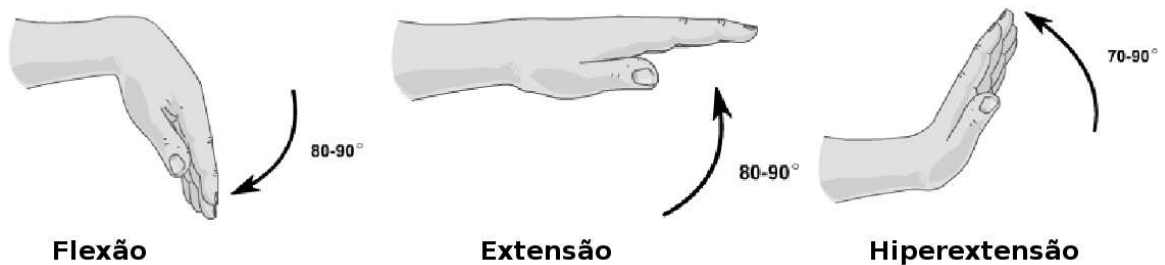


Figura 1.35: Movimentos de flexão extensão e hiperextensão do pulso. [27]

Abdução

O movimento de abdução do pulso (Figura 1.36) é um movimento que ocorre principalmente na articulação mediocarpal, enquanto a linha proximal do carpo não se mexe [22]. O valor máximo da amplitude na abdução do pulso é de 20° , em relação ao plano sagital.

Adução

O movimento de adução do pulso (Figura 1.36) é o movimento contrário ao movimento de abdução. Este movimento ocorre principalmente na articulação rádio-carpal, sendo que por esse motivo a sua amplitude de movimento seja consideravelmente superior ao movimento de abdução [22]. O valor máximo da amplitude na adução do pulso é de 50° , em relação ao plano sagital.

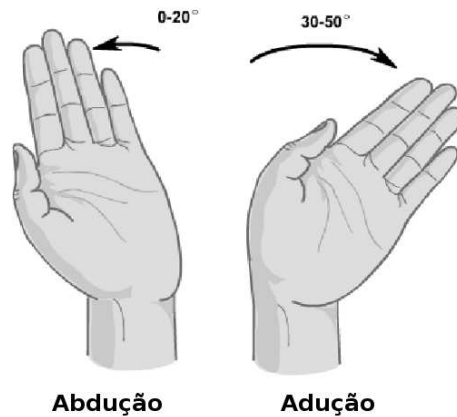


Figura 1.36: Movimentos de abdução e adução do pulso. [27]

Circundução

A circundução do pulso (Figura 1.37) tal como no ombro é composta por uma sequência de movimentos, sendo eles a flexão, seguida de uma adução, extensão e uma abdução, ou vice-versa. Este tipo de movimento permite descrever movimentos circulares nas pontas dos dedos da mão.



Figura 1.37: Movimento de circundução do pulso. [30]

1.9 Premissas Antropométricas

Como foi referido anteriormente, um dos objectivos previstos para este projecto é o desenvolvimento de uma plataforma cujas geometrias sejam antropomorficamente semelhantes às do ser humanos.

Segundo Edward M. Winter [31], a antropometria pode ser definida como sendo a ciência da aquisição e utilização de medições dimensionais na caracterização do fenótipo humano. Normalmente estas medições são utilizadas para descrever alturas, proporções, formas, forças, assim como a mobilidade e flexibilidade do corpo humano [32].

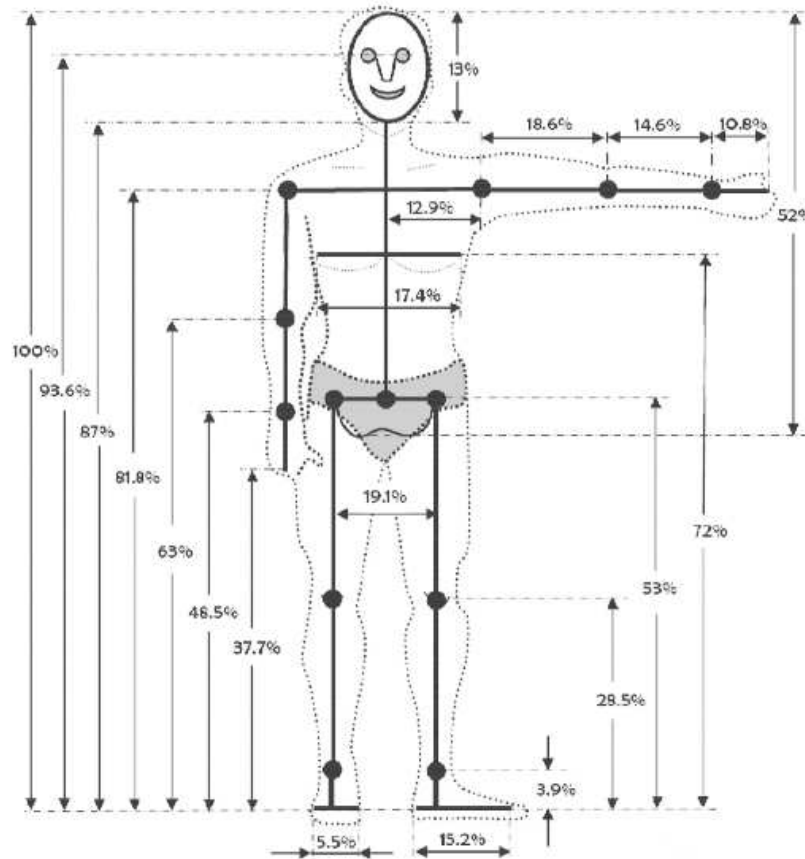


Figura 1.38: Comprimento dos segmentos corporais. [33]

A Figura 1.38, representa os comprimentos dos segmentos humanos, expressos em percentagem da altura do corpo de um indivíduo. De referir que estas medidas correspondem, de certa forma, a uma compilação de todas as medidas existentes, pois é sabido que as dimensões de um indivíduo podem variar em função de diversos parâmetros. Normalmente essas diferenças podem ser evidenciadas em aspectos como o sexo, etnia, crescimento e desenvolvimento do indivíduo, envelhecimento, assim como factores sociais. No entanto esses factores influenciam directamente a altura do corpo de um indivíduo, sendo que é possível utilizar as relações entre os comprimentos dos segmentos sem estar a cometer grandes erros.

Como tal, foi a partir destas proporções que toda a estrutura do robô humanóide foi dimensionada, aplicando para tal o valor da dimensão máxima (altura) pretendida.

1.10 Organização

O presente trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 é descrito o trabalho que tem sido desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro na plataforma humanóide, desde o seu primeiro prototipo em 2005 até a criação do novo modelo para investigação iniciado em 2009. Ainda neste capítulo será descrito o procedimento realizado para a correcção de algumas limitações encontradas no modelo de 2009 aquando do inicio deste trabalho.

No capítulo 3 são apresentados os constrangimentos existentes ao desenvolvimento da estrutura superior, como a integração da estrutura a criar na já existente, a integração dos componentes de processamento, unidades de distribuição de energia, baterias, etc. Será descrita a abordagem utilizada no desenvolvimento do modelo em CAD 3D, bem como o trabalho de construção e montagem dos componentes do tronco e membros superiores, do sistema pan&tilt e também da implementação da actuação híbrida.

No capítulo 4 é mostrado todo dimensionamento referente ao desenvolvimento da estrutura humanóide, desde o dimensionamento estrutural (comprimentos dos segmentos da estrutura em função do estudo antropométrico), ao dimensionamento e escolha dos actuadores. Serão apresentados alguns resultados de simulações numéricas realizadas para validação de componentes durante o desenvolvimento estrutural, assim como os resultados obtidos, necessários à implementação da actuação híbrida.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, assim como o trabalho futuro a ser desenvolvido nesta plataforma.

Capítulo 2

Projecto Humanóide

Neste capítulo será apresentado o trabalho desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro na plataforma humanóide. Posteriormente, será descrito o procedimento realizado para a correcção de algumas limitações encontradas no modelo de 2009 aquando do início deste trabalho.

2.1 Projecto Humanóide da Universidade de Aveiro

O projecto humanóide foi iniciado em 2003 pelo GAR (*Grupo de Automação e Robótica*) numa colaboração do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) com o Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática (DETI) da Universidade de Aveiro.

Este projecto tem como ambição fomentar os estudantes de graduação e pós-graduação a colaborar na evolução de uma área da robótica que tem tido nos últimos anos um enorme crescimento a nível internacional, mas que em Portugal apenas ainda se está a iniciar.

É igualmente pretendido o desenvolvimento uma plataforma de investigação que possa responder a alguns dos problemas actuais encontrados na criação e construção de robôs humanóides, tais como o controlo e a locomoção, assim como aspectos relativos à sua percepção sobre o ambiente que o rodeia.

2.1.1 Modelo 2005

Tendo o projecto *PHUA* sido iniciado em 2003, foi só em 2005 que a construção do protótipo do robô humanóide se materializou, graças ao trabalho desenvolvido por diversas pessoas.

Para além dos pontos referidos anteriormente acerca das motivações deste projecto, o culminar da construção deste modelo teria também como objectivo a participação em conferências e exposições, por forma a dar a conhecer o nome da Universidade de Aveiro. Além disso contaria com a participação num evento mundial ligado à robótica, a Robocup, onde existe uma liga Humanóide [2].

A estrutura concluída em 2005, (Figura 2.1), tem cerca de 600 milímetros de altura (limite imposto devido a participação na Robocup), 250 milímetros de largura e aproximadamente 6,22 quilogramas de peso. O protótipo final é composto por um total de 22 graus de liberdade, dos quais 6 são distribuídos por cada perna por forma a se conseguir uma maior versatilidade

na locomoção. A Tabela 2.1 mostra a distribuição dos graus de liberdade ao longo do robô humanóide, e na Figura 2.2 é ilustrada a cadeia cinemática referente à estrutura completa.

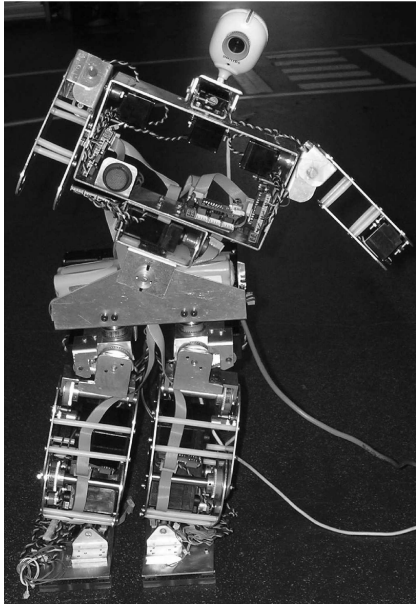


Figura 2.1: Robô humanóide desenvolvido. [34]

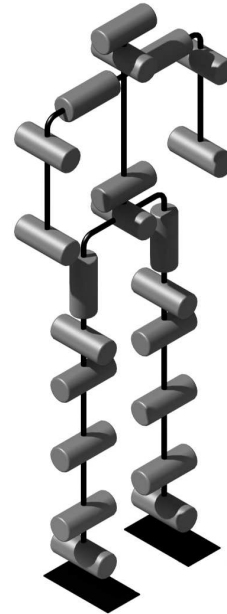


Figura 2.2: Cadeias cinemáticas.

Tabela 2.1: Graus de liberdade do robô humanóide

Articulação	Número GdL
Pé	0
Tornozelos	2(x2)
Joelhos	1(x2)
Ancas	3(x2)
Tronco	2
Ombros	2(x2)
Cotovelos	1(x2)
Pulsos	0
Pescoço	2
Total	22

A Tabela 2.1, aponta para a existência de 2 graus de liberdade situados no tronco. Segundo os criadores deste modelo [34], a utilização destes dois graus de liberdade permitiria uma maior flexibilidade na locomoção, assim como, um factor auxiliador na obtenção do equilíbrio, quer na fase de repouso (equilíbrio estático), quer na fase dinâmica.

Devido às questões de acomodação de componentes (motores, baterias, sensores, etc) a estrutura criada foi baseada em um exoesqueleto em alumínio com módulos ocios. Os motores usados foram servomotores de baixo custo, e a transmissão realizada através da utilização de polias e correias dentadas, nas pernas e tronco, e de actuação directa nos membros superiores.

O tronco (Figura 2.3) serve para acomodar baterias, placas de controlo dos servos e dos

sensores. Além disso irá acomodar também um computador baseado em PC-104, que servirá de apoio ao sistema de visão integrado na estrutura (cabeça). Esta subestrutura foi obtida através da ligação de duas chapas quinadas (Figura 2.4).

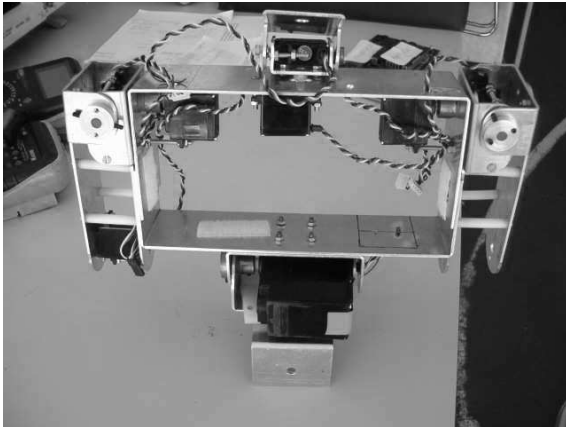


Figura 2.3: Imagem do tronco montado. [34]

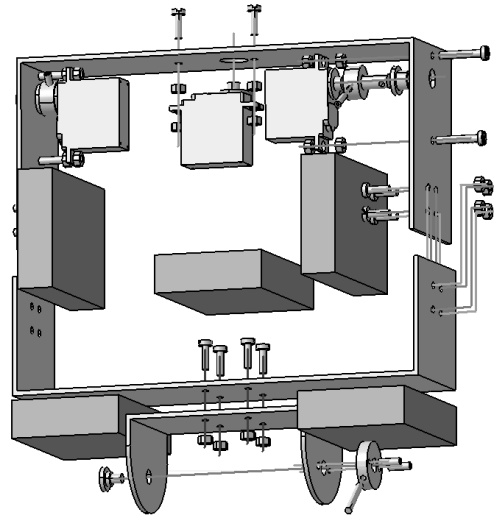


Figura 2.4: CAD 3D do tronco. [34]

Um aspecto interessante é o de toda a actuação existente na parte superior do humanóide ser realizada directamente nas articulações (actuação directa) por forma a reduzir o peso da estrutura final.

Outro aspecto importante é o do controlo da estabilidade da estrutura ser realizado por intermédio de extensómetros colocados na base do pé (Figura 2.5) e de sensores inerciais (inclinómetros e giroscópios) no tronco [35,36].

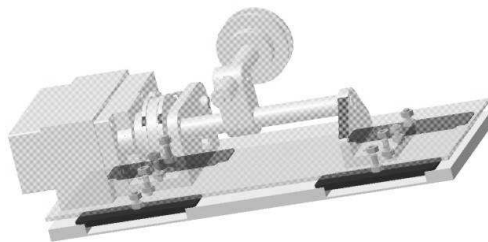


Figura 2.5: Pé desenvolvido. [35]

Em sùmula, os objectivos propostos para este protótipo eram bastante ambiciosos. A criação de um robô humanóide capaz de reproduzir o caminhar de um ser humano não é uma tarefa fácil e envolve muita dedicação. Embora no final esse objectivo não tenha sido completamente alcançado, o trabalho realizado tem sido utilizado como base de desenvolvimento de novas plataformas.

2.1.2 Modelo 2009

Este modelo (Figura 2.6) é o que actualmente se encontra em desenvolvimento no LAR (*Laboratório de Automação e Robótica*), no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. A criação do novo modelo foi iniciada em 2009 e surgiu da necessidade da correcção de algumas limitações encontradas no modelo anterior.

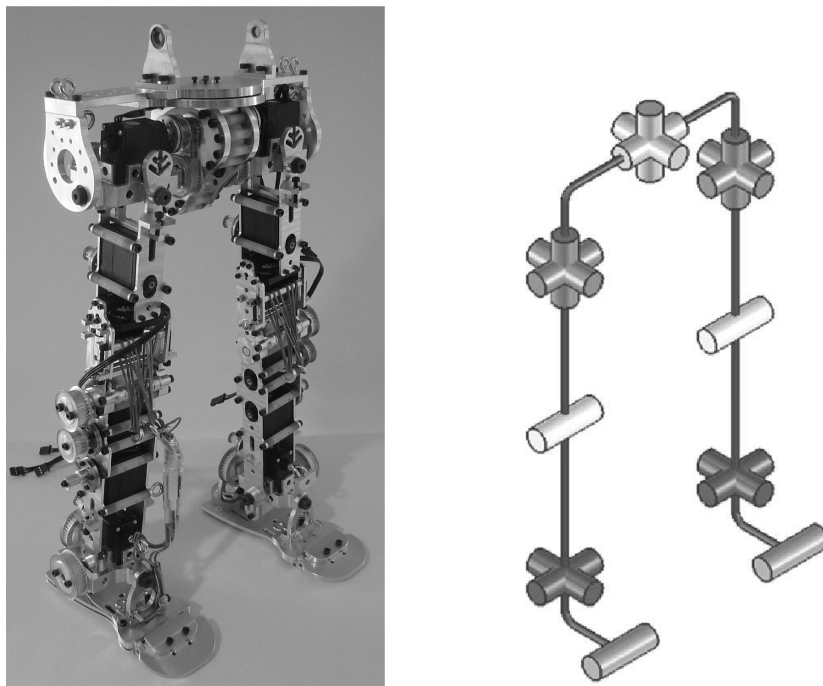


Figura 2.6: Robô humanóide desenvolvido em 2009 e respectiva cadeia cinemática. [37]

Neste novo modelo, foi introduzido o conceito de actuação híbrida. Este tipo de actuação é uma combinação entre a actuação activa e a actuação passiva e tem como objectivo o auxílio à locomoção do robô. Para tal, foram utilizados elásticos de borracha como actuadores passivos em diversas juntas da estrutura do robô (ver em detalhe secção 2.2). A estrutura das pernas deste humanóide é, assim como o modelo de 2005, baseada em um exoesqueleto em alumínio, por forma a criar uma estrutura compacta e o mais pequena possível, respeitando as dimensões antropomórficas [37].

Tabela 2.2: Graus de liberdade dimensionados.

Articulação	Número GdL
Tornozelos	2(x2)
Joelhos	1(x2)
Ancas	3(x2)
Tronco	1+2

A Tabela 2.2, indica a distribuição dos graus de liberdade ao longo da perna do robô humanóide. De notar que embora não seja referido, existe uma articulação (Figura 2.7), não actuada, na base do pé. Esta articulação tem a função de auxiliar o ciclo de marcha favorecendo o equilíbrio, simulando de uma forma simplificada a funcionalidade dos dedos

dos pés do ser humano. De salientar novamente a inclusão do grau de liberdade na anca que permite a rotação da perna (Figura 2.8), não sendo de facto um grau de liberdade importante. A maioria dos robôs não o incluem, a sua existência serve para se conseguir um maior realismo nos movimentos da perna.

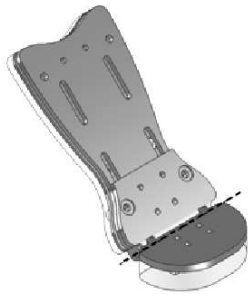


Figura 2.7: Articulação do pé. [37]

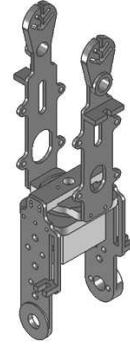


Figura 2.8: Rotação da perna. [37]

Uma das alterações realizadas relativamente ao antigo modelo foi a substituição dos extensómetros nos pés por 4 sensores de força nos cantos de cada pé (Figura 2.9). Esta alteração permitirá ao controlador saber a posição do centro de pressão de cada pé e tomar decisões no sentido da actuação das juntas em função do tipo de movimento que esta a ser realizado.

Actualmente, está implementado na pélvis do humanóide o grau de liberdade que permite a rotação do tronco segundo o eixo longitudinal (Figura 2.10), estando prevista a inclusão de mais dois graus (flexão/extensão e inclinação lateral) na estrutura superior a ser desenvolvida.

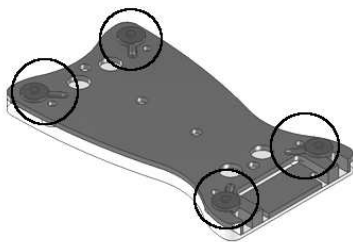


Figura 2.9: Sensores de força no pé. [37]

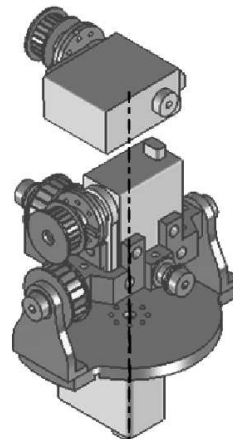


Figura 2.10: Rotação longitudinal do tronco. [37]

Para a actuação das juntas foram utilizados os servomotores *Hitec HSR 5980SG*, que são bastante leves e pequenos, e suportam binários elevados (cerca de 3 N.m). A transmissão é realizada através de polias acopladas ao servomotor e de correias dentadas. A tensão na correia pode ser ajustada através da afinação do entre-eixo entre a polia no servomotor e a polia na junta actuada (Figura 2.11).

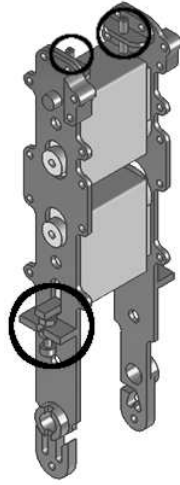


Figura 2.11: Método de ajuste do entre-eixo. [37]

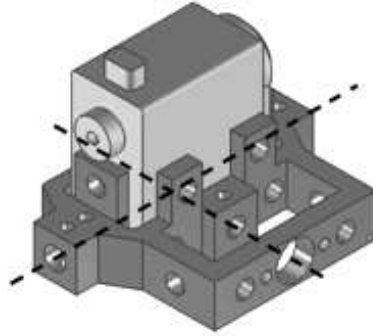


Figura 2.12: Junta universal. [37]

Um aspecto importante no desenvolvimento desta estrutura foi a criação das juntas universais (Figura 2.12), que permitem ter dois eixos de rotação concorrentes e ortogonais actuados, permitindo inclusive a acomodação de um dos actuadores no seu interior, reduzindo assim o volume final de cada articulação. Este tipo de junta foi utilizada nas articulações dos tornozelos e ancas, sendo possível a sua utilização no desenvolvimento da articulação do tronco.

A estrutura previamente desenvolvida tem uma altura de cerca de 400 milímetros, e um peso aproximado de 2,9 quilogramas. Todas as articulações desenvolvidas têm as mesmas amplitudes de movimentos que os seres humanos, salvo as excepções onde estas se encontram limitadas devido ao curso máximo dos servomotores.

2.2 Actuação Híbrida

Um dos conceitos trazidos para o modelo em desenvolvimento foi o da implementação de actuação híbrida no maior número possível de juntas.

A actuação híbrida surge, numa aposta clara de inovação, desde o início desta nova plataforma por forma a se investigar o resultado do cruzamento entre a actuação motora e a actuação passiva, sendo o principal objectivo desta investigação unir as vantagens que cada tipo de actuação proporciona.

Como foi referido na secção 2.1.2, os elementos passivos utilizados foram os elásticos. Estes elementos, assim como as molas, permitem armazenar energia potencial quando são deformados, devolvendo-a posteriormente, quando retornam à sua posição original.

Correctamente dimensionada, a utilização da actuação passiva, permitirá o auxílio aos servomotores aquando da necessidade de fornecimento de binários maiores. O resultado esperado será a da redução do consumo instantâneo por parte dos servomotores, muito embora se possa verificar um ligeiro aumento do consumo médio, devido à necessidade do servomotor contrariar a força elástica em certo tipo de movimentos.

Este tipo de aplicação será bastante útil em movimentos como o baixar e levantar do robô humanóide, ou na recuperação (extensão) após a flexão do tronco.

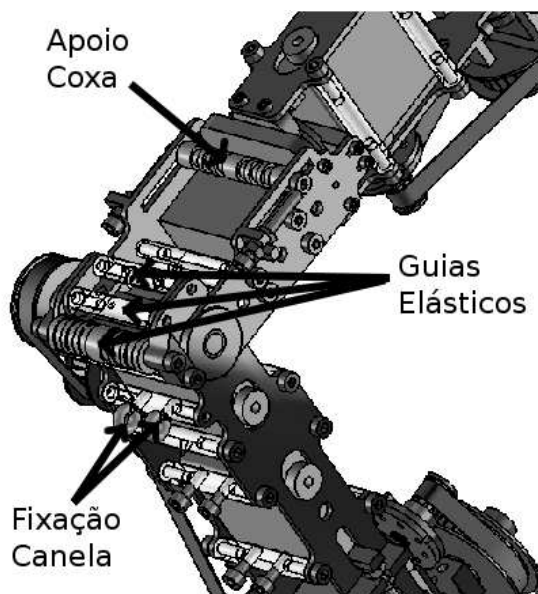


Figura 2.13: Implementação da actuação passiva no joelho. [37]

A Figura 2.13 mostra a forma como os elementos passivos são fixos à estrutura e como interagem com a articulação do joelho. De referir que todos os elementos passivos neste robô funcionam à tracção.

Tendo por base o trabalho desenvolvido anteriormente é possível afirmar que existe uma evidente redução do binário necessário na execução do movimento [37]. De referir que também se confirma a necessidade de no início do movimento de fornecer um binário ligeiramente superior para contrariar a constante de elasticidade dos elementos passivos.

Assim sendo, e baseando nos resultados obtidos, verifica-se que a inclusão da actuação híbrida neste modelo é uma mais valia na concretização dos objectivos da concepção desta estrutura.

2.3 Correção estrutural nas pernas

Aquando da realização dos estudos preliminares à estrutura desenvolvida foram detectadas algumas pequenas incorrecções. No entanto, uma sobressai das restantes pelo seu aspecto crítico no correcto funcionamento da estrutura. O problema em concreto e o procedimento de resolução são descritos de seguida.

O problema

O facto de ter sido utilizado um sistema de transmissão por intermédio de polias e correias dentadas nas articulações do tornozelo e joelho, implica igualmente a utilização de algum tipo de sistema que permita o ajuste da tensão nas correias. Este sistema (Figura 2.14) consiste na utilização de dois parafusos (2), estando apoiados na estrutura da perna (3), que ao serem rodados forçam o deslocamento do servomotor na vertical, e conseqüentemente o eixo da polia que se encontra acoplada a este, tencionando a correia.

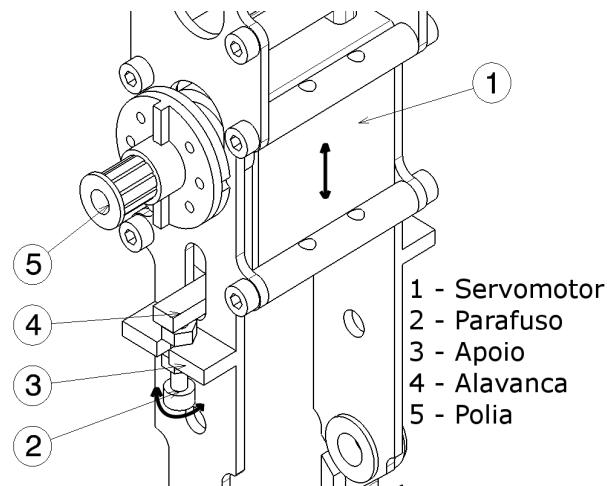


Figura 2.14: Sistema de ajuste de tensão na correia tornozelo. [37]

O sistema desenvolvido não permite ao ajustar-se a tensão na correia manter o entre-eixo da junta da articulação e do respectivo actuador constante.

Como tal, ao se ajustar o servomotor para se tensionar a correia, de forma a que esta funcione correctamente mantendo um engrenamento correcto entre a polia e a correia, está a fazer com que o eixo do servomotor se deforme, como é mostrado a verde na Figura 2.15. O prolongamento desta situação poderá levar ao aparecimento de atritos, à ruptura das correias e em último caso à falência do servomotor.

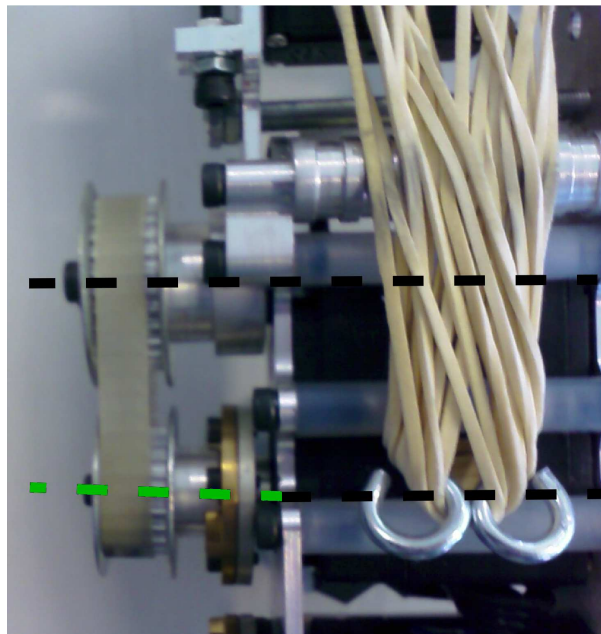


Figura 2.15: Flexão do eixo servo junta joelho.

A solução

A proposta desenvolvida para a correcção desta situação passa pela criação de um esticador que permita que o eixo proveniente do actuador possa ser regulado conforme a necessidade de correcção da flexão do mesmo aquando do ajuste da tensão na correia.

As figuras 2.16 e 2.17 mostram os esticadores desenvolvidos para a articulação do joelho e tornozelo.

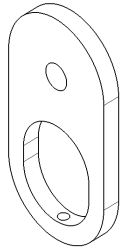


Figura 2.16: Esticador do joelho.

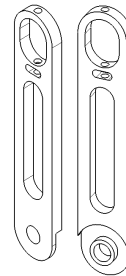


Figura 2.17: Esticador do tornozelo.

A Figura 2.18 indica os componentes que constitui o sistema de correcção para a articulação do tornozelo.

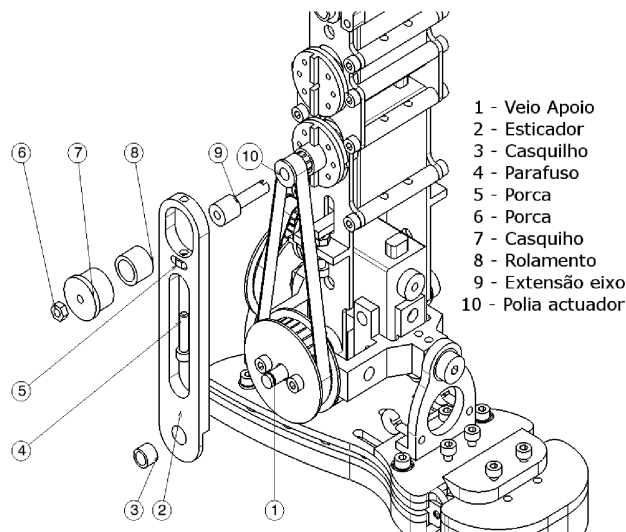


Figura 2.18: Componentes do esticador do tornozelo.

O funcionamento deste sistema consiste no ajuste da tensão em duas fases. Na primeira fase o ajuste é realizado sobre o servomotor, na segunda fase o ajuste é feito por intermédio do parafuso (4) sobre o casquilho (7) que se desloca na vertical dentro da caixa a ele reservado no esticador (2). Foram desenvolvidos dois veios, o primeiro (9) não é mais do que uma extensão da polia e que roda solidária com esta. De referir a inclusão de um rolamento de agulhas entre este veio e o casquilho (7) por forma a se conseguir reduzir o atrito e ao mesmo tempo permitir a distribuição da tensão gerada pelo esticador. O segundo veio (1) transmite a tensão contida no esticador para a estrutura da perna. O esticador está fixo na estrutura

pelo veio (1) através de uma anilha de segurança (não representada), e pelo casquilho (7) que está fixo por um veio roscado (não representado) entre o servomotor e a porca (6).

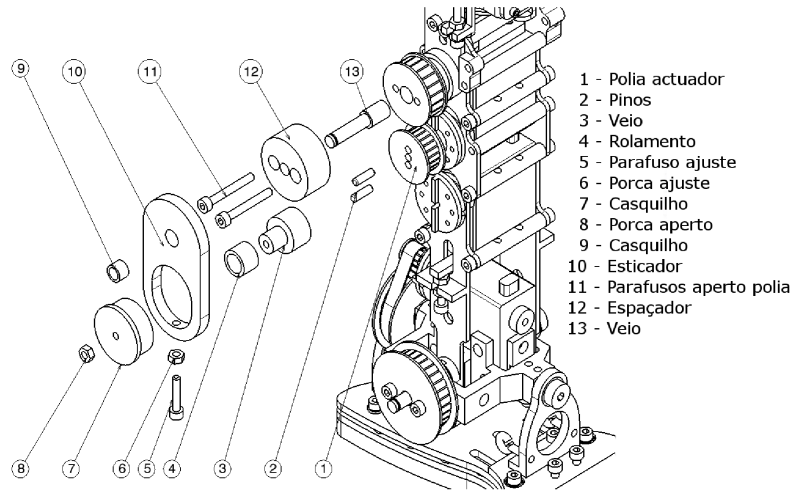


Figura 2.19: Componentes do esticador do joelho.

Para a articulação do joelho (Figura 2.19) foi utilizado o mesmo princípio, com a excepção que foi na forma de ajuste da tensão na correia. Na articulação do tornozelo o ajuste é feito por intermédio de um parafuso que força o casquilho a deslocar na vertical. Nesta articulação, o parafuso (5) encontra-se roscado num furo cego no casquilho (7) e o ajuste da tensão é efectuado através da porca (6). Ao rodar a porca (6) obriga-se o casquilho a deslocar-se na vertical. De referir que foi necessário utilizar um espaçador (12) devido ao facto de que a utilização do parafuso (5) na articulação do joelho interferia com o esticador da articulação do tornozelo. As figuras 2.20 e 2.21 mostram a montagem final do sistema desenvolvido.

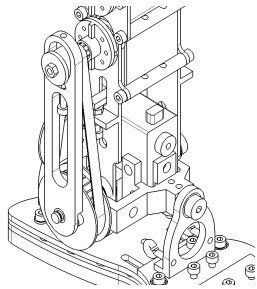


Figura 2.20: Sistema completo do tornozelo.

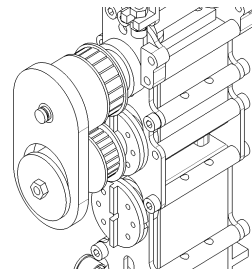


Figura 2.21: Sistema completo do joelho.

Este sistema que foi desenvolvido para corrigir limitações dos mecanismos originais certamente não será a solução óptima, pois continua a não ser possível garantir o constante entre-eixo entre a junta da articulação e o eixo do actuador aquando do ajuste de tensão na polia. No entanto, esta solução permite a redução da deformação do eixo do actuador sem afectar de forma significativa o correcto funcionamento do mesmo (atrato). No desenvolvimento do resto da estrutura deverá ter-se em consideração este aspecto construtivo, por forma a eliminar-se este tipo de situações, ou então, na impossibilidade de se desenvolver outras soluções mais eficazes, permitir a utilização do mesmo tipo de solução aqui apresentado.

Capítulo 3

Concepção e desenvolvimento estrutural

3.1 Constrangimentos no Desenvolvimento

Depois de analisados e compreendidos os conceitos inerentes ao desenvolvimento desta plataforma, assim como algumas das soluções já desenvolvidas por diversos autores, é necessário efectuar um levantamento dos principais constrangimentos a ter-se em conta durante o projecto. Este levantamento é realizado por forma a ser possível desde já considerar algumas restrições e assim facilitar o desenvolvimento da estrutura visando os seus objectivos finais.

3.1.1 Dimensões finais da plataforma

Como foi referido na secção 2.1.2, a estrutura até agora desenvolvida tem cerca de 400 milímetros de altura, e pretende-se que esta seja antropomorficamente correcta. Como tal, é possível estimar as dimensões finais da estrutura do robô humanóide.

Segundo a Figura 3.1 à esquerda, é nos indicado os comprimentos entre cada articulação e a base do pé da estrutura humanóide já desenvolvida. Tendo por referencia a Figura 3.1 à direita, que nos indica os comprimentos antropométricos dos segmentos do corpo humano, podemos então estimar o valor da altura final do robô humanóide.

Temos então que o valor da altura final é dada pela relação 3.1:

$$H = \frac{A_{seg}}{R_{antro}} \quad (3.1)$$

Onde H é a altura final da estrutura, A_{seg} é a altura do segmento que se pretende analisar e R_{antro} é a relação antropométrica para esse mesmo segmento.

Altura do pé ($A_{Pé}$)

Para o calculo da altura da estrutura final, com base nas dimensões do pé, temos pela substituição da equação 3.1 o seguinte:

$$H = \frac{A_{Pé}}{R_{Pé}} = \frac{50mm}{0.039} \approx 1282mm$$

Altura do joelho (A_{Joelho})

Para o calculo da altura da estrutura final, com base nas dimensões do joelho, temos pela substituição da equação 3.1 o seguinte:

$$H = \frac{A_{Joelho}}{R_{Joelho}} = \frac{189mm}{0.285} \approx 663mm$$

Altura da anca (A_{Anca})

Para o calculo da altura da estrutura final, com base nas dimensões da anca, temos pela substituição da equação 3.1 o seguinte:

$$H = \frac{A_{Anca}}{R_{Anca}} = \frac{332mm}{0.530} \approx 626mm$$

Da análise aos cálculos realizados é evidenciado o facto de não existir um valor fixo para a altura da estrutura completa. Por tal, pode-se afirmar que alguns dos segmentos não se encontram antropomorficamente correctos, sendo esta situação mais acentuada no pé. Uma analise mais cuidada à dissertação que acompanha este trabalho é referido o motivo pelo qual o pé não cumpre os requisitos antropométricos. Este prende-se pelo facto de não ser possível incluir todos os elementos necessários ao movimento da articulação, para que esta no final tenha a amplitude de movimentos idêntica à do ser humano. Como tal, foi aberta uma excepção.

Ignorando o valor obtido da altura final em função da altura do pé, temos o então intervalo em que a altura final do robô humanóide se situará. Este intervalo vai desde os 630mm até aos 670mm. Para efeitos de dimensionamento o valor a utilizar será o de 670mm.

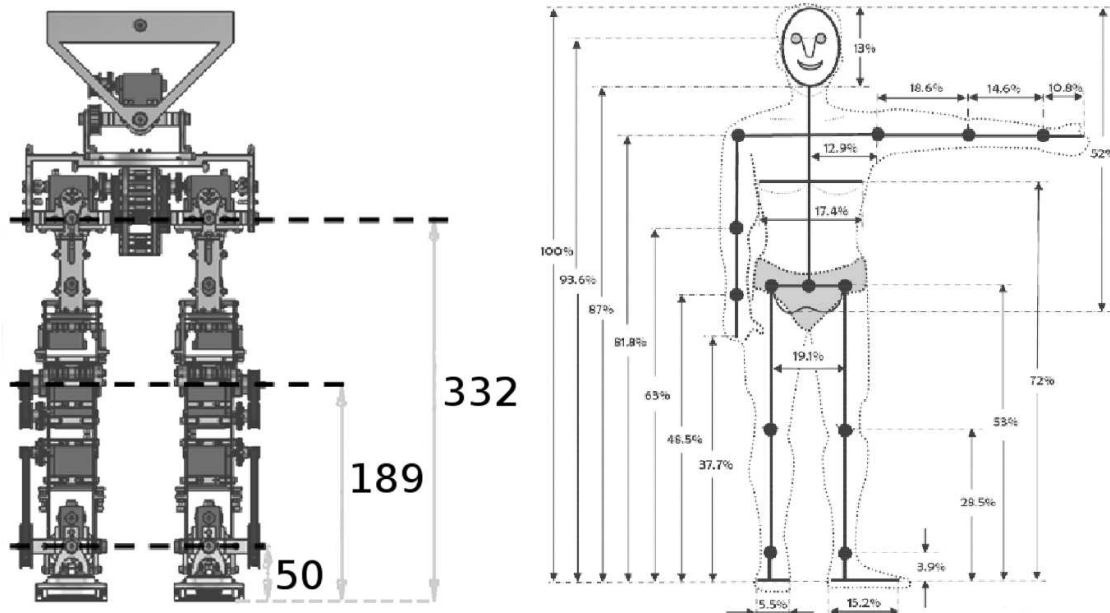


Figura 3.1: Dimensões das pernas e comprimento dos segmentos corporais. [33, 37]

3.1.2 Acomodação do controlador central (PC-104)

Outra situação que necessita de alguma atenção antes de se desenvolver o tronco do robô humanóide é a acomodação do controlador central baseado em PC-104 e placa de expansão na estrutura do tronco.

O controlador central é um computador embebido que servirá para a aquisição e tratamento de imagens obtidas através de duas câmeras *Firewire* instaladas na cabeça do humanóide. A placa de expansão acoplada ao PC-104 é a placa que possui as portas (*Firewire*) necessárias à ligação das camaras.

Os motivos pelos quais é necessário ter especial cuidado sobre inclusão deste computador na estrutura do tronco são as suas dimensões e o seu correcto posicionamento, e também o facto de que o conjunto do PC-104 e placa de expansão têm de estar completamente protegidos contra eventuais quedas do robô humanóide que possam ocorrer no futuro.

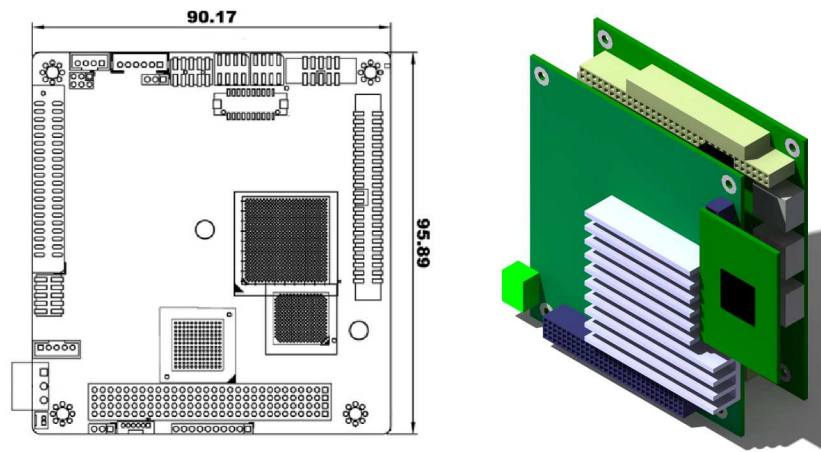


Figura 3.2: Dimensões do PC-104 e representação do módulo em CAD 3D.

A Figura 3.2 à esquerda mostra as dimensões da placa do PC-104 em milímetros, e à direita, a representação em CAD 3D do conjunto PC-104 e placa de expansão. As dimensões da placa de expansão do PC-104 são sensivelmente as mesmas. Na Figura 3.3 são mostradas as cotas de atravancamento do módulo de processamento do humanóide, incluindo o disco SSD, a ter em conta no desenvolvimento do tronco.

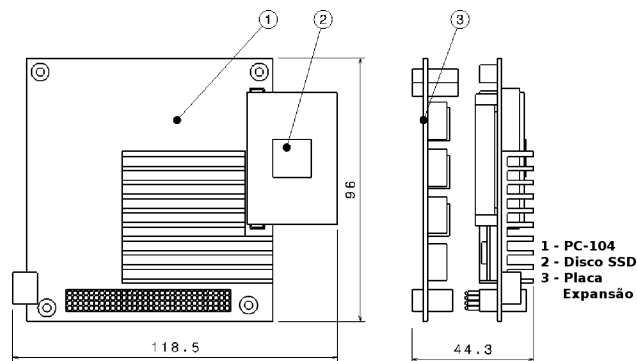


Figura 3.3: Atravancamento do módulo do PC-104

3.1.3 Dimensionamento das juntas e actuadores

Uma das fases mais importante e complexa do projecto é o dimensionamento e escolha dos actuadores para as articulações do humanóide. Tal como no desenvolvimento das pernas, a escolha do tipo de actuação é influenciada principalmente pelo número de graus de liberdade com que se pretende dotar a estrutura, bem como com o objectivo pretendido com cada articulação em específico. É então necessário caracterizar como será actuada cada articulação a ser desenvolvida.

Optou-se por criar uma estrutura composta por 4 graus de liberdade em cada membro superior, 3 graus de liberdade na articulação do ombro e 1 grau na articulação do cotovelo. Estes 4 graus de liberdade são suficientes para a realização de alguns movimentos, semelhantes aos do ser humano, no âmbito dos objectivos pretendidos com o desenvolvimento dos membros superiores (o auxílio ao equilíbrio quer na fase estática quer durante fase dinâmica do movimento). Além disso, optou-se por desenvolver uma estrutura em que fosse possível adicionar-lhe, posteriormente, mais dois graus de liberdade, rotação do antebraço e flexão/extensão pulso. Isto significaria a possibilidade da realização de movimentos mais complexos, dando assim uma maior capacidade de interacção do robô humanóide com o meio ambiente que o rodeia.



Figura 3.4: Servomotor Hitec[®] *HSR-5980SG*

Tal como nas pernas, serão utilizados servomotores (Figura 3.4) na actuação das juntas da articulação; isto deve-se ao facto destes actuadores serem bastante compactos e leves, podendo no entanto fornecer binários bastante elevados. O tipo de actuação que irá ser utilizado é a de actuação directa, no sentido em que acção do servomotor está aplicada directamente na junta da articulação. Como foi referido anteriormente, o principal objectivo do desenvolvimento dos membros superiores é o do auxílio no equilíbrio, não sendo prevista a necessidade de se fornecer grandes binários. No entanto, o dimensionamento destes servomotores deve ter em conta as exigências da possível inclusão de mais graus de liberdade para realização de algumas tarefas, como por exemplo apanhar pequenos objectos.

No tronco optou-se pela redução a 3 graus de liberdade, pois seria extremamente complexo a criação de um sistema que fosse possível simular o movimento da coluna vertebral do ser humano. Um grau de liberdade do tronco (rotação) já se encontrava completamente dimensionado, pelo que restam os graus de liberdade referentes à flexão/extensão do tronco e à inclinação lateral do mesmo. Nestas juntas, a transmissão de movimento será realizada através da utilização de polias e correias dentadas, pois prevê-se a necessidade de fornecer binários bastante elevados à realização dos movimentos. É nesta articulação que será reali-

zada a integração da estrutura do tronco e membros superiores com a estrutura dos membros inferiores.

Para o desenvolvimento da cabeça do robô humanóide foram apenas considerados 2 graus de liberdade, os mesmos necessários à execução dos movimentos de "pan&tilt". A forma de actuação nestas juntas é idêntica à usada nos membros superiores, a actuação directa, pois a cabeça será apenas constituída por duas câmaras e o respectivo suporte.

O correcto dimensionamento dos servomotores permitirá criar uma estrutura otimizada para os objectivos pretendidos com este trabalho. No entanto, nesta fase é impossível obter-se um dimensionamento correcto, pois trata-se de um processo iterativo, em que a escolha de um determinado componente influencia o restante desenvolvimento. Para se poder minimizar este problema foi imposto que as dimensões dos servomotores a usar não poderiam exceder as dimensões dos servomotores já dimensionados ($40 \times 20 \times 37$ mm).

3.1.4 Dimensionamento das baterias

A escolha do tipo de baterias a utilizar representa outro factor de influência no desenvolvimento da estrutura do tronco. O tipo de tecnologia utilizada nas baterias, e também a sua capacidade máxima, influencia directamente os parâmetros relativos as dimensões e ao peso.

Para além destes factores, deve ter-se em consideração o facto de o robô humanóide necessitar de ter autonomia respeitante à sua alimentação eléctrica. Isto significa que a estrutura a desenvolver deverá prever a utilização e funcionamento de duas baterias em simultâneo ou de forma alternada. Esta última imposição implica que uma só bateria seja capaz de fornecer uma tensão constante a um alto débito de corrente.

Analizadas todas as imposições e comparando com as opções disponíveis no mercado, concluiu-se que a melhor opção seria a utilização de uma bateria Turnigy® (Figura 3.5) baseada em polímeros de lítio (Li-Poly). Na Tabela 3.1 encontram-se as principais características desta bateria.



Figura 3.5: Bateria Turnigy®.

Tabela 3.1: Características da bateria Turnigy

Capacidade (mAh)	5000
Configurações	2S1P / 2 Células / 7.4V
Descarga	20C const./ 30C burst
Peso (g)	272
Dimensões (mm)	135x35x22

De referir que estas baterias permitem uma descarga continua de 20C ou 30C em picos de 15 segundos de duração. A descarga continua de 20C significa que a bateria pode fornecer corrente até 20 vezes a sua capacidade, ou seja pode fornecer cerca de 7.4 Volt a 100 Ampere.

3.2 Desenvolvimento conceptual

Reunidas todas as informações necessárias ao desenvolvimento da solução é necessário perceber por onde se deverá iniciar este projecto.

Optou-se por iniciar o desenvolvimento da estrutura pelo tronco, mais concretamente pela parte da integração com o já criado. Esta escolha deve-se principalmente ao facto de este ser um ponto crítico, pois tudo o que será desenvolvido terá de assentar na estrutura existente, e algum erro de construção que ocorra poderá levar a que as duas partes não se possam interligar, obrigando desta forma, a se refazer todo trabalho realizado.

Para a criação de todas as peças abaixo descritas, foi utilizado o *software* de modelação de CAD 3D *CATIA® V5R19* da *Dassault Systèmes*. Este tipo *software* permite uma maior versatilidade de opções imprescindíveis durante esta fase do projecto, como a possibilidade de se poder realizar simulações numéricas, estimar pesos ou determinar centros de massa. Neste capítulo são apresentados maioritariamente desenhos de conjunto. Para a visualização dos componentes em detalhe consultar anexo C.

3.2.1 Tronco

Tal como foi referido anteriormente, parte da articulação do tronco já tinha sido projectada (Figura 3.6), sendo que esta articulação não se encontra totalmente desenvolvida, faltando o grau de liberdade referente à inclinação lateral do tronco. Nesta fase, poderá pensar-se em refazer parte da articulação por forma a facilitar o desenvolvimento do tronco, no entanto essa opção estaria a desperdiçar algumas peças que já se encontram construídas. Por isso, optou-se por concluir a articulação com base no que já foi desenvolvido para as outras articulações.

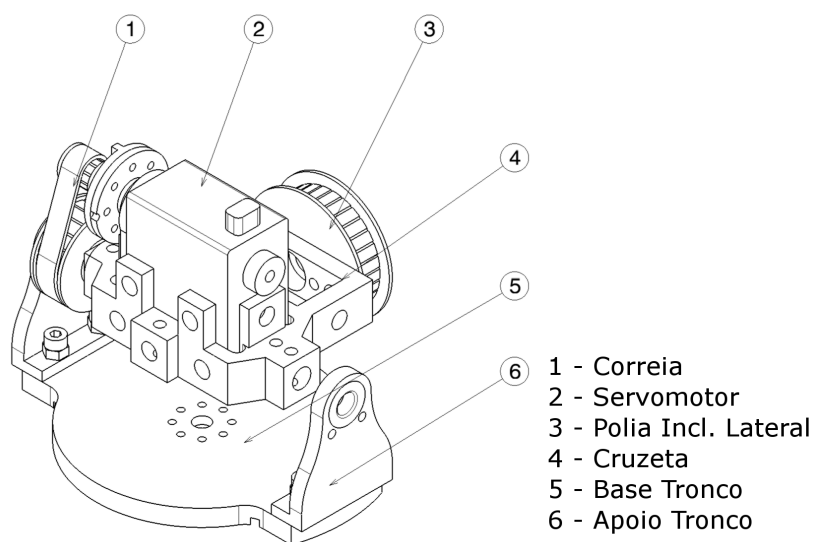


Figura 3.6: Junta do tronco previamente desenvolvida. Vista isométrica

Completa a montagem do grau de liberdade referente à flexão/extensão do tronco é notória a possibilidade de poder ocorrer a mesma situação encontrada nas pernas, dado que o ajuste da tensão na correia é efectuado através do aperto de dois parafusos na base do servomotor, como se encontra esquematizado na Figura 3.7.

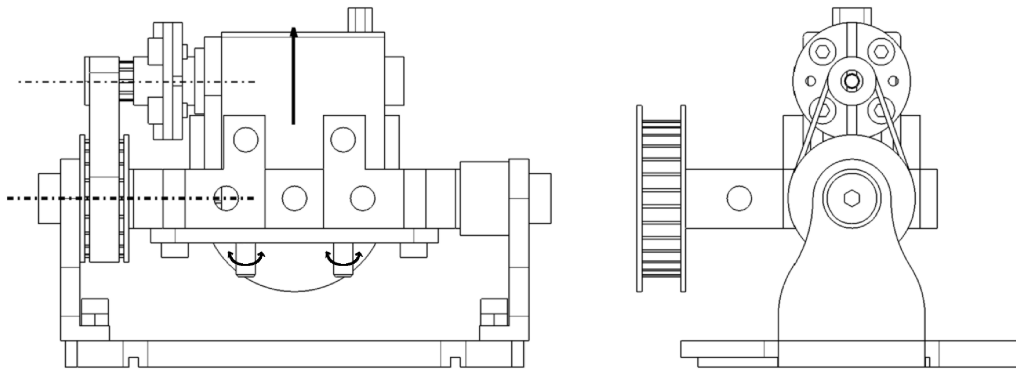


Figura 3.7: Montagem da junta do tronco. Vista de frente e da esquerda.

O sistema desenvolvido para evitar a deformação do eixo do servomotor foi baseado no mesmo sistema desenvolvido para a articulação do joelho (Figura 3.8). Da mesma forma, o ajuste é realizado através da porca M3 (2) sobre o parafuso sem cabeça M3 (1), que se encontra roscado no casquilho (3). Ao apertar a porca (2), esta vai obrigar o esticador (9) a deslocar-se na vertical corrigindo, desta forma, qualquer eventual deformação que possa existir no eixo do servomotor.

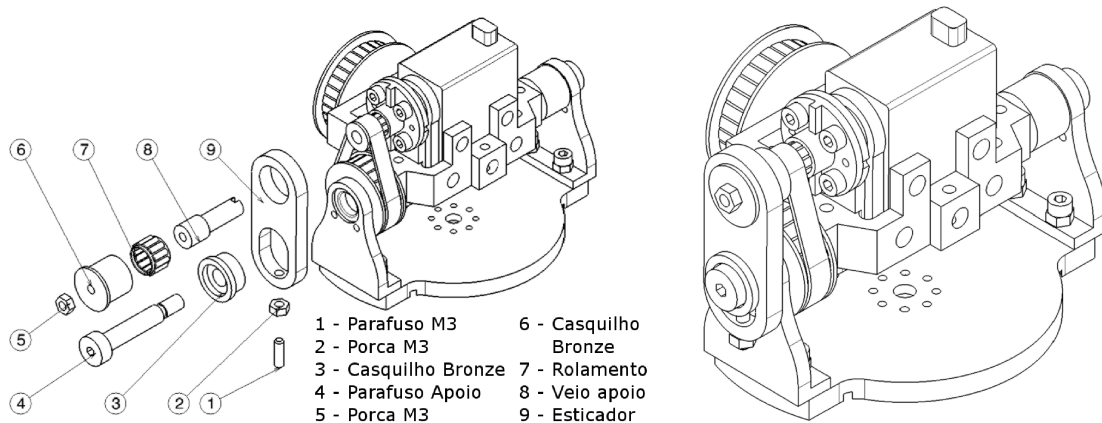


Figura 3.8: Sistema de correcção da junta do tronco: Vista explodida e vista de conjunto.

Na Figura 3.8 à direita é possível ver a montagem completa da junta referente à flexão/extensão do tronco. A Figura 3.9 mostra os limites das amplitudes dos movimentos de flexão/extensão (90°) e do movimento de hiperextensão (15°) do tronco.

Como foi referido na análise biomecânica da articulação da coluna (secção 1.8.1) o valor da amplitude do movimento de hiperextensão situa-se entre os 20° e os 30° . Como se pode concluir a partir da Figura 3.9 esses valores não poderão ser atingidos. Esse valor (15°) é o máximo possível devido à localização da polia referente ao movimento de inclinação lateral, e para que esta não esteja em contacto com a base do tronco. A alteração da polia para outra de dimensão inferior pode aumentar o valor do ângulo possível, no entanto tal opção será inviabilizada devido à necessidade de se ter uma relação de transmissão específica (descrito mais a frente neste trabalho).

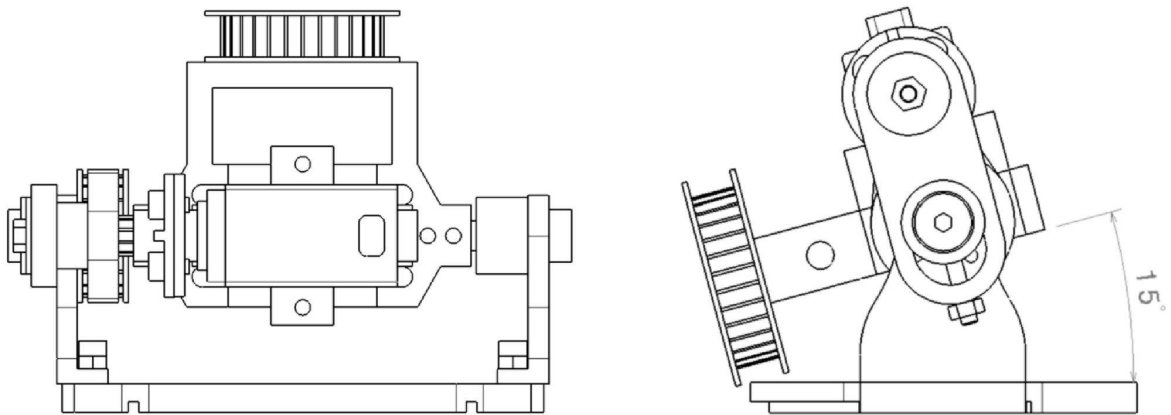


Figura 3.9: Amplitudes dos movimentos do tronco: Flexão (90°) e hiperextensão (15°).

De seguida foi desenhado um esboço do quadro do tronco (Figura 3.10) sobre o qual os todos os componentes serão montados.

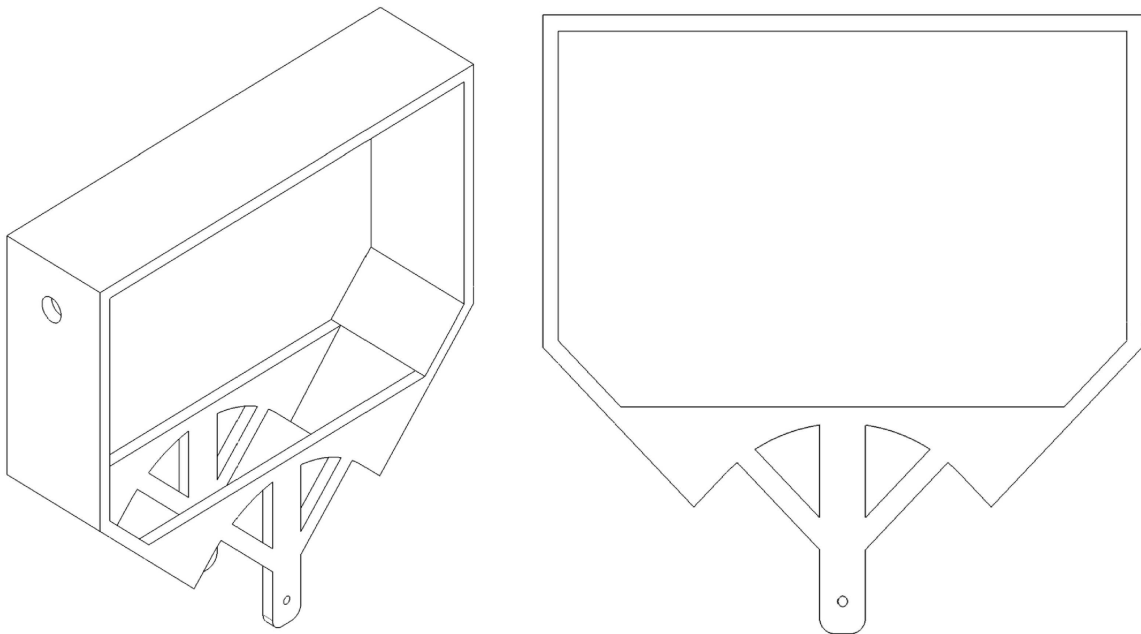


Figura 3.10: Esboço do tronco. Vistas isométrica e de frente.

O desenho do tronco foi baseado num exoesqueleto por forma a permitir uma melhor acomodação do computador embestado baseado em PC-104, bem como os servomotores que servirão para actuar a junta referente à inclinação lateral, e também a um dos graus de liberdade do ombro. A maquinação da estrutura completa, da forma como esta se encontra desenhada neste esboço, é de difícil execução, por isso, esta foi dividida em 2 grupos. O primeiro grupo diz respeito a parte que faz a ligação à articulação e que serve de suporte as restantes partes (Figura 3.11), enquanto o segundo grupo refere-se as peças a que corresponde as laterais e o topo do quadro (Figura 3.12).

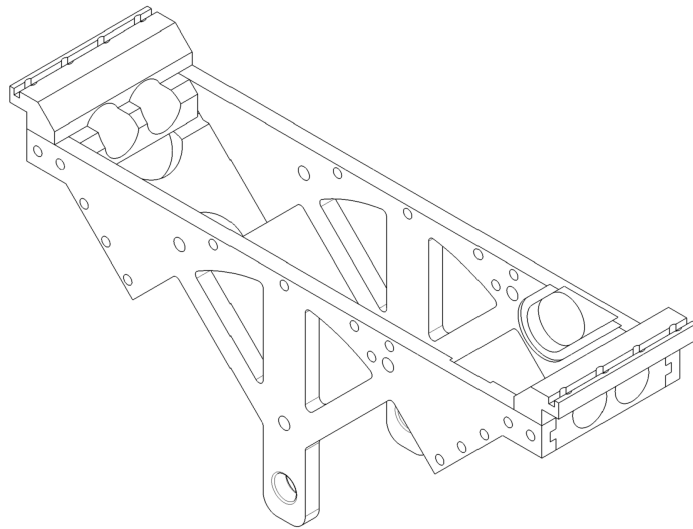


Figura 3.11: Suporte do tronco final.

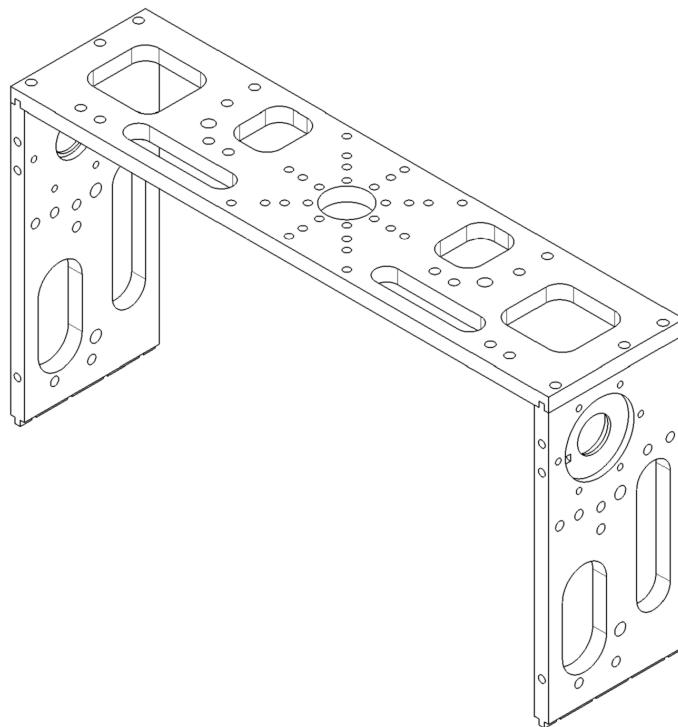


Figura 3.12: Laterais e topo do tronco final.

Um aspecto importante que foi desenvolvido desde o esboço inicial à proposta final foi a parte da ligação do tronco à articulação já criada, pois existe a necessidade de permitir que o tronco tenha uma amplitude de inclinação lateral de 90° (Figura 3.14). Além disso é necessário garantir que a articulação se possa movimentar sem que ocorra colisões com os componentes incluídos na articulação (Figura 3.13)

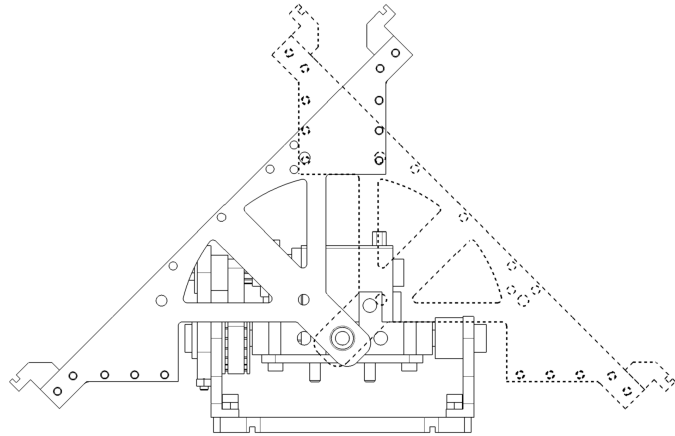
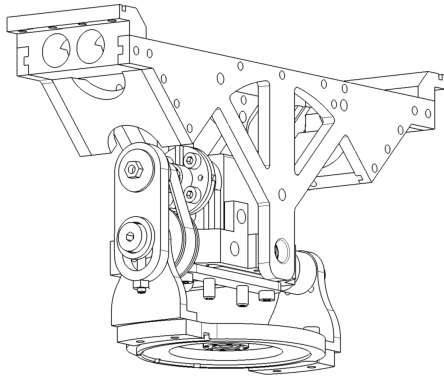


Figura 3.13: Integração da estrutura.

Figura 3.14: Amplitudes da inclinação lateral.

A estrutura que faz a integração e que serve de suporte à parte de cima do tronco (Figura 3.15) é composta por 6 peças fixas através de parafusos M3 (2). As peças (4) e (7) são responsáveis por suportarem todo o peso do tronco e membros superiores e de o transmitir às pernas. A sua geometria foi validada através de simulações de resistência das peças (descrito no capítulo seguinte). Também nestas peças foram criados pequenos rasgos nos locais onde são fixados os outros componentes, assim como, nos espaçadores e nos ligadores foram criadas nervuras. Este tipo de encaixe vai permitir que, para além de garantir um aperto sem folgas, os parafusos que garantem a fixação dos componentes não estejam sujeitos directamente ao corte, ou seja, o peso é transmitido às bases (4) e (7) maioritariamente por essas nervuras. As peças (1) e (6) são os locais onde as peças referentes à parte de cima do tronco são fixadas.

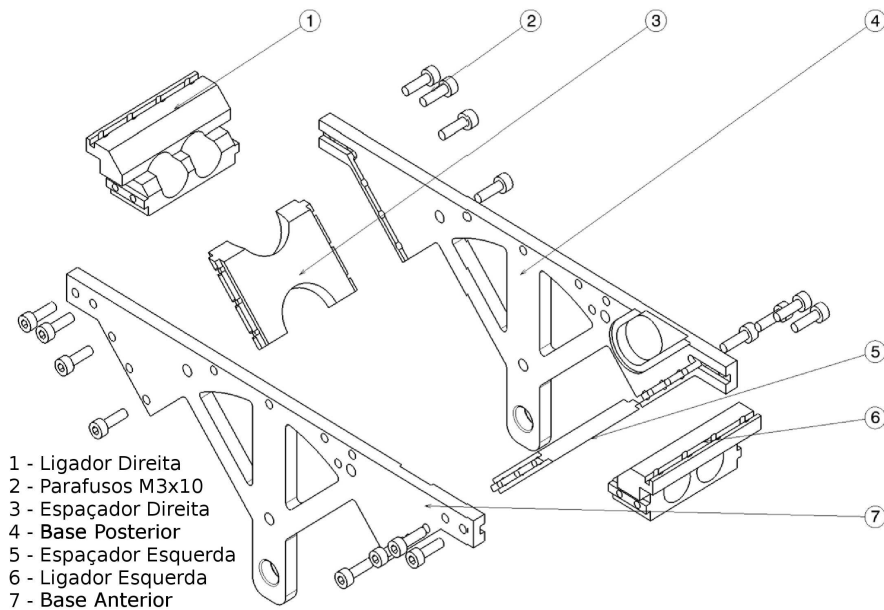


Figura 3.15: Componentes suporte tronco.

Uma vez completa a criação da estrutura base do tronco, é possível concluir o desenvolvimento do grau de liberdade referente à inclinação lateral do tronco. Optou-se por colocar o actuador desta junta no lado esquerdo do tronco junto ao espaçador (5) da Figura 3.15, por forma a ocupar um espaço que se encontra vazio, e para que posteriormente seja possível acomodar os restantes componentes do tronco do robô humanóide. Certamente que a localização do actuador, mais o sistema de ajuste de tensão na correia, irá provocar um desvio no centro de massa da estrutura completa; no entanto, parte deste desvio é compensado pela adição do sistema de ajuste da correia na junta referente ao movimento de flexão. O restante desvio do centro de massa é passível de ser compensado com a integração da actuação híbrida na articulação.

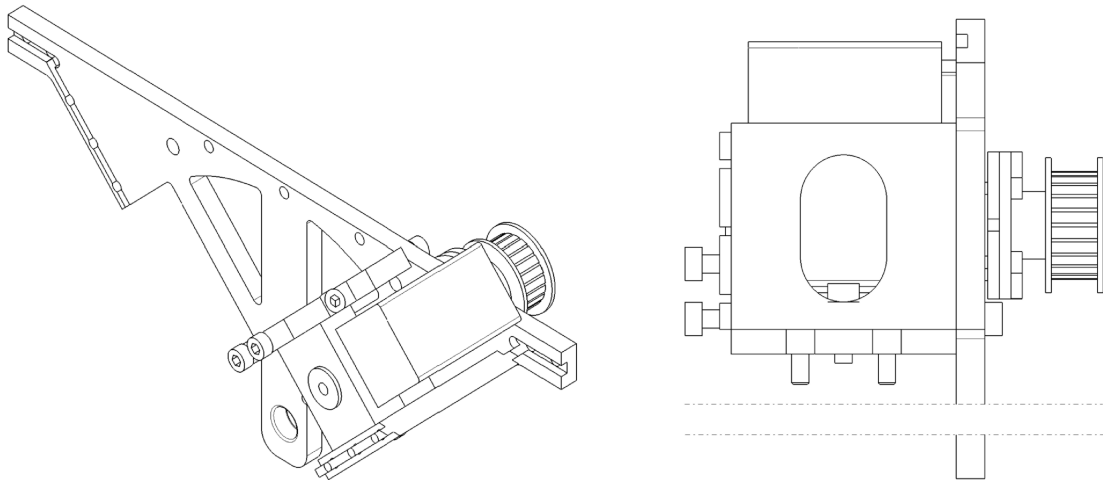


Figura 3.16: Junta da inclinação lateral: Vistas isométrica e direita

Na Figura 3.16 é representado o conjunto do actuador e do respectivo ajuste. Já na Figura 3.17 é representado de forma mais detalhada os componentes que constituem o actuador e seu sistema de ajuste referente ao grau de liberdade da inclinação lateral do tronco. O ajuste do servomotor é realizado com o aperto dos parafusos sem cabeça M3 (3) sobre a base (4) que eleva o actuador (6), permitindo a sua deslocação na guia prismática a ele destinado na base posterior do tronco.

Finalizado o desenvolvimento do actuador do movimento de inclinação lateral, é possível agora realizar o aperto final dos parafusos M3 da Figura 3.15, dado que é necessário ter alguma folga para que seja possível colocar o actuador (6) da Figura 3.17 no seu correcto local. Em seguida fixa-se a estrutura do tronco à sua cruzeta da articulação através de dois parafusos de apoio de 6 milímetros de diâmetro.

Tal como foi aplicado na junta responsável pelos movimentos de flexão um sistema de correcção da deformação do eixo do actuador, na junta da inclinação lateral foi aplicado o mesmo princípio, usando o mesmo sistema utilizado na correcção no tornozelo.

Posteriormente são fixadas as peças laterais do tronco, assim como o topo do tronco, através de parafusos M3 (Figura 3.18). De salientar o pormenor de que, aquando do desenvolvimento das peças que compõe as laterais e o topo da estrutura do tronco, foi tido sempre em consideração a redução do peso final da peça, pelo que é possível evidenciar os locais onde foi retirado algum material para que fosse possível cumprir esse objectivo.

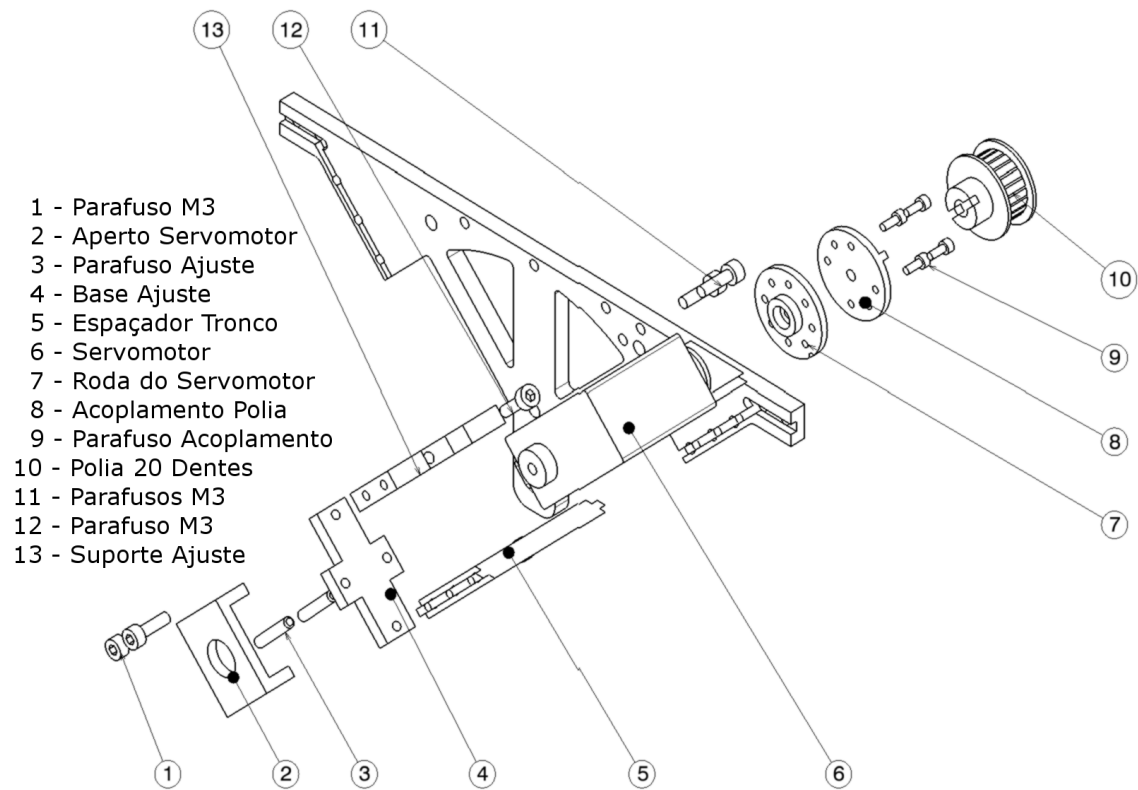


Figura 3.17: Vista explodida do actuador para inclinação lateral.

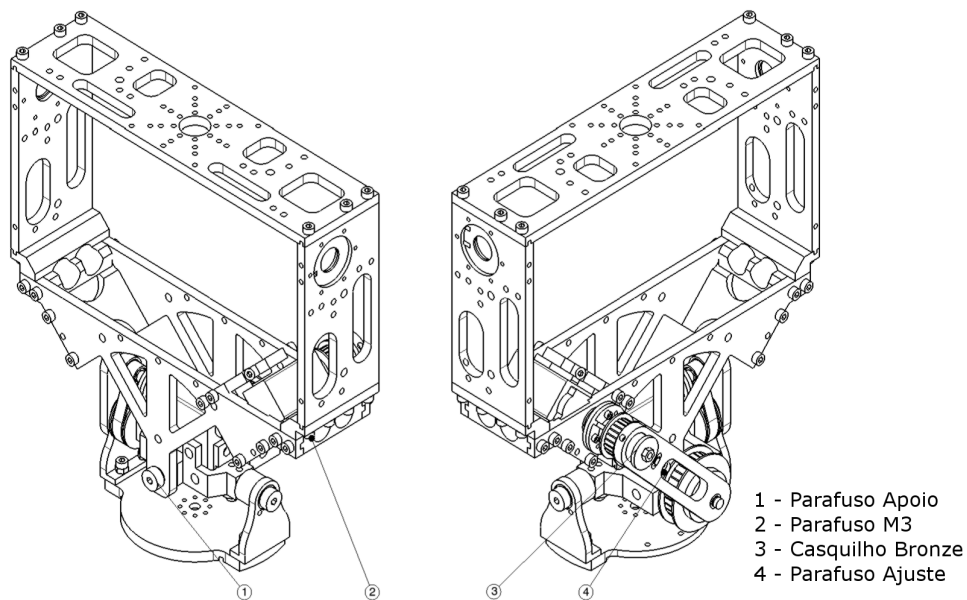


Figura 3.18: Estrutura completa do tronco.

Apoio servomotor ombro

Se por um lado a pretensão de se obter um robô humanóide que seja capaz de desempenhar movimentos complexos, similares aos do ser humano, obriga a dotar a estrutura com os graus de liberdade necessários a execução desses mesmos movimentos, por outro essa adição obriga ao desenvolvimento de novos componentes e a sua posterior colocação na estrutura final.

Esta situação é verificada na articulação do ombro pois, tendo esta sido definida como uma articulação composta por três graus de liberdade, existe a necessidade de que pelo menos um grau de liberdade esteja colocado no tronco do robô. Esta necessidade advém de que os braços do robô devem ser os mais compactos e leves possíveis, por forma a evitar o sobre-dimensionamento dos actuadores. Como tal, foi criado um suporte ao actuador da junta do ombro responsável pelos movimentos de flexão/extensão (figuras 3.19 e 3.20).

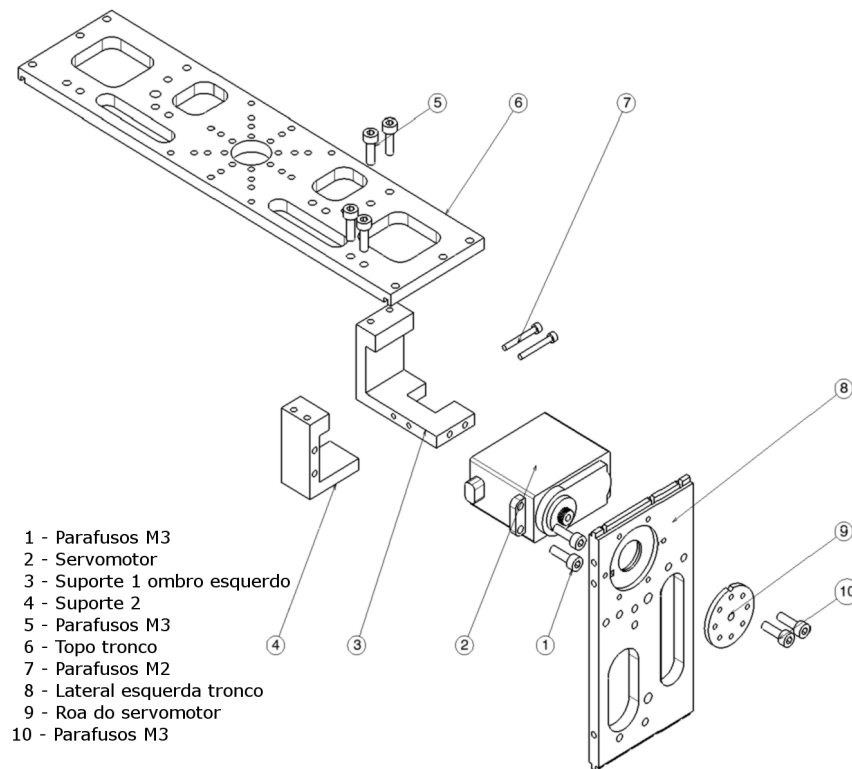


Figura 3.19: Vista explodida da acomodação actuador ombro

O suporte do servomotor (Figura 3.19) é constituído por duas peças maquinadas em nylon (3) e (4) que se encontram fixas entre si por intermédio de dois parafusos M2 (7), e são fixas ao tronco pelo conjunto de parafusos M3 (5) e pelos parafusos M3 (10). A escolha deste material deve-se essencialmente à preocupação do peso final; no entanto, foi tido em consideração o facto de não ser espectável a ocorrência de grandes esforços sobre os suportes, dada a geometria da restante articulação do ombro (ver secção 3.2.2).

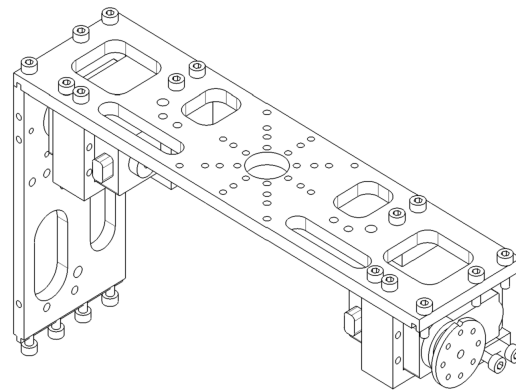


Figura 3.20: Vista isométrica da acomodação actuador ombro

Módulo processamento

Como foi referido anteriormente, é necessário acomodar o computador embebido baseado em PC-104 e a sua placa de expansão no tronco. Para tal foi criada uma estrutura de suporte adequada.

A estrutura de suporte do módulo de processamento é composta essencialmente por 5 componentes (Figura 3.21 à esquerda). As peças (1) e (6) são as responsáveis pelo suporte e fixação à estrutura do tronco, dos componentes do PC-104. Estas peças foram maquinadas em acrílico por forma a reduzir o peso total.

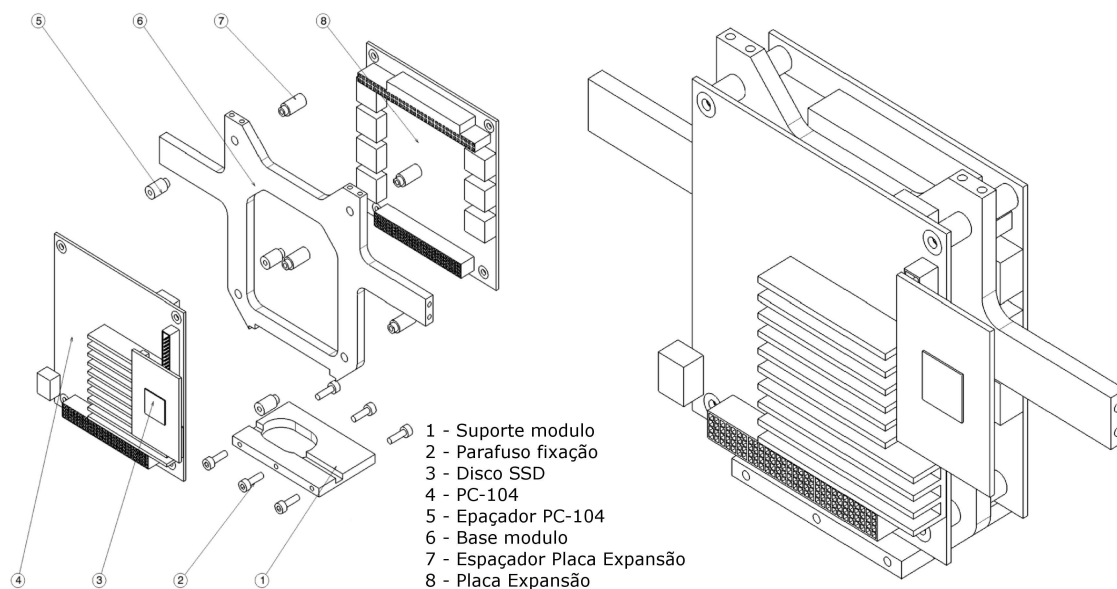


Figura 3.21: Vista explodida e de conjunto do módulo de processamento

Os espaçadores (5) e (7) são feitos de nylon e possuem rosca interior M3. Isto deve-se ao facto de se pretender utilizar um varão roscado, também em nylon (não representado) para que os espaçadores sejam apertados contra o suporte do PC-104 (6). Colocadas no respectivo local, as placas do PC-104 e do módulo de expansão, são fixadas à base do módulo (6) através

de porcas M3 feitas em nylon. A utilização do nylon para garantir a fixação do computador embebido tem como propósito evitar o contacto eléctrico entre as duas placas. Na Figura 3.22 é mostrada a montagem final dos componentes do tronco.

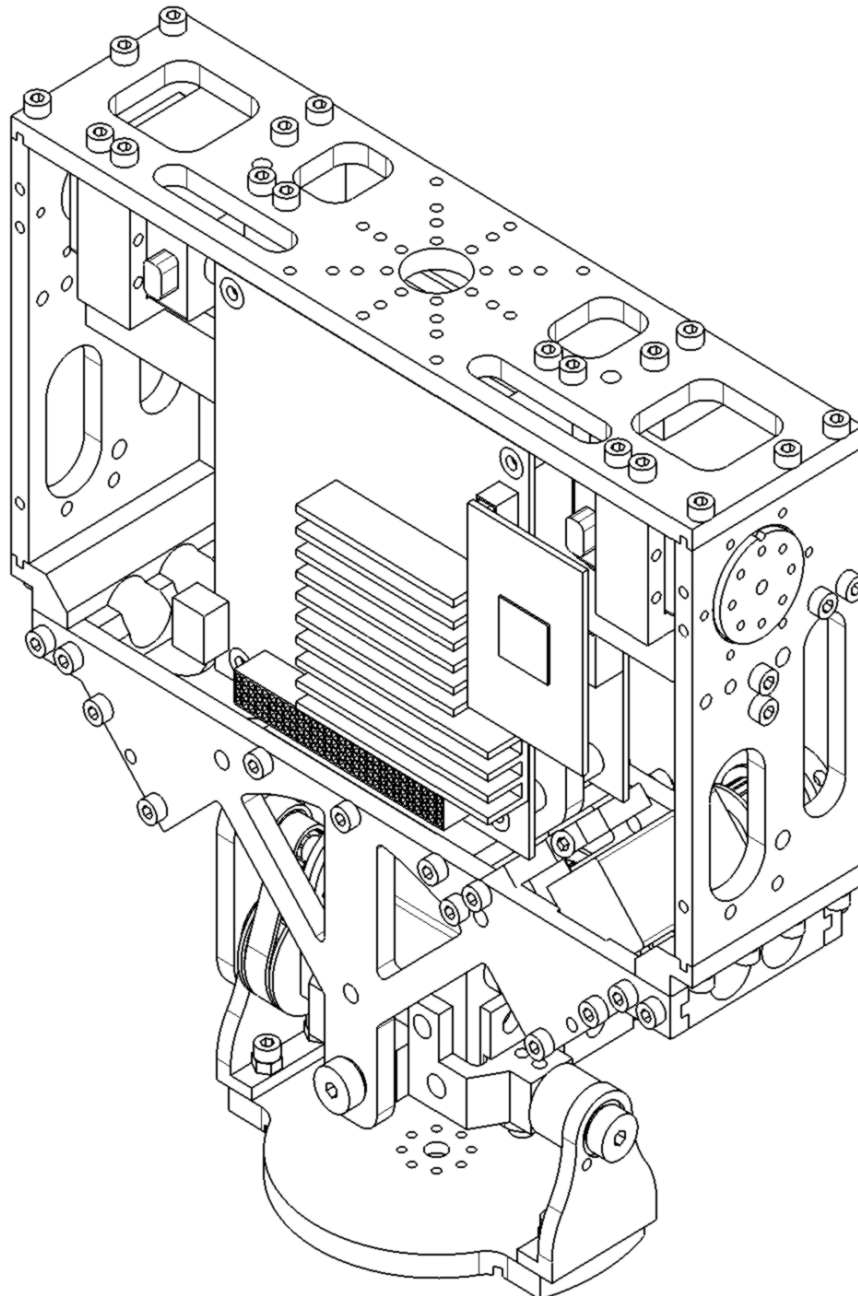


Figura 3.22: Montagem final do tronco.

Suporte para baterias

Dada a geometria e as dimensões das baterias escolhidas optou-se por desenvolver um sistema de suporte que as colocasse na parte de traseira do tronco do robô humanoíde.

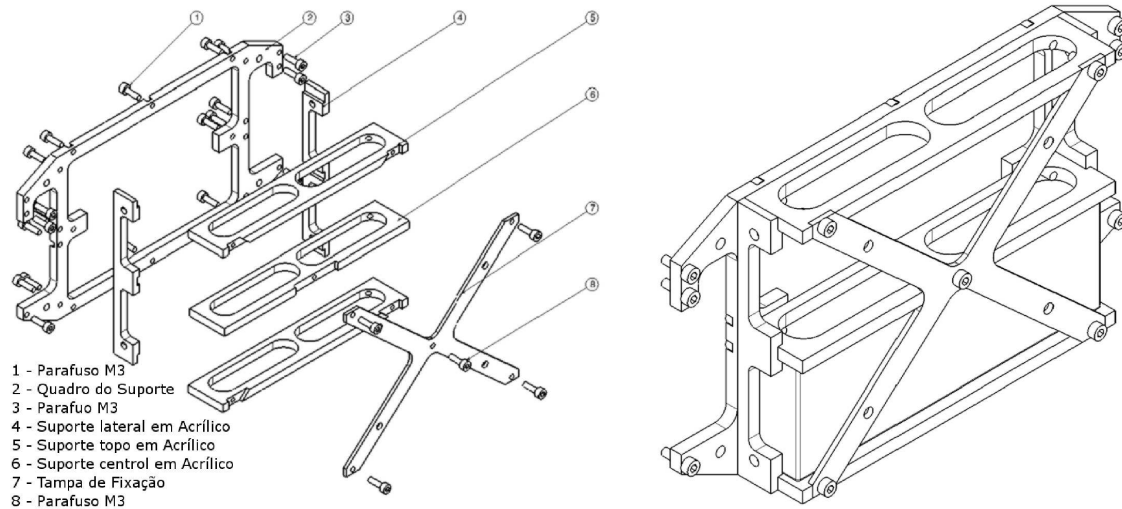


Figura 3.23: Vista explodida e de conjunto do módulo das baterias

O suporte desenvolvido (Figura 3.23) consiste na utilização de dois tipos de material: o alumínio para o quadro do suporte, e o acrílico para os restantes componentes. A escolha do alumínio para o quadro deve-se principalmente ao facto de se pretender obter uma estrutura que seja capaz de suportar o impacto de uma possível queda do robô humanoíde. Já a utilização do acrílico deve-se ao factor de redução peso, sendo que o objectivo dos componentes maquinados neste material é o de apenas fixar as baterias ao quadro do suporte.

Os suportes em acrílico (4) (5) e (6) são fixos ao quadro do suporte por intermédio do conjunto de parafusos M3 (1). Posteriormente o quadro do suporte é fixo à estrutura lateral do tronco (Figura 3.24) através do conjunto de parafusos M3 (3). A tampa de fixação (7) é o elemento final que mantém as baterias no seu respectivo local (Figura 3.23 à direita).

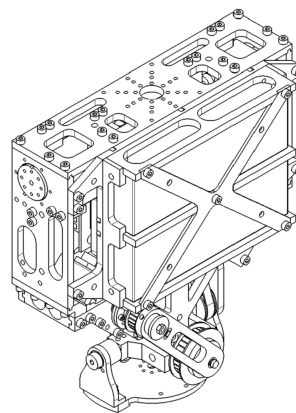


Figura 3.24: Montagem final no tronco.

3.2.2 Braços

A estrutura dos membros superiores é composta por duas subestruturas: o braço e o antebraço. No desenho dos membros superiores optou-se por desenvolver um sistema baseado num endoesqueleto por forma a minimizar o volume final da estrutura. Um aspecto importante que foi ganhando maior relevo durante a fase de desenho foi a criação de uma estrutura completa onde alguns dos seus componentes sejam pequenas derivações de outros componentes, por forma reduzir os tempos de maquinagem.

Iniciou-se o desenvolvimento do braço do robô humanóide a partir do ombro, pois o grau de liberdade referente à flexão já se encontrava definido. Foi então desenvolvido o elemento estrutural que serve de suporte ao segundo e terceiro grau de liberdade (Figura 3.25 à esquerda)

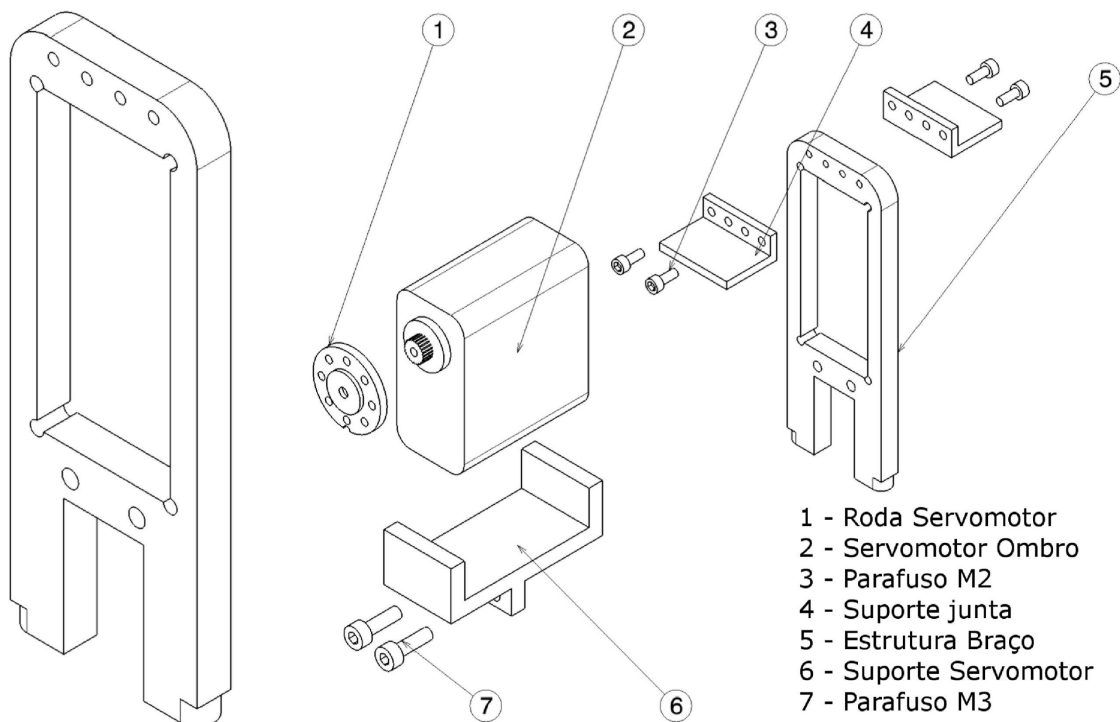


Figura 3.25: Componentes da estrutura do braço e suporte do servomotor do ombro.

A utilização de um sistema baseado num endoesqueleto necessita que elementos, como os servomotores, possuam alguma forma de fixação à estrutura e que esta não permita deslocamentos; para tal, foram desenvolvidos os seguintes componentes (Figura 3.25 à direita): a peça (6) serve de suporte e fixação do servomotor responsável pela adução/abdução do braço à sua estrutura (5). Este suporte é fixo por intermédio de dois parafusos M3 (7). Os suportes (4) têm como objectivo suportar parte do esforço na rotação medial.

Definido o grau de liberdade referente à adução/abdução falta definir o grau referente à rotação do braço. O sistema de rotação do braço (Figura 3.26) funciona da seguinte forma: o servomotor (2) responsável por este movimento encontra-se acoplado ao seu respectivo suporte (4) através de dois parafusos M2 (1), posteriormente o suporte é fixo à base do braço através dos dois parafusos M3 (5).

O movimento de rotação é transmitido do servomotor ao veio de transmissão (7) onde será acoplada a restante parte do braço (Figura 3.26 ao centro).

O veio de transmissão encontra-se confinado a uma caixa (4) e (8) onde este roda sobre dois rolamentos NTB 1226 (6). A utilização dos rolamentos tem como objectivo a redução do atrito na junta e evitar o desgaste do veio quando este é sujeito a esforços. A Figura 3.26 ao centro mostra os restantes componentes da estrutura do braço. O ligador (1) é o elemento que faz a junção entre a estrutura do braço 2 (4) e o veio de rotação por intermédio dos parafusos M2 (2).

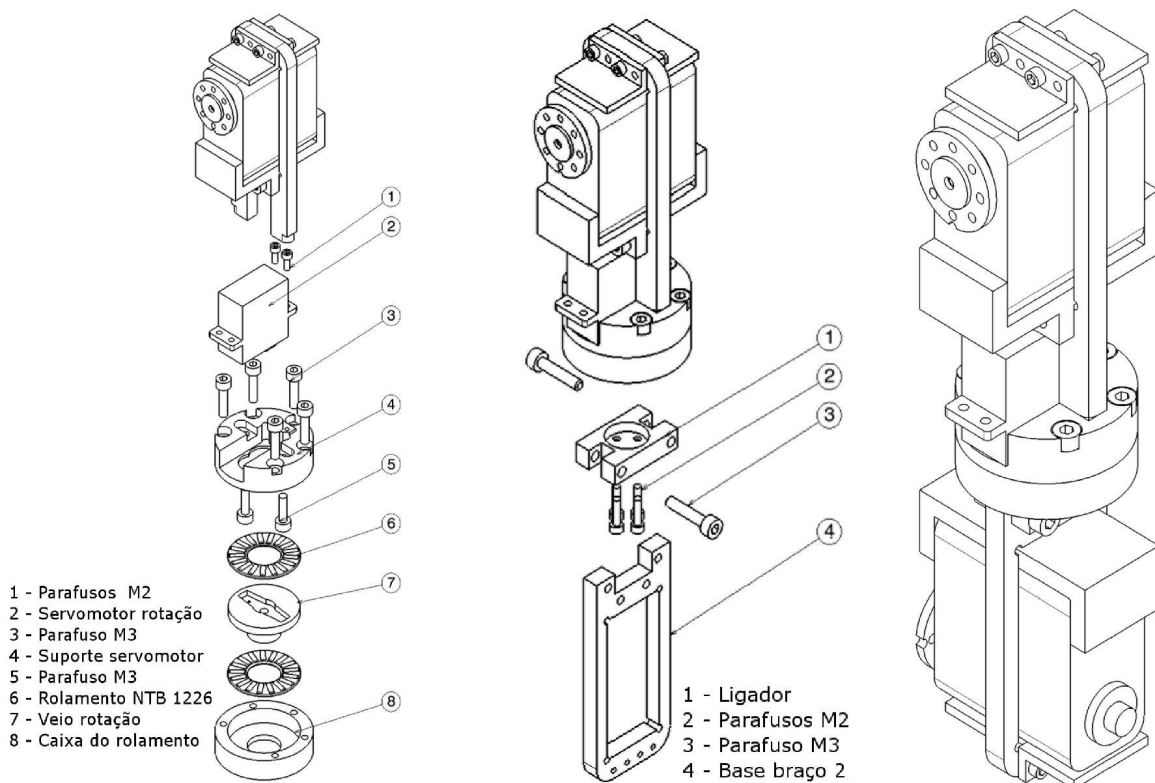


Figura 3.26: Sistema de rotação do braço.

Na estrutura do braço 2 (4) da Figura 3.26 ao centro, encontra-se o servomotor referente ao grau de liberdade existente no cotovelo. Este servomotor está fixo à estrutura da mesma forma que o servomotor do movimento de adução/abdução do ombro (Figura 3.26 à direita).

Para a articulação do cotovelo era necessário desenvolver um componente, que para além de permitir a sua flexão/extensão, pudesse ser aplicado igualmente na articulação do ombro. Tendo por base este pressuposto foi desenvolvida uma junta universal (Figura 3.27 à esquerda).

Durante o desenvolvimento desta junta surgiu a necessidade de criar um sistema de apoio do servomotor neste componente, dado que no esboço inicial o servomotor apenas seria fixado apenas num dos lados.

No sistema agora desenvolvido (Figura 3.27 à direita) o servomotor passa a estar fixo em um dos lados da juntas e apoiado no outro lado. Isto permite que, na ocorrência de eventuais esforços, estes sejam melhor distribuídos pela junta. O mesmo princípio foi utilizado para a articulação do ombro.

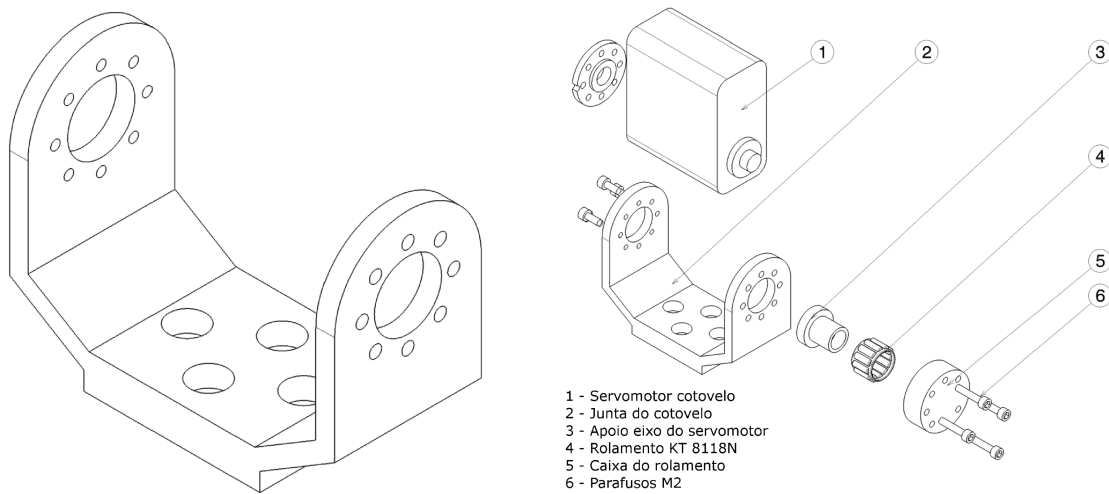


Figura 3.27: Suporte para a junta universal para a articulação do cotovelo.

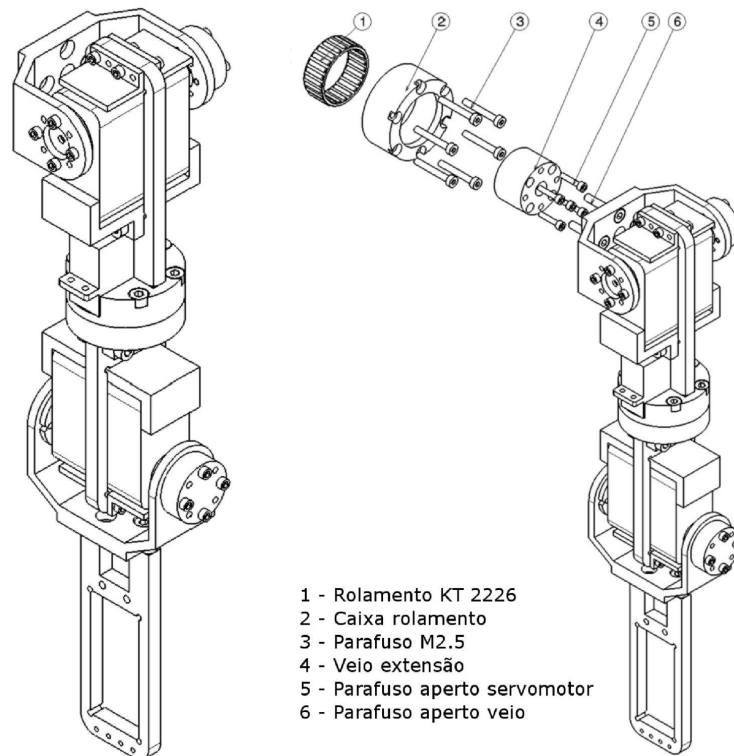


Figura 3.28: Braço completo.

Posteriormente foi adicionado o antebraço à estrutura (Figura 3.28 à esquerda). O antebraço é composto apenas por uma peça idêntica à da estrutura do braço. No entanto, esta peça permite adicionar-lhe a qualquer momento o grau de liberdade existente no antebraço (pronação/supinação), e também prevê também a inclusão do grau de liberdade referente à flexão/extensão do pulso. Este último é baseado no mesmo sistema desenvolvido para o cotovelo e ombro.

Finalizada a construção do braço é necessária a sua implementação no tronco do robô humanóide. No entanto, antes de se pode ligar os membros ao tronco, é necessário criar um veio que prolongue o eixo de rotação do grau de liberdade da flexão/extensão do ombro (Figura 3.28 à direita). Este prolongamento obriga o braço a afastar-se ligeiramente do tronco para que este possa rodar (rotação medial/lateral) livremente sem que ocorra alguma interferência com o tronco. Por forma a que o peso do braço não esteja a actuar directamente sobre o eixo do servomotor foi criada uma caixa (2) que se encontra fixa ao tronco do humanóide onde se inclui um rolamento (1) por forma a reduzir o atrito. O braço é fixado ao servomotor do ombro por intermédio dos parafusos M2 (5). Na Figura 3.29 é mostrada a montagem final dos braços no tronco.

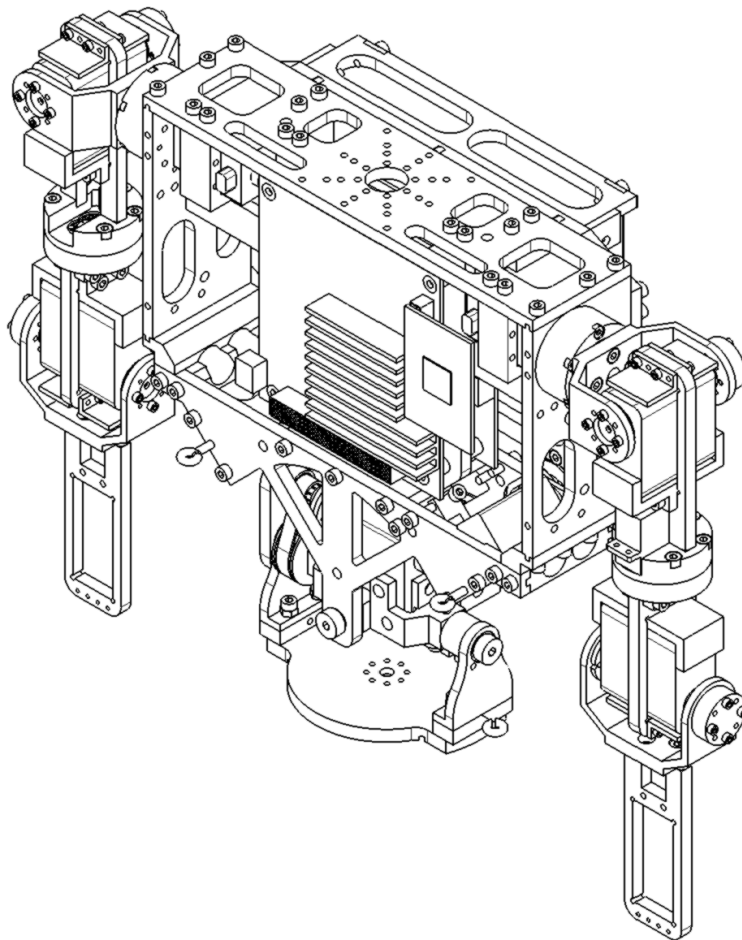


Figura 3.29: Montagem final dos braços no tronco.

3.2.3 Cabeça

No desenvolvimento da cabeça, o principal objectivo é permitir a acomodação de duas camaras *FireWire* que serão utilizadas num sistema de visão. Além disso a cabeça deverá permitir a rotação das camaras segundo o sistema pan&tilt.

O sistema pan&tilt consiste no movimento de rotação de duas juntas, uma segundo o eixo longitudinal do corpo do robô humanóide e a outra sobre um eixo paralelo ao eixo longitudinal segundo o plano frontal.

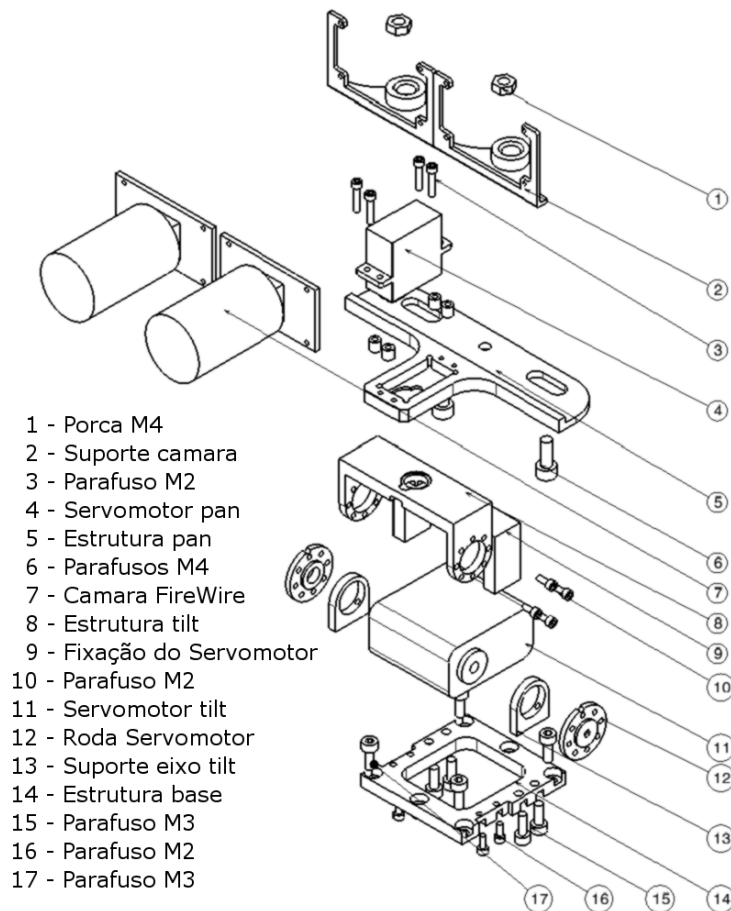


Figura 3.30: Vista explodida cabeça.

O sistema desenvolvido (Figura 3.30) consiste numa base (14) que é fixada ao topo do quadro do tronco por intermédio do conjunto de parafusos (17). Esta opção foi tomada tendo em consideração a possibilidade de permitir remover a cabeça, quando necessário, para se poder realizar testes com o sistema de visão sem que seja necessária a utilização do robô humanóide completo. As camaras (7) e o seu respectivo suporte (2) estão fixas à base da rotação "pan" por intermédio de um parafuso M4 (6). Este parafuso permite a regulação do afastamento das camaras entre si. A peça (9) serve apenas de fixação do servomotor do movimento "tilt" (11) à estrutura base (14) para que este não rode em torno do seu próprio eixo de rotação. Na Figura 3.31 é mostrada a montagem completa do sistema, e na Figura 3.32 é mostrada a montagem no tronco do robô humanóide.

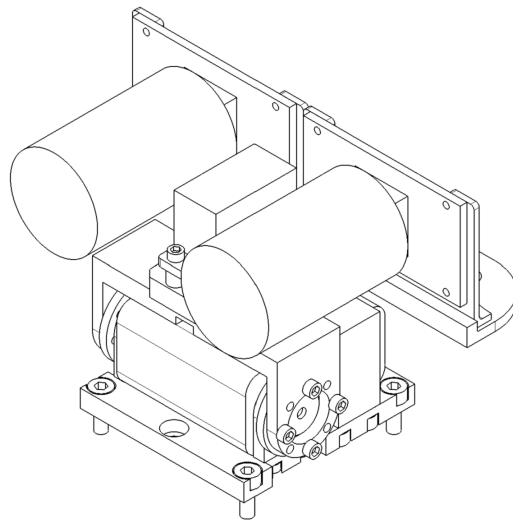


Figura 3.31: Montagem completa da cabeça com as duas câmaras.

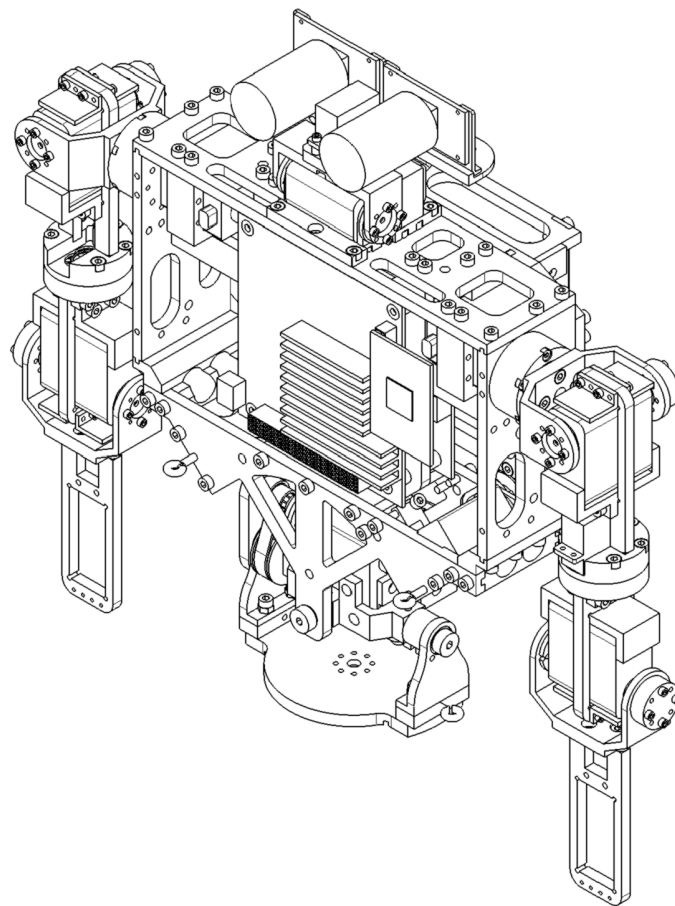


Figura 3.32: Montagem completa do tronco do robô humanóide.

3.3 Implementação da actuação passiva

Aquando do desenvolvimento da articulação do tronco, e também após se obter o esboço final, era notória a necessidade de se implementar a actuação passiva em conjunto com os actuadores.

Esta imposição levanta imediatamente duas questões: que tipo de actuadores passivos deverão ser usados, e quais os pontos, na estrutura do tronco do robô humanóide que otimizarão a sua aplicação.

A resposta à primeira questão remete para o trabalho que foi desenvolvido anteriormente, nos membros inferiores do humanóide, onde o tipo de actuadores passivos usados foram os elásticos. O tipo de actuação passiva a utilizar passa pela escolha de um elemento que permita uma grande capacidade de deformação dentro do regime elástico. Assim sendo, a decisão passou pela utilização de molas ou elásticos, tendo sido optado este último dado que estes são mais permissivos relativamente às suas capacidades de deformação em qualquer direcção. No entanto, e tendo em consideração que os elásticos são bastante susceptíveis à perda das suas características ao longo do tempo, foram adoptadas medidas que propiciam a sua alteração para a utilização de molas helicoidais.

A resposta à segunda questão necessita de uma breve análise à articulação do tronco. Como já foi referido neste capítulo, a articulação do tronco permite uma amplitude de movimentos referente à flexão/extensão de cerca de 90° , cerca de 15° de hiperextensão e de 45° de inclinação lateral (para ambos os lados).

Relativamente ao movimento de flexão/extensão será necessário ter em conta que a implementação de actuadores passivos terá de ser entre um elemento móvel da estrutura, por exemplo a cruzeta da articulação, e um elemento que se mantenha fixo durante o movimento, ou seja a base do tronco. No movimento de inclinação lateral, os elementos de fixação terão de ser colocados entre um elemento móvel (estrutura de suporte tronco) e um elemento fixo. Esse elemento fixo poderá ser na estrutura da pélvis, no entanto essa opção não será viável para não impedir a rotação do tronco segundo o eixo longitudinal.

Com base nestes pressupostos foi desenvolvido o seguinte sistema (Figura 3.33).

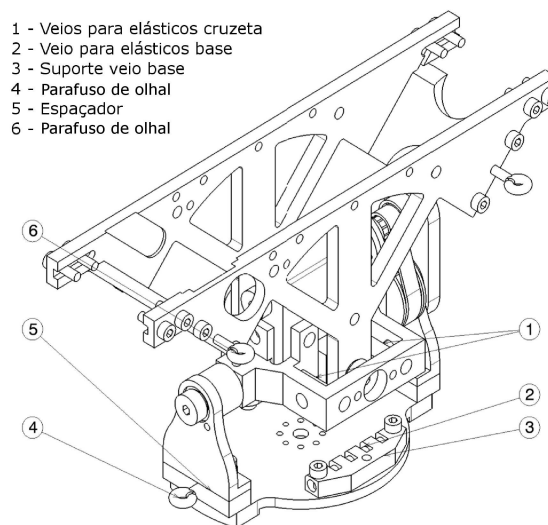


Figura 3.33: Elementos da actuação passiva.

Os elementos passivos relativos ao movimento de flexão/extensão são colocados entre os veios (1) e (2), actuando quando o tronco é flectido. Os componentes relativos ao movimento de inclinação lateral são os parafusos de olhal (4) e (6) onde os elásticos são colocados (Figura 3.34 à esquerda). Com a inclusão da peça (3), que serve de fixação do veio (2) à base do tronco, foi necessário proceder a uma ligeira correcção dado que a colocação da peça (3) faz com que não seja possível atingir os 15° de hiperextensão do tronco. Por isso foi adicionado à estrutura o espaçador (5) que, para além de permitir a fixação do elemento constituinte da actuação passiva, permite também elevar ligeiramente a estrutura permitindo obter de novo os 15° de hiperextensão do tronco (Figura 3.34 à direita).

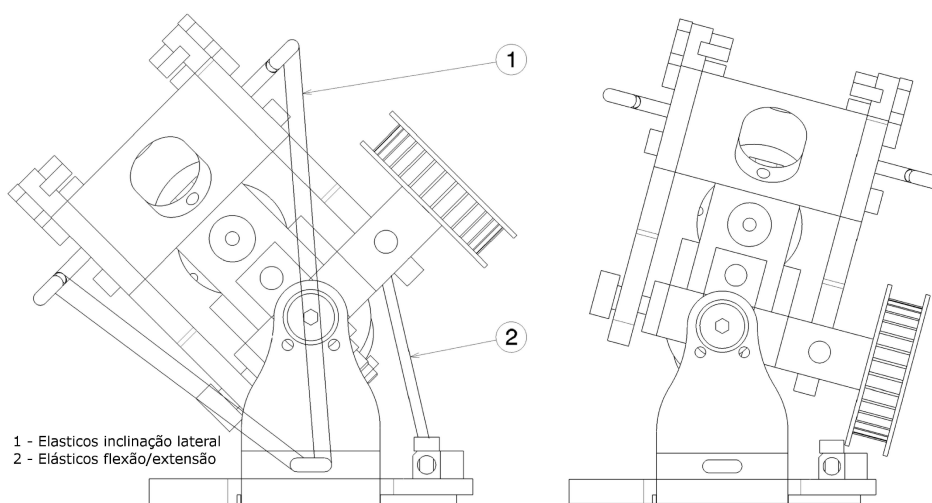


Figura 3.34: Actuação dos elementos passivos e limites de hiperextensão.

Durante a montagem deste sistema verificou-se a ocorrência de algumas incorrecções. Inicialmente verificou-se que a fixação dos elásticos nos veios da cruzeta (1) da Figura 3.33, era de todo impraticável já que o espaço de manobra neste local é praticamente nulo. Desta forma procedeu-se a uma ligeira alteração na abordagem à forma como os elásticos são fixos neste ponto (Figura 3.35).

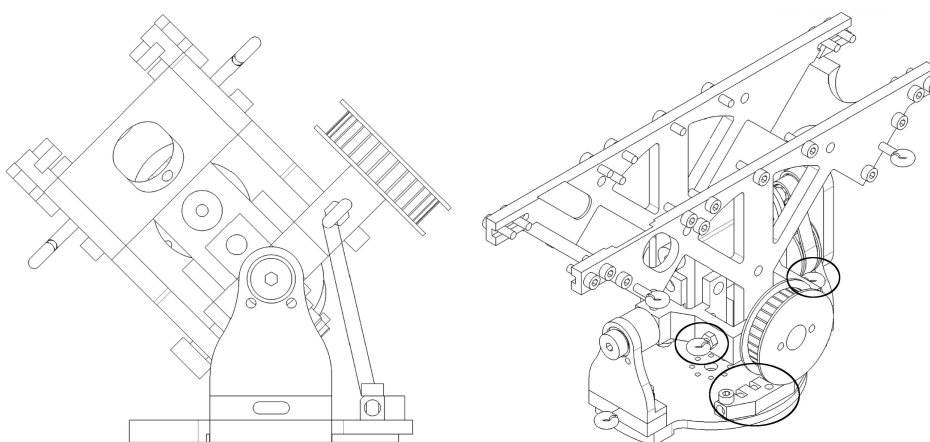


Figura 3.35: Alteração na actuação dos elementos passivos.

Efectuada a alteração procedeu-se à montagem final do sistema. Contudo, durante a montagem verificou-se novamente a existência incorrecções no correcto funcionamento deste sistema. Uma das incorrecções verificadas foi a de que o número de elásticos utilizados era manifestamente insuficiente e que com isso o elemento de fixação (3) da Figura 3.33 não teria a capacidade de poder acomodar mais. Para além disso, foi notório que, tendo em conta os actuais pontos de fixação, estes não são os que melhor potenciam as propriedades dos elásticos, além de que obrigava a estrutura do tronco a entrar em hiperextensão, desviando-se da sua posição anatómica correcta. Desta forma, procedeu-se a nova alteração no sistema desenvolvido.

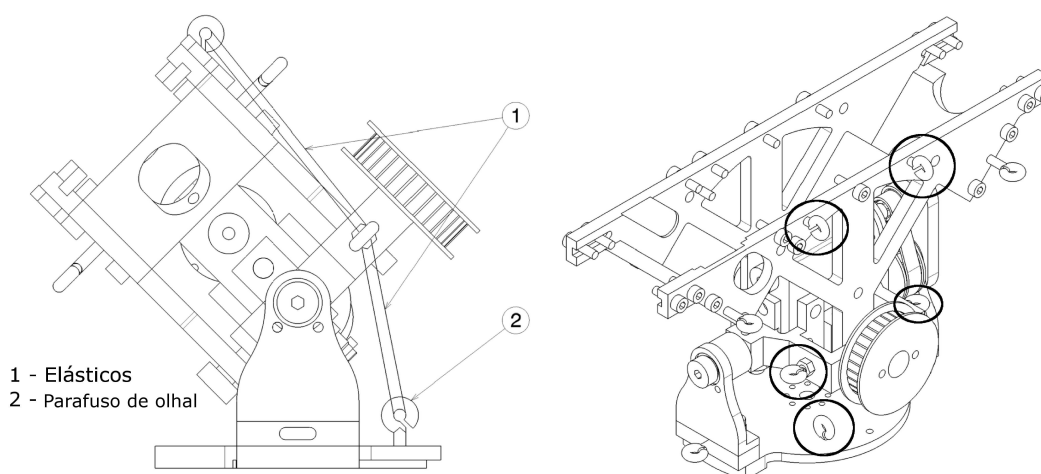


Figura 3.36: Funcionamento da nova configuração de fixação.

A alteração passou por mudar o ponto de fixação que anteriormente se encontrava na cruzeta para a estrutura que serve de suporte do tronco (Figura 3.36 à direita). Nesta nova configuração o elemento de fixação dos elásticos que se encontrava na base do tronco, foi substituído por dois parafusos de olhal M3 (2) (Figura 3.36 à esquerda) e os pontos que se encontram na cruzeta servem agora como guias para os elásticos. Com esta alteração é possível adicionar mais elásticos ao sistema, ou substituí-los em caso de ruptura de uma forma mais simples. Também com esta alteração foi possível otimizar a função dos elásticos como elementos actuadores passivos, permitindo assim cumprir com os objectivos que eram pretendidos com este trabalho.

3.4 Maquinação e materiais

Para a fabricação da maioria dos componentes integrantes deste projecto foi utilizada uma fresadora CNC de 3 eixos (figura 3.37). Do ponto de vista da fabricação dos componentes e no contexto em que se insere este projecto, a fresadora CNC torna-se na melhor ferramenta de trabalho, dado que esta permite a obtenção de peças de elevada precisão.

Durante toda a fase de desenho das peças foi necessário ter em consideração aspectos do ponto de vista da maquinação das mesmas. Por diversas ocasiões foi necessário desenvolver novas peças, por dificuldades em se obter a melhor fixação destas na mesa da máquina, ou por indisponibilidade de ferramentas necessárias à obtenção de um determinado processo de maquinação.



Figura 3.37: Fresadora CNC *MIKRON VCE 500*.

A escolha dos materiais para a construção do tronco e membros superiores deve-se principalmente aos objectivos deste trabalho. É necessário escolher um material que seja capaz de oferecer uma boa resistência aos esforços que serão realizados na estrutura, e ao mesmo tempo apresentar uma densidade relativamente baixa, tendo em conta o peso final. Além disso, o material a utilizar terá de ser maquinável. Tendo em consideração estes aspectos optou-se pela utilização do alumínio como o principal material, salvo as excepções apresentadas neste capítulo onde não é prevista a ocorrência de esforços significativos.

Capítulo 4

Dimensionamento e Simulações

Neste capítulo são apresentados todos os cálculos referentes ao dimensionamento da estrutura, ao dimensionamento dos servomotores que actuam no tronco e nos membros superiores, assim como os elementos que compõe a actuação passiva. Serão também apresentados os resultados das simulações mecânicas realizadas no âmbito da validação dos componentes estruturais.

4.1 Dimensionamento

Muito do dimensionamento dos componentes que constituem a estrutura do robô humanoíde foi realizado durante a fase de desenho da proposta de solução. No entanto, estes só agora são apresentados por forma a simplificar a leitura deste trabalho.

4.1.1 Dimensionamento estrutural

Por forma a que a estrutura desenvolvida possa cumprir com os objectivos propostos no que diz respeito as relações antropomórficas, foi necessário dimensionar os comprimentos dos segmentos do tronco, membros superiores e cabeça. As dimensões obtidas referentes aos segmentos permitem ter uma ideia inicial sobre a forma como os componentes serão colocados nos respectivos segmentos.

É necessário recorrer novamente à relação que permite obter as dimensões dos segmentos em função da altura final e da relação antropométrica. Tem-se então em consideração a equação:

$$C_{seg} = H \times R_{antro} \quad (4.1)$$

Onde H é a altura final da estrutura (definida anteriormente como sendo de 670 milímetros), C_{seg} é o comprimento do segmento que se pretende analisar e R_{antro} é a relação antropométrica para esse mesmo segmento.

Relembrando os comprimentos dos segmentos corporais (Figura 4.1) é possível agora obter as dimensões dos segmentos do robô humanoíde para que este seja antropomorficamente correcto.

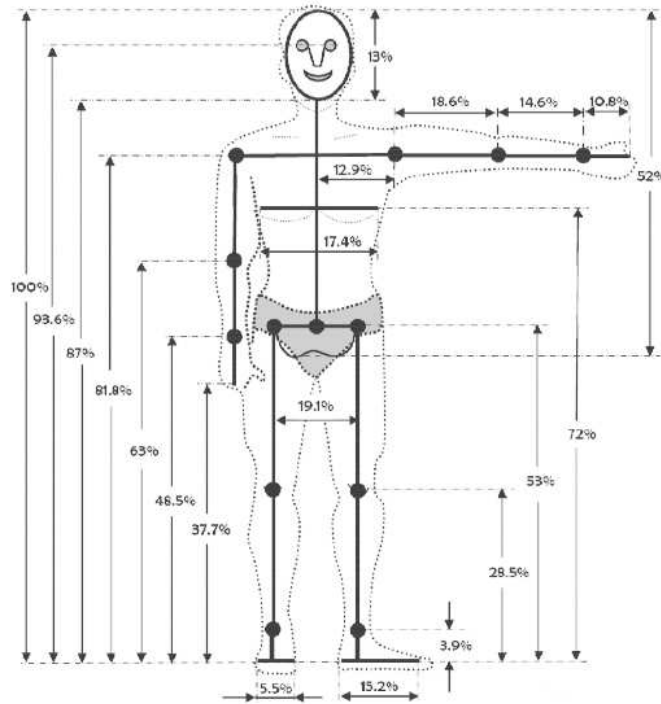


Figura 4.1: Comprimento dos segmentos corporais. [33]

Comprimento do braço (C_{Bra})

Para o cálculo do comprimento do braço com base na altura final e na sua respectiva relação antropométrica temos pela substituição da relação 4.1:

$$C_{Bra} = H \times R_{Bra} = 670 \times 0.186 \approx 125mm$$

Comprimento do antebraço (C_{Antbr})

Para o cálculo do comprimento do antebraço com base na altura final e na sua respectiva relação antropométrica temos pela substituição da relação 4.1:

$$C_{Antbr} = H \times R_{Antbr} = 670 \times 0.146 \approx 98mm$$

Comprimento do tronco (C_{Tronco})

No dimensionamento do comprimento do tronco considerou-se que a medição efectuada para efeitos de cálculo seria a diferença entre os pontos referentes à altura dos ombros (percentil 81.9%), relativamente ao chão, e à altura da pélvis igualmente relativa ao chão (percentil 53%). No entanto, e tendo em conta que no desenvolvimento da pélvis e anca parte do espaço destinado ao tronco encontra-se ocupado (Figura 4.2), optou-se por considerar o comprimento referente ao pescoço do robô humanóide como sendo parte integrante do tronco. Desta forma, a medição do comprimento final é realizado entre os pontos referentes à base da cabeça (percentil 87%) e à pélvis (percentil 53%), o que permite obter um maior espaço, necessário para a acomodação dos componentes no tronco.

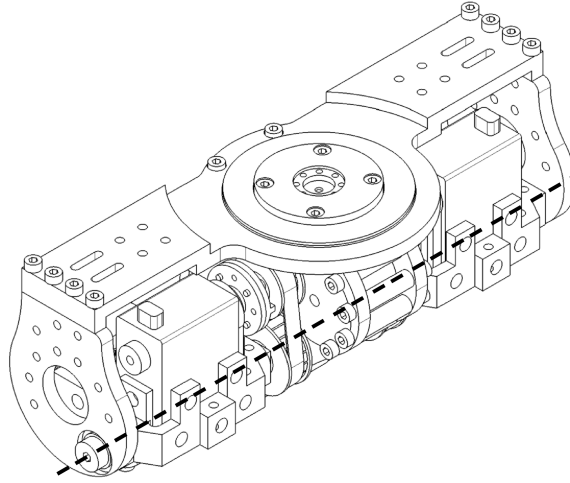


Figura 4.2: Pélvis e eixo da anca do robô humanóide.

Então para o cálculo do comprimento do tronco temos:

$$R_{Tronco} = R_{BaseCab} - R_{Pélvis} = 0.87 - 0.53 = 0.34$$

$$C_{Tronco} = H \times R_{Tronco} = 670 \times 0.34 \approx 228mm$$

Comprimento entre ombros (C_{Ombros})

Para o cálculo do comprimento entre ombros com base na altura final e na sua respectiva relação antropométrica temos pela substituição da relação 4.1:

$$C_{Ombros} = H \times R_{Ombros} = 670 \times (2 \times 0.129) \approx 173mm$$

Comprimento da cabeça ($C_{Cabeça}$)

Para o cálculo do comprimento da cabeça com base na altura final e na sua respectiva relação antropométrica temos pela substituição da relação 4.1:

$$C_{Cabeça} = H \times R_{Cabeça} = 670 \times 0.13 \approx 87mm$$

Na tabela 4.1 são comparados os comprimentos finais dos segmentos da estrutura com os que foram dimensionados anteriormente.

Tabela 4.1: Comparação entre comprimentos dos segmentos

Componente	Comp. dimensionado	Comp. real	Diferença
Antebraço	098 mm	089 mm	009 mm
Braço	125 mm	123 mm	002 mm
Cabeça	087 mm	066 mm	021 mm
Entre ombros	173 mm	283 mm	-110 mm
Tronco	228 mm	247 mm	-019 mm

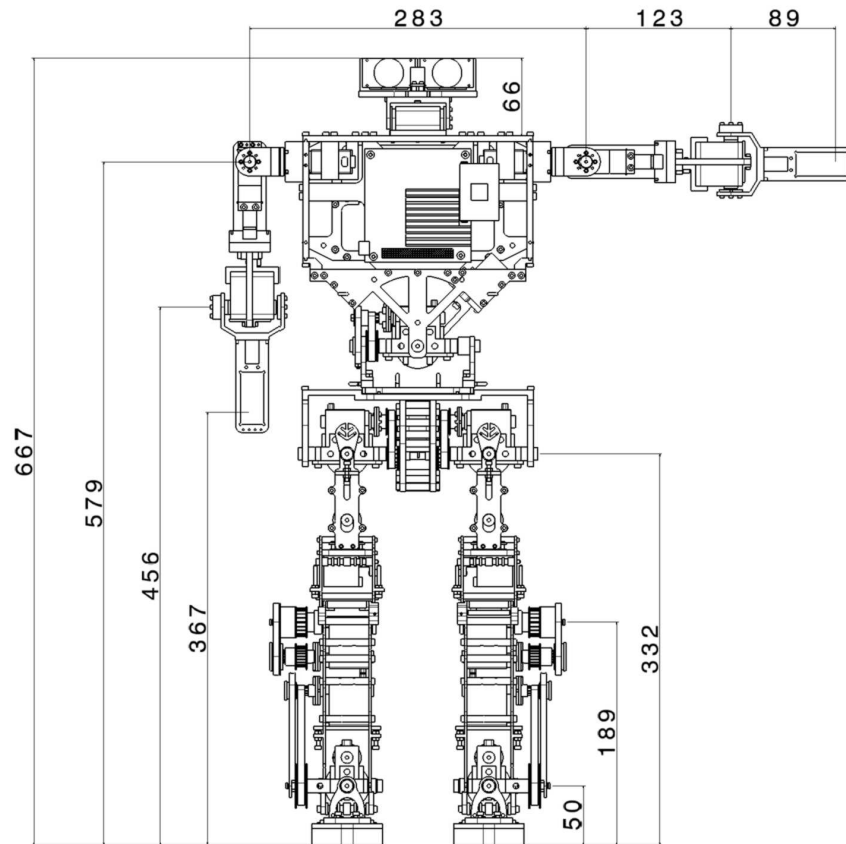


Figura 4.3: Comprimentos finais do robô humanóide.

Tabela 4.2: Comparação entre alturas em relação ao chão

Componente	Alt. dimensionada	Alt. real	Diferença
Altura final	670 mm	667 mm	003 mm
Cotovelo	422 mm	456 mm	-033 mm
Ombro	549 mm	579 mm	-030 mm
Pulso	325 mm	367 mm	-042 mm

A tabela 4.1 mostra que o comprimento do segmento entre ombros não cumpre com as relações antropométricas. Este facto deve-se principalmente ao desenho da pélvis e posteriormente do tronco do robô humanóide, pois é necessário afastar ligeiramente parte da junta dos ombros para que nos movimentos de flexão/extensão dos membros superiores estes não colidam com a pélvis. Houve a necessidade de aumentar ligeiramente o tamanho do tronco (19mm) por forma a melhor acomodar a placa de PC. Este valor foi compensado na criação de uma cabeça mais compacta.

A Figura 4.3 mostra as cotas referentes aos comprimentos dos segmentos, assim como a sua posição na estrutura final relativamente ao solo. Na tabela 4.2 é indicada a comparação entre as cotas antropométricas dimensionadas e as cotas reais obtidas. É possível verificar uma ligeira discrepância em cerca de 30mm, este facto deve-se à necessidade de se colocar a

junta do ombro nessa posição para que se obtenha algum espaço adicional, para que no futuro se possa incluir na estrutura outros componentes que até à data ainda não se encontram totalmente desenvolvidos, como as unidades de distribuição de energia, sensores inerciais e suas respectivas placas de controlo, entre outros. As diferenças encontradas para as restantes juntas são o resultado dessa discrepância mais a diferença entre os comprimentos dos segmentos dimensionados e os comprimentos reais obtidos para esses mesmos segmentos.

Amplitudes de movimentos

Por forma a que a estrutura a ser desenvolvida cumpra com todas as premissas antropométricas, é imperativo que as amplitudes das juntas das articulações também cumpram com essas premissas. Desta forma, a estrutura humanóide final será capaz de desempenhar uma larga variedade de movimentos em muitos casos semelhantes aos dos seres humanos.

Relembrando a secção 1.8 deste trabalho, obtêm-se as amplitudes das articulações do corpo do ser humano. A tabela 4.3 mostra a comparação entre as amplitudes dos movimentos do ser humano e as amplitudes dos movimentos da estrutura humanóide desenvolvida.

Tabela 4.3: Comparação das amplitudes de movimentos

Componente	g.l.	Ampl. Ser Humano	Ampl. Humanóide
Ombro:			
	θ_1	240°	180°
	θ_2	230°	180°
	θ_3	180°	120°
Cotovelo:			
	θ_1	150°	130°
	θ_2	90°	<i>n.d.</i> *
Pulso:			
	θ_1	180°	180° ^{***}
Cabeça:			
	θ_1	<i>n.d.</i> ^{***}	90°
	θ_2	<i>n.d.</i> ^{***}	120°
Tronco:			
	θ_1	120°	105°
	θ_2	90°	90°
	θ_3	90°	180°

(*) - Projectado mas a ser desenvolvido no futuro

(**) - Projectado com base nos componentes do cotovelo

(***) - Levantamento não foi efectuado

É possível verificar que em algumas articulações, como por exemplo o ombro, o valor da amplitude de certas juntas do robô humanóide se encontra aquém das reais capacidade do ser humano. Isto deve-se ao facto de que os servomotores utilizados se encontram, na generalidade limitados, entre os 120° e os 180°. Esta limitação encontra-se definida por defeito sendo possível retirá-la. No entanto tal não deverá ser efectuado, pois implica a modificação do servomotor que poderá levar a um incorrecto funcionamento da placa controladora do mesmo. As figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, representam os graus de liberdade (θ) escolhidos, para a respectiva articulação apresentada na tabela 4.3.

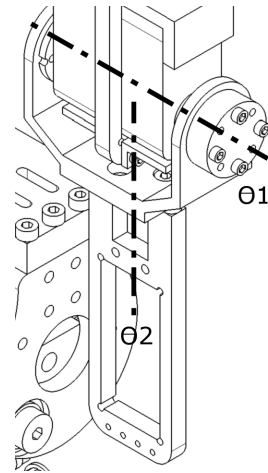
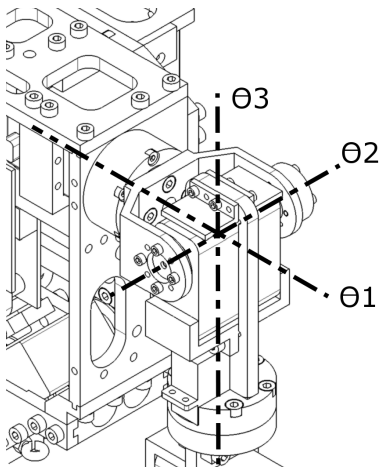


Figura 4.4: Graus de liberdade do ombro. Figura 4.5: Graus de liberdade do cotovelo.

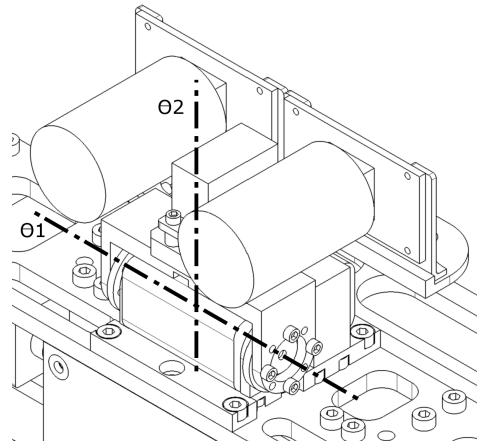
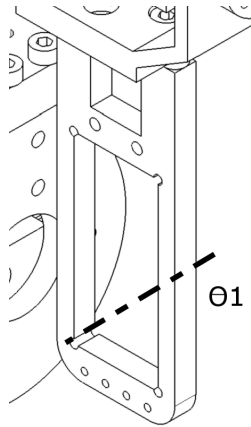


Figura 4.6: Graus de liberdade do pulso. Figura 4.7: Graus de liberdade da cabeça.

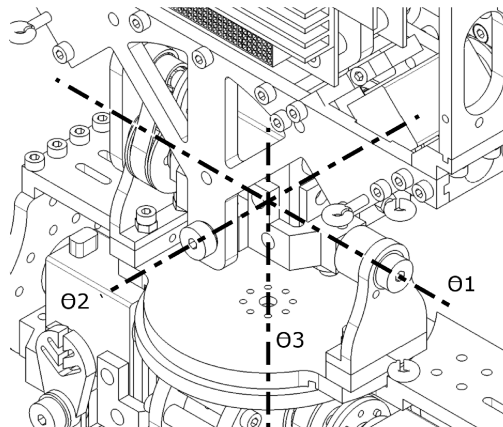


Figura 4.8: Graus de liberdade do tronco.

4.1.2 Dimensionamento dos servomotores

Tendo em consideração que um dos objectivos deste projecto passa por desenvolver uma estrutura o mais compacta possível, surge então a necessidade de definir que tipo de actuadores serão implementados nas juntas das articulações. Essa escolha passa pela utilização de servomotores, pelos motivos anteriormente referidos (secção 3.1.3).

Nesta secção será feito o dimensionamento destes actuadores, por forma a obter a melhor escolha para cada junta. Esta escolha envolve estudar que tipo de esforços estão a ser aplicados nas juntas e calcular os valores do binário necessários para vencer esses esforços. Por último, será realizada a escolha do servomotor que melhor relação binário/volume tiver, em função das necessidades específicas de cada junta.

Formulação

Para se determinar os momentos que cada motor deverá fornecer para se realizar os movimentos pretendidos, é necessário efectuar os cálculos dos binários necessários para se vencer as forças de atrito, a inércia e também os binários necessários para que seja possível sustentar o equilíbrio do sistema numa determinada posição.

Por forma a simplificar a leitura deste trabalho, e tendo em consideração que os cálculos efectuados para cada junta são semelhantes, nesta secção será descrita a formulação de base para os cálculos acima referidos. Posteriormente serão descritas as especificações relativas a cada junta e no fim serão apresentados todos os resultados por forma a facilitar sua comparação.

O calculo do binário necessário para seja possível vencer as forças de atrito é dado pela seguinte expressão:

$$\tau_{atrito} = r \times F$$

Onde τ_{atrito} é o binário necessário para vencer o atrito, r é a distancia entre o eixo de rotação da junta do cotovelo e o ponto de aplicação da força de atrito e F é a força de atrito. Por sua vez a força de atrito é determinada pela expressão:

$$F = \mu \times P$$

Onde F é a força de atrito, o μ é o valor do coeficiente de atrito estático (0.10), o P o peso da estrutura em causa ($P = m \times g$, com $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$). A massa m é a massa total do sistema a considerar.

Para a determinação do binário necessário para se vencer a inércia, considerou-se que o movimento de 360° é realizado em $2s$, e que esta velocidade é atingida ao fim de $0.1s$.

Desta forma, determina-se que a velocidade angular é dada por:

$$\omega = \frac{2\Pi}{2} \approx 3.14 \text{ rad.s}^{-1}$$

A aceleração angular é dada por:

$$\dot{\omega} = \frac{\omega}{\Delta t} = \frac{3.14}{0.1} \approx 31.4 \text{ rad.s}^{-2}$$

O binário necessário para impor a aceleração angular determinada anteriormente é dado por:

$$\tau_{dinâmico} = J \times \dot{\omega}$$

Onde J é o momento de inércia e $\dot{\omega}$ a aceleração angular, calculada anteriormente. De forma a ser possível calcular o J optou-se por simplificar o problema, considerando todos componentes do sistema, como sendo massas pontuais. Desta forma o J pode ser calculado da seguinte forma:

$$J = \sum_{k=i}^n m_i r_i^2$$

O valor r é a distancia entre o eixo de rotação e o centro de massa de cada componente.

Posteriormente é necessário calcular o binário que o servomotor deverá desenvolver por forma a conseguir sustentar uma carga aplicada numa determinada posição. Este valor pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\tau_{estático} = \sum_{k=i}^n r_i \times F_i$$

Onde F é a força que actua no respectivo centro de massa e r é o comprimento entre o eixo de rotação e o centro de massa.

Por último é realizado o cálculo do valor do binário que o servomotor deverá fornecer para que seja possível efectuar os movimentos pretendidos.

Para este cálculo considerou-se que o valor final é obtido através da soma de todos os binários calculados anteriormente. Ao optar por esta forma de cálculo está-se a ter em conta todos os movimentos possíveis da junta, isto é, tem-se em consideração os binários necessários para vencer o atrito e a inércia para qualquer que seja o ponto de início do movimento. Desta forma, tem-se que o binário final (τ_{motor}) é dado por:

$$\tau_{motor} = \tau_{atrito} + \tau_{dinâmico} + \tau_{estático}$$

Servomotores da articulação do ombro

Para o dimensionamento dos servomotores referentes aos movimentos de flexão/extensão (Figura 4.9 à esquerda), de abdução/adução (Figura 4.9 à direita) e de rotação (Figura 4.10 da articulação do ombro considerou-se que estes movimentos são efectuados com uma massa de 500 gramas colocada no eixo da junta do pulso (Figura 4.8).

Os cálculos efectuados para a determinação do $\tau_{estático}$ foram realizados na posição extrema (90°) representado a tracejado nas figuras acima referidas.

Ainda sobre o dimensionamento destes servomotores foi considerado, para efeitos de cálculo, que a massa dos servomotores teóricos referentes aos movimentos de flexão/extensão e de abdução/adução têm 62 gramas, e o servomotor de rotação tem 13 gramas. Para o cálculo do $\tau_{estático}$ considerou-se que o ponto de aplicação da força de atrito situa-se no ponto de contacto entre o veio e o rolamento, para os movimentos de flexão/extensão e de abdução/adução. No movimento de rotação, considerou-se que a força de atrito é aplicada na extremidade do componente (7) (Figura 3.26 ao centro, secção 3.2.2) em contacto com o rolamento.

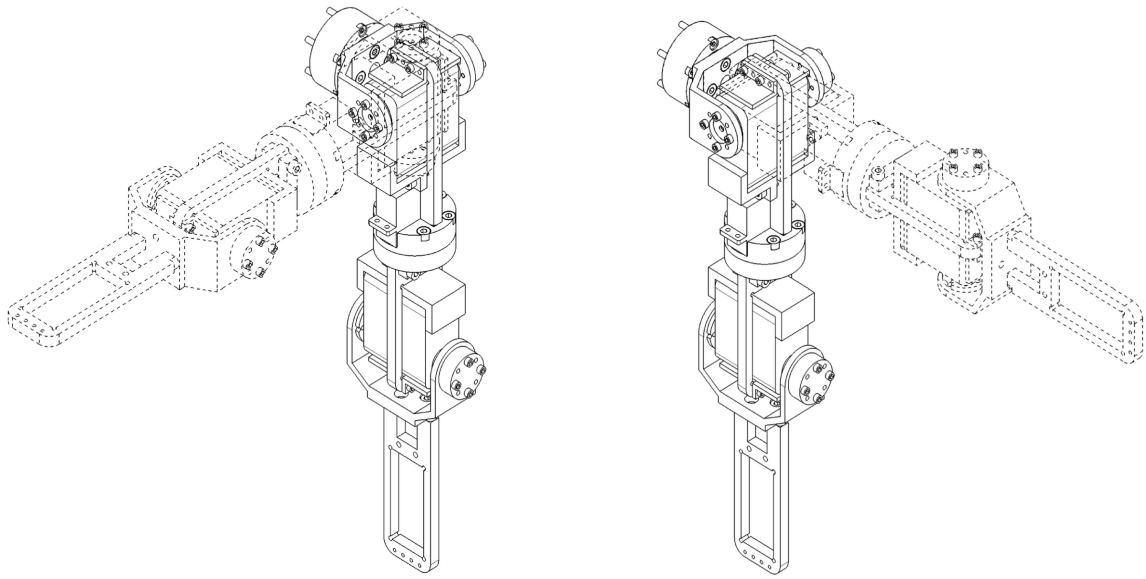


Figura 4.9: Movimentos de flexão/extensão e de abdução/adução da articulação do ombro.

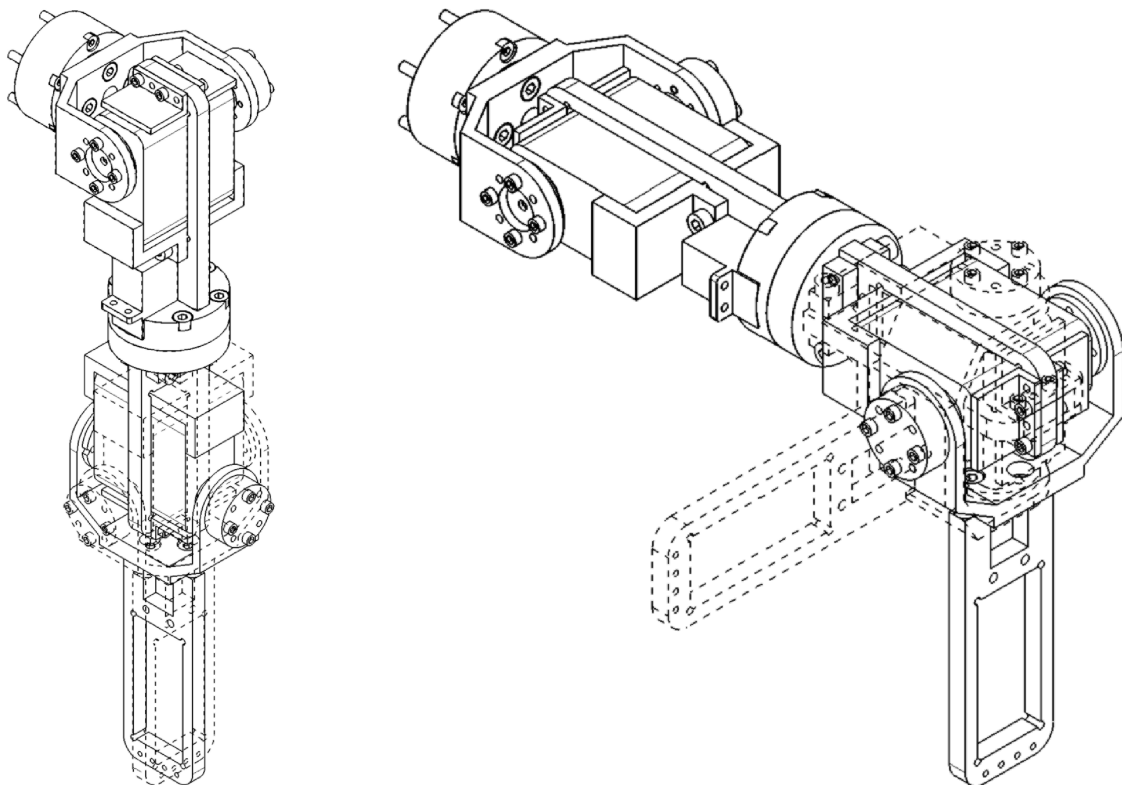


Figura 4.10: Movimento de rotação da articulação do ombro.

Servomotor da articulação do cotovelo

Para o dimensionamento do servomotor referente ao movimento de flexão/extensão (Figura 4.11), considerou-se que este é também realizado com uma massa de 500 gramas colocada no eixo da junta do pulso. Igualmente, para o cálculo do $\tau_{estático}$ considerou-se que o ponto de aplicação da força de atrito situa-se no ponto de contacto entre o veio e o rolamento.

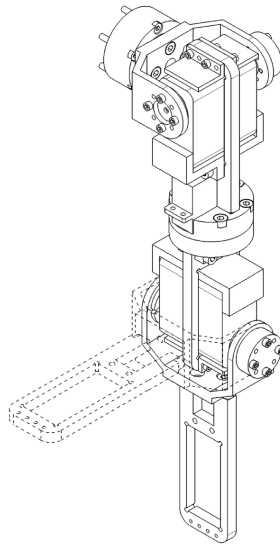


Figura 4.11: Movimento de flexão/extensão do cotovelo.

Servomotores de articulação da cabeça

Para o dimensionamento dos servomotores referentes aos movimentos flexão/extensão e rotação da cabeça (Figura 4.12) optou-se por não efectuar qualquer cálculo como nas outras juntas.

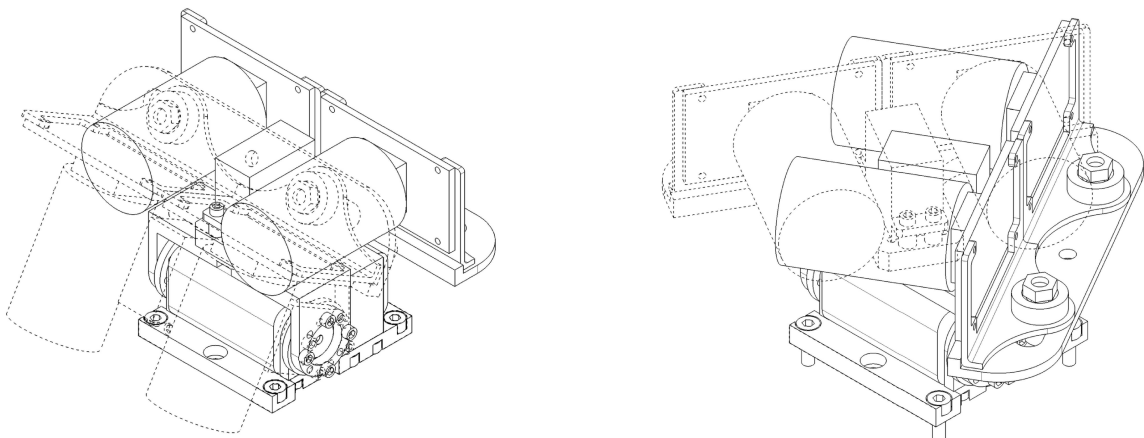


Figura 4.12: Movimentos de flexão/extensão e de rotação da cabeça cotovelo.

O motivo de não ser efectuado qualquer cálculo para o dimensionamento das juntas da

cabeça, deve-se ao facto de que nesta subestrutura e nas suas respectivas juntas não estarem a ser aplicadas forças significativas, à excepção do peso das câmaras e do seu respectivo suporte. Desta forma, o cálculo incidiria sobre uma massa total de $m = 245g$, o que é manifestamente inferior ao que já foi dimensionado anteriormente. Como tal para o dimensionamento do movimento de flexão/extensão da cabeça o valor do binário necessário considerado é idêntico ao do binário necessário ao movimento de flexão/extensão do cotovelo. Assim, considera-se que o valor do binário para o movimento de rotação da cabeça é o mesmo que foi dimensionado para o movimento de rotação do braço (primeiro caso).

Servomotores de articulação do tronco

Para o dimensionamento dos servomotores referentes aos movimentos de flexão/extensão (Figura 4.13) e aos movimentos de inclinação lateral do tronco (Figura 4.14), considerou-se que este movimento é realizado sem a massa de 500 gramas colocada no eixo da junta do pulso. Além disso, considerou-se que o ponto de aplicação da força de atrito situa-se no ponto de contacto entre o parafuso de apoio M5 e a cruzeta.

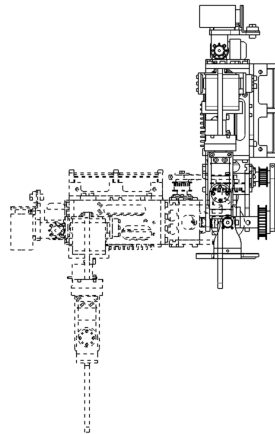


Figura 4.13: Movimento de flexão/extensão do tronco.

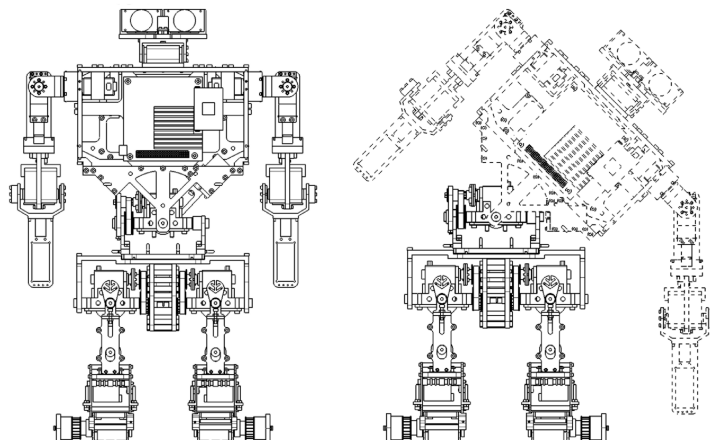


Figura 4.14: Movimento de inclinação lateral do tronco.

Resultados do dimensionamento

A Tabela 4.4 mostra os resultados dos binários calculados tendo por base a formulação descrita anteriormente. Os dados referentes às massas e distâncias do centro de massa foram determinadas a partir do *software* de CAD 3D. No anexo D encontram-se em detalhe os dados referentes aos elementos que constituem a estrutura do robô humanóide.

Tabela 4.4: Resultados dos cálculos efectuados para cada junta

		Ombro				Tronco		Cotovelo	
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_3^*	θ_1	θ_2	θ_1	
Atrito	m	0.861	0.799	0.653	0.653	3.000	3.000	0.549	[kg]
	F	0.845	0.784	0.641	0.641	2.943	2.943	0.539	[N]
	r	0.011	0.004	0.012	0.012	0.003	0.003	0.004	[m]
	τ_{atrito}	9.295	3.136	7.692	7.692	8.829	8.829	2.156	$\times 10^{-3}$ [N.m]
Inercia	m_{elo}	0.361	0.299	0.153	0.049	3.000	3.000	0.049	[kg]
	r_{elo}	0.063	0.073	0.012	0.027	0.160	0.110	0.027	[m]
	m_{massa}			0.500			0	0.500	[kg]
	r_{massa}	0.212	0.212	0.012	0.089		0	0.089	[m]
	J	23.90	24.00	0.094	3.996	77.00	40.00	3.990	$\times 10^{-3}$ [kg.m ²]
	$\tau_{dinâmico}$	0.750	0.754	0.003	0.125	2.418	1.256	0.125	[N.m]
Estático	r_{cm}	0.063	0.073		0.027	0.127	0.084	0.027	[kg]
	F_{cm}	3.541	2.933		0.481	29.43	29.43	0.481	[N]
	r_{massa}	0.212	0.212		0.089		0	0.089	[m]
	F_{massa}	4.905	4.905		4.905		0	4.905	[N]
	$\tau_{estático}$	1.263	1.254		0.450	3.738	2.472	0.450	[N.m]
τ_{motor}		2.022	2.011	0.011	0.582	6.165	3.737	0.577	[N.m]
		20.62	20.50	0.112	5.935	62.84	38.09	5.884	[kg.cm]

* - Calculado após a construção do protótipo

A Tabela 4.5 mostra a comparação entre os binários necessários para cada junta, acima dimensionados, e os binários fornecidos pelos servomotores escolhidos. É possível verificar que os valores dos binários fornecidos pelos servomotores nas juntas do tronco se encontram abaixo do valor dimensionado. Este facto deve-se a que nestas juntas serão utilizadas transmissões por correias, cuja relação de transmissão será de 1 : 2 (inclinação lateral) e de 1 : 2.1 (flexão/extensão) o que elevará o binário disponibilizado por esses servomotores.

Um aspecto a reter é que na junta θ_2 do ombro, o servomotor escolhido foi o HSR-5498SG. No entanto, os valores de binário que este fornece ficam aquém das necessidades exigidas se for tido em consideração a utilização da massa de 500g. No entanto, e tendo em conta os objectivos pretendidos com este protótipo, optou-se por continuar com este servomotor, sendo possível efectuar a troca deste por um HSR-5980SG sem efectuar qualquer alteração à estrutura.

Outro caso similar verifica-se com o servomotor de rotação do antebraço θ_3^* que se encontra na articulação do ombro. Aquando da utilização da massa de 500g verifica-se um sub-dimensionamento, que surge de um lapso em não ter sido prevista a execução desse movimento previamente à construção do protótipo final. Uma solução possível implica necessariamente a troca deste servomotor. No entanto, e dadas as dimensões deste actuador

uma troca por outro mais potente leva à necessidade de corrigir os elementos que servem de suporte e acomodação deste actuador. Outra solução possível é a exclusão deste servomotor e conseqüente perda do grau de liberdade, o que implicará redução no realismo na execução dos movimentos nos membros superiores.

Tabela 4.5: Comparação de binários para cada junta

Componente	g.l.	Binário necessário	Servomotor	Binário fornecido
Ombro:				
	θ_1	21 <i>kg.cm</i>	HSR-5980MG	30.0 <i>kg.cm</i>
	θ_2	21 <i>kg.cm</i>	HSR-5498SG	13.5 <i>kg.cm</i>
	θ_3	0.2 <i>kg.cm</i>	HS-5056MG	1.4 <i>kg.cm</i>
	θ_{3^*}	6.0 <i>kg.cm</i>	HS-5056MG	1.4 <i>kg.cm</i>
Cotovelo:				
	θ_1	6 <i>kg.cm</i>	HSR-5498SG	13.5 <i>kg.cm</i>
Cabeça:				
	θ_1	6 <i>kg.cm</i>	HSR-5498SG	13.5 <i>kg.cm</i>
	θ_2	0.1 <i>kg.cm</i>	HS-5056MG	1.4 <i>kg.cm</i>
Tronco:				
	θ_1	63.0 <i>kg.cm</i>	HSR-5980MG	30.0 <i>kg.cm</i>
	θ_2	39.0 <i>kg.cm</i>	HSR-5980MG	30.0 <i>kg.cm</i>

Por último, todos os servomotores utilizados são digitais e sendo que os servomotores denominados HSR são desenhados especificamente para robôs.

4.1.3 Dimensionamento dos actuadores passivos

Tal como referido anteriormente, durante a fase de desenvolvimento da articulação do tronco era evidente a necessidade de se aplicar os conceitos de actuação híbrida em duas das suas juntas. Correctamente dimensionados, estes actuadores permitirão auxiliar os servomotores em movimentos onde seja necessário o fornecimento de binários elevados reduzindo assim o consumo instantâneo dos motores.

Desta forma, surge a necessidade de se efectuar um estudo dos esforços desenvolvidos durante a execução dos movimentos da articulação do tronco, por forma a se calcular o intervalo em que a constante elástica se encontra correctamente dimensionada. Se o sub-dimensionamento dos elementos utilizados não trará qualquer benefício à estrutura, já o seu sobre-dimensionamento implicará a necessidade de fornecer maiores binários por parte dos motores, por forma a contrariar os esforços realizados pelos elementos passivos.

A constante elástica dos elásticos é dado pela seguinte expressão:

$$F_{elastica} = k.e \quad (4.2)$$

Onde $F_{elastica}$ é a força elástica exercida no actuador (elástico), k a constante elástica, e a deformação que ocorre no elástico $e = (e_f - e_i)$.

Por sua vez a $F_{elastica}$ é calculada a partir do equilíbrio de um corpo rígido onde:

$$\sum \vec{M}_O = \vec{0} \quad (4.3)$$

Inclinação Lateral

Para o dimensionamento dos actuadores passivos referentes ao movimento de inclinação lateral, foi considerada a posição vertical (Figura 4.15 à esquerda) como sendo a posição inicial, e a posição final nos 45° (Figura 4.15 à direita). Foi também considerado que o grau de liberdade referente ao movimento de abdução/adução do ombro (θ_2) encontra-se livre, ou seja, por cada incremento no ângulo da junta do troco é também incrementado no ângulo do ombro mantendo o braço na sua posição vertical.

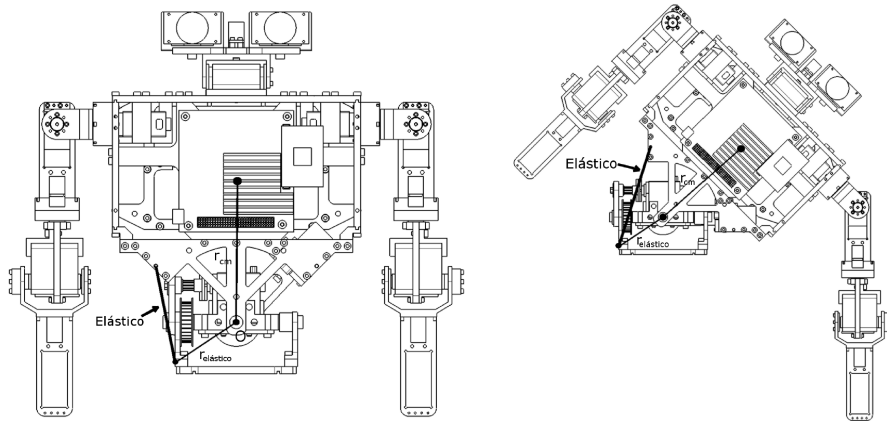


Figura 4.15: Posições do centro massa: inicial e final.

De uma análise inicial é possível verificar pelo diagrama de corpo livre (4.16) que os valores de r_{cm} não são constantes, para além de que a direcção do vector $\vec{F}_{elástica}$ varia consoante o ângulo de inclinação lateral. Tendo em conta este aspecto, é necessário efectuar um levantamento da posição do centro de massa para cada ângulo de inclinação lateral, por forma a se determinar os valores de r_{cm} . Desse levantamento resulta que os valores do r_{cm} variam entre $109.99mm$ e $112.00mm$. Estes dados foram obtidos através do *software* de CAD 3D, podendo ser consultados no anexo D.

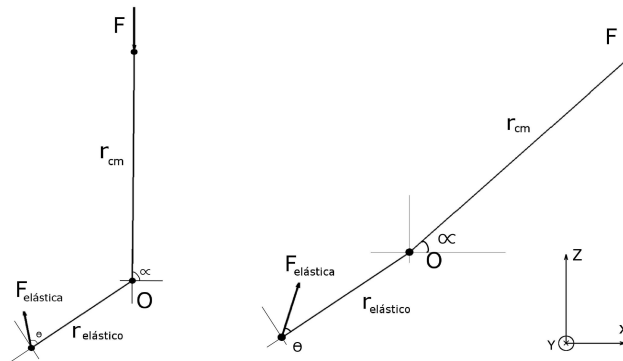


Figura 4.16: Diagramas de corpo livre. Posição inicial e final do tronco.

Aplicando a equação 4.3 no ponto de origem O (eixo de rotação), tem-se que:

$$-r_{elástico} \times F_{elástico} + r_{cm} \times F = 0$$

Simplificando, tem-se que:

$$-r_{elástico} \cdot F_{elástico} \cdot \sin(\theta) + r_{cm}(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \cdot F = 0$$

A força elástica é calculada pela expressão:

$$F_{elástico} = \frac{r_{cm}(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \cdot F}{r_{elástico} \cdot \sin(\theta)}$$

Onde $r_{cm}(\beta)$ é a distância entre a origem e o centro de massa para cada posição angular β entre 0° e 45° . O ângulo α varia entre 89.53° e 41.56° enquanto que θ varia entre 67.60° e 38.55° .

Substituindo a equação 4.2 obtém-se a função que permite calcular o valor da constante elástica. Assim tem-se que:

$$k = \frac{r_{cm}(\gamma) \cdot F \cdot \cos(\alpha)}{r_{elástico} \cdot \sin(\theta) \cdot e(\gamma)}$$

Onde $e = (e_f - e_i)$ varia entre o valor 37.76 e 73.40, considerando que o valor inicial e_i é de 40mm. Desta forma é possível retirar que o valor de k , para esta junta, se situa entre os valores de 16.25 e 934.70 $N.m^{-1}$. Para o dimensionamento dos actuadores passivos necessários, para se efectuar o movimento de inclinação lateral, no sentido oposto ao acima descrito, consideram-se os mesmos valores obtidos de k . Esta simplificação é válida pois a estrutura é praticamente simétrica, ou seja, quer o ponto de aplicação dos elásticos quer a variação do vector $\vec{F}_{elástica}$ são as mesmas. O único aspecto que difere é a posição do centro de massa. No entanto, esta variação é manifestamente insignificante $\approx 0.47^\circ$ de diferença no sentido oposto.

Flexão/Extensão

Tal como no dimensionamento dos actuadores passivos referentes ao movimento de inclinação lateral, foi considerada a posição vertical (Figura 4.17 à esquerda) como sendo a posição inicial, e a posição final nos 45° (Figura 4.17 à direita). Foi também considerado que o grau de liberdade referente ao movimento de flexão/extensão do ombro (θ_1) encontra-se livre, ou seja, por cada incremento no ângulo da junta do tronco é também incrementado no ângulo do ombro mantendo os membros superiores nas suas posições verticais.

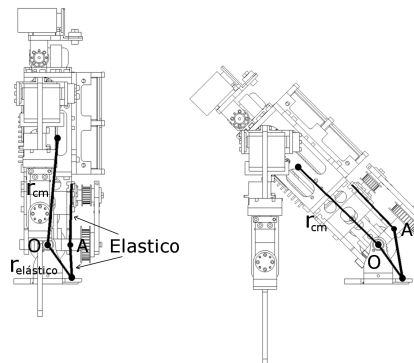


Figura 4.17: Posições do centro massa: inicial e final.

Da análise efectuada ao movimento desta articulação é possível verificar que para este caso, para além da direcção do vector $\vec{F}_{elástica}$ variar consoante o ângulo de flexão a própria geometria do actuador passivo muda. Este facto leva a que seja necessário estudar o comportamento da força elástica, que actua no ponto de apoio A (Figura 4.18). Na realidade, o ponto A é um apoio simples, cuja função é a de servir de guia para os elementos passivos. No entanto, por forma a simplificar o cálculo, considerou-se estar a actuar nesta junta, dois elementos passivos independentes mas com módulos de elasticidade iguais.

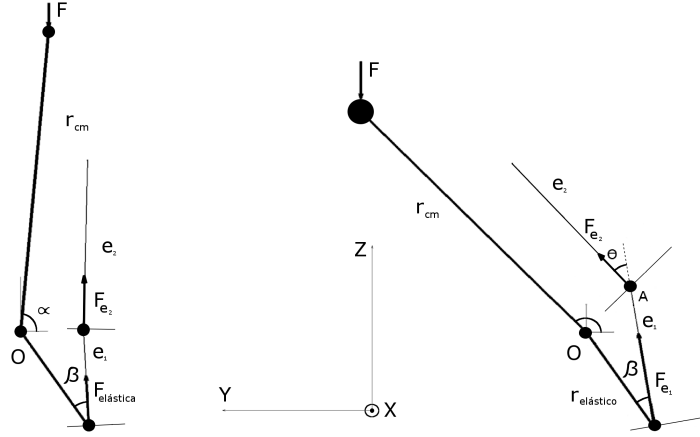


Figura 4.18: Diagramas de corpo livre. Posição inicial e final do tronco.

Aplicando a equação 4.3 no ponto de origem O (eixo de rotação), tem-se que:

$$-r_{elástico} \times F_{elástico} - r_{cm} \times F = 0$$

$$-r_{elástico} \cdot F_{elástico} \cdot \sin(\beta) - r_{cm}(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \cdot F = 0$$

A força elástica é calculada pela expressão:

$$F_{elástico} = -\frac{r_{cm}(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \cdot F}{r_{elástico} \cdot \sin(\beta)}$$

Onde $r_{cm}(\gamma)$ é a distância entre a origem e ao centro de massa para cada posição γ entre 0° e 45° .

$$F_{elástico} = F_{e1} + F_{e2} \cdot \cos(\theta)$$

Pela equação 4.2 tem-se que:

$$F_{elástico} = k_{e1} \cdot e_1(\gamma) + k_{e2} \cdot e_2(\gamma) \cdot \cos(\theta)$$

Como $k_{e1} = k_{e2}$, vem que:

$$F_{elástico} = k \cdot (e_1(\gamma) + e_2(\gamma) \cdot \cos(\theta))$$

Onde $e_1 = (e_{1f} - e_{1i})$ e $e_2 = (e_{2f} - e_{2i})$. O valor considerado de e_i para os dois casos foi $20mm$. O ângulo α varia entre 84.67° e 135.62° , o ângulo β varia entre 32.26° e 25.86° e o ângulo θ varia entre 44.99° e 35.90° .

Desta forma, vem que o valor do modulo de elasticidade é dado por:

$$k = -\frac{r_{cm}(\gamma) \cdot \cos(\alpha) \cdot F}{r_{elástico} \cdot \sin(\beta) \cdot (e_1 + e_2 \cdot \cos(\theta))}$$

Efectuado o cálculo, é possível retirar que o valor de k , para esta junta, situa-se entre os valores de 21.53 (para $\gamma = 25.86^\circ$) e 1939.28 $N.m^{-1}$.

Como o sistema implementado nesta junta prevê a utilização de dois actuadores em paralelo, é necessário determinar qual o valor de k correspondente a cada actuador. Pela associação de molas em paralelo temos que:

$$k_{eq} = k_1 + k_2$$

Como $k_1 = k_2$, temos que:

$$k_1 = \frac{k_{eq}}{2}$$

Desta forma, os valores finais para a constante elástica a utilizar neste sistema situam-se entre 10.77 e 969.64 $N.m^{-1}$.

Os resultados obtidos (Tabela 4.6) são os valores para os quais os actuadores passivos são capazes de sustentar a massa da estrutura do tronco e membros superiores numa determinada posição, ou seja, para que os actuadores passivos possam cumprir com os objectivos propostos, os valores de k devem de ser superiores. No entanto, deverá ter-se sempre em consideração que a utilização de valores de k muito superiores, poderá levar à necessidade de fornecer maiores binários por parte dos servomotores, por forma a contrariar a força elástica.

Tabela 4.6: Resultados dos cálculos efectuados para k

γ	Inclinação lateral				Flexão/Extensão			
	0°	15°	30°	45°	0°	15°	30°	45°
k	13.25	371.90	651.79	934.70	-145.69	288.44	646.55	969.64

4.2 Simulações

Da intenção de só criar uma estrutura rígida e robusta que seja capaz de resistir aos esforços quando solicitada, surge a necessidade de só analisar o comportamento mecânico dos componentes que a constituem aquando da ocorrência dessas solicitações.

Para a execução desta análise é necessária a utilização de ferramentas de CAD/CAE - *Concepção Assistida por Computador/Engenharia Assistida por Computador (Computer Aided Design/Computer Aided Engineering)*. O software de CAD 3D utilizado anteriormente (*CATIA® V5*), permite a realização de simulações numéricas, pelo método dos elementos finitos (FEM), através de um dos seus módulos (*Generative Structural Analysis*). Nele é possível realizar diversos tipos de simulações, de uma forma relativamente simples, e obter resultados aproximados à realidade, permitindo ter uma noção geral sobre o comportamento do componente.

De seguida, são descritos e apresentados os resultados das simulações numéricas efectuadas no âmbito da validação dos componentes para a construção da estrutura humanóide. De referir que apenas foram realizadas simulações numéricas nos componentes que suscitavam maiores dúvidas quanto ao seu comportamento quando solicitados a determinados esforços, e que o tipo de análise efectuado foi o da análise estática.

4.2.1 Tronco

Dos componentes que constituem a estrutura do tronco do robô humanóide (Figura 4.19) as bases do tronco (4) e (7), são as que desempenham um papel fundamental no que à resistência aos esforços e à deformação diz respeito, pois é nestes componentes que o peso do tronco e membros superiores é transferido para a estrutura das pernas. Como tal, estas foram seleccionadas para se efectuar uma análise por forma a compreender melhor o seu desempenho.

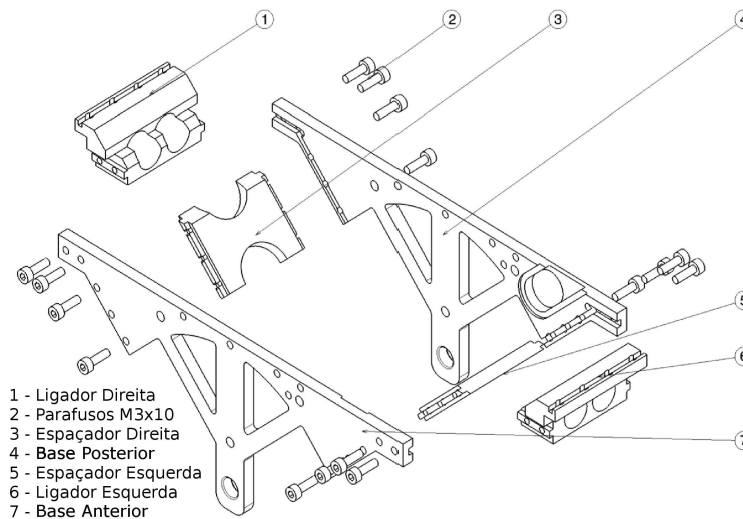


Figura 4.19: Componentes de suporte do tronco.

Base posterior

Para esta simulação foi tida em consideração a existência do furo onde posteriormente são apertados os parafusos de apoio M5. Assim sendo definiu-se este furo como sendo um constrangimento do tipo encastramento, ou seja, para efeitos de simulação a superfície do furo encontra-se fixa, permitindo à restante parte do componente deslocar-se conforme a carga que seja aplicada (Figura 4.20).

A carga aplicada nesta simulação tem incidência sobre a superfície da parte de cima do componente, e cujo vector aponta no sentido negativo relativamente ao eixo do Z. Para efeitos de cálculo optou-se por usar uma carga distribuída de $100N$, este valor é meramente teórico e exemplificativo, pois na realidade e no âmbito desta plataforma não será espectável que tal valor venha a ser atingido.

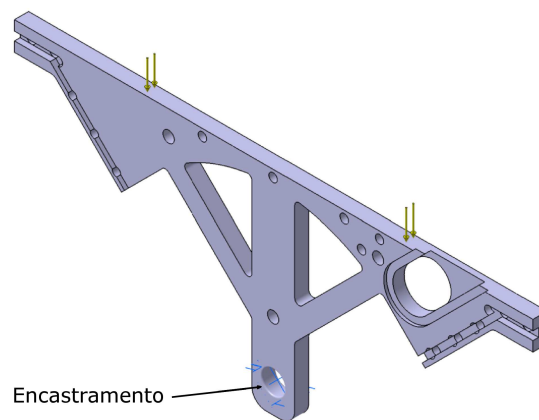


Figura 4.20: Definição das condições impostas: base posterior.

Para todas as simulações numéricas referentes aos componentes do tronco, foram utilizadas malhas com elementos tetraédricos de 10 nós de 1 milímetro. Realizada a computação da solução obtemos o seguinte resultado para os deslocamentos:

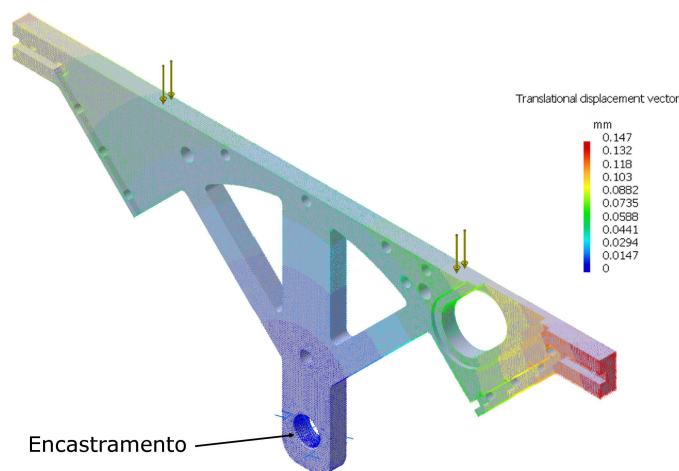


Figura 4.21: Resultado dos deslocamentos do componente base posterior. Vista isométrica.

Da análise efectuada ao resultado dos deslocamentos para este componente, é possível afirmar que o desenho deste é válido, pois dada a carga aplicada na simulação verifica-se que o deslocamento máximo é de 0.147mm , o que é manifestamente insignificante. No entanto, é necessário verificar se o componente em estudo se encontra dentro do regime elástico. Este estudo é realizado através da análise do campo de tensões de *Von Mises*. (Figura 4.22)

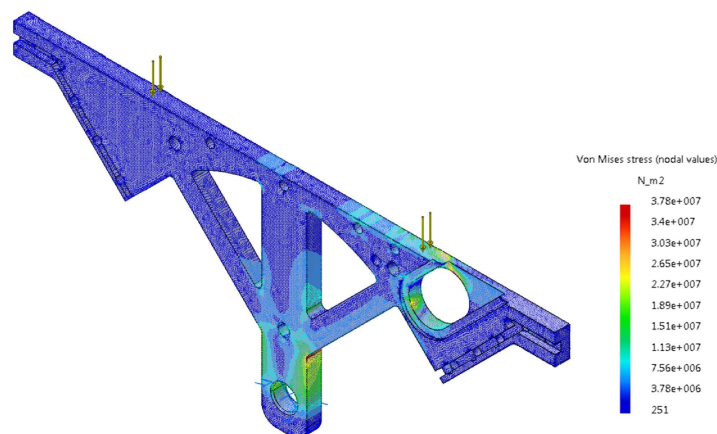


Figura 4.22: Campo de tensões do componente base posterior sujeito a uma carga de 100N .

Da análise efectuada ao campo de tensões é possível afirmar que o componente em causa, encontra-se dentro do regime elástico para o material utilizado (AW5083-H111), pois o valor da sua tensão de cedência é de 115MPa e o valor máximo encontrado no campo de tensões é de $3.78 \times 10^7 \text{N.m}^{-2} \approx 37.8\text{MPa}$. Desta forma, é possível validar o fabrico deste componente.

No anexo B encontram-se todos os resultados obtidos nas simulações numéricas, onde é mostrada também a malha de deformação para cada um dos casos estudados.

Base anterior

Para a realização da simulação numérica do componente base anterior foram utilizados os mesmos parâmetros que na simulação anterior (Figura 4.23).

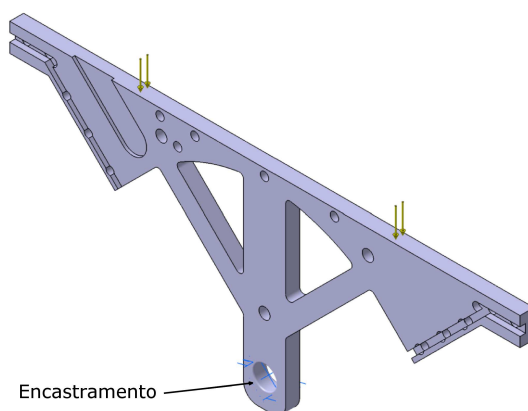


Figura 4.23: Definição das condições impostas: base anterior.

Realizada a computação da solução obtemos o seguinte resultado para os deslocamentos (Figura 4.24).

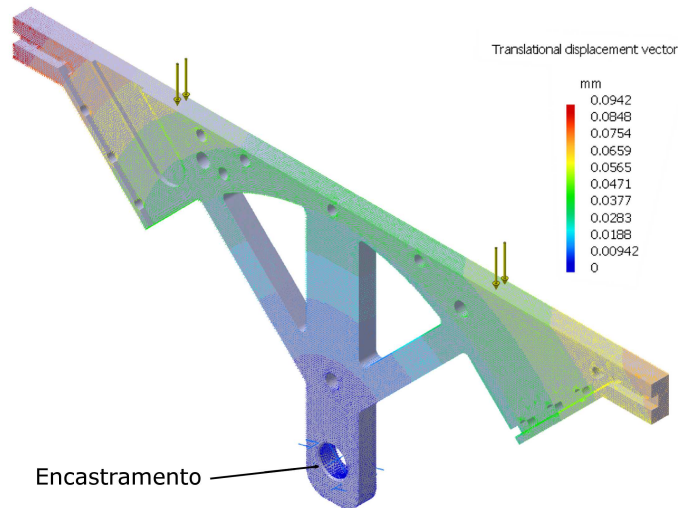


Figura 4.24: Resultado dos deslocamentos do componente base anterior. Vista isométrica.

Da análise ao resultado da simulação do componente base posterior é possível afirmar que o desenho deste componente é válido, dado que o deslocamento máximo verificado é de $0.039mm$.

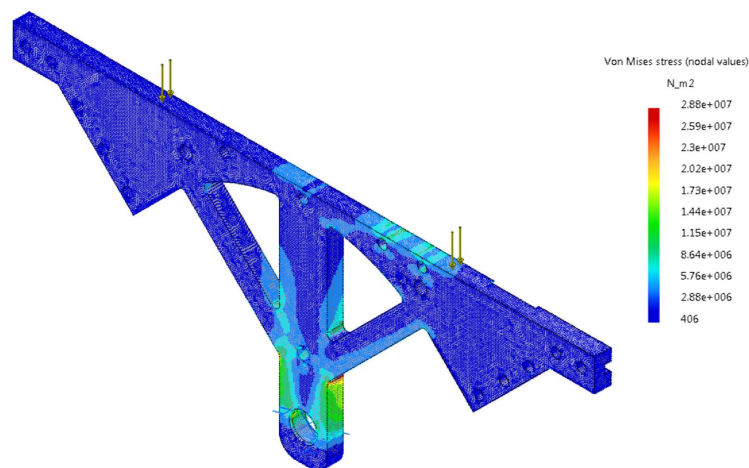


Figura 4.25: Campo de tensões do componente base anterior sujeito a uma carga de $100N$.

Da análise efectuada ao campo de tensões é possível afirmar que o componente em causa, encontra-se dentro do regime elástico dado que o valor máximo verificado no campo de tensões é de $2.88 \times 10^7 N.m^{-2} \approx 28.8MPa$. Desta forma, é possível validar o fabrico deste componente.

4.2.2 Membros superiores

Um aspecto importante que foi desenvolvido na estrutura dos membros superiores é o de que os principais componentes que a constitui são pequenas derivações de um único componente (5) (Figura 4.26 à esquerda). Como tal, é necessário efectuar diversas simulações por forma a garantir que são estudados o maior número de cenários possíveis que possam ocorrer aquando dos movimentos dos membros.

Outro componente que faz parte da estrutura do braço que suscita alguma apreensão é o veio de rotação do braço (7) (Figura 4.26 à direita). Este componente é o responsável pela rotação longitudinal do antebraço e, sendo este fabricado com uma espessura relativamente pequena, surge a necessidade de verificar o seu comportamento aquando a aplicação de cargas.

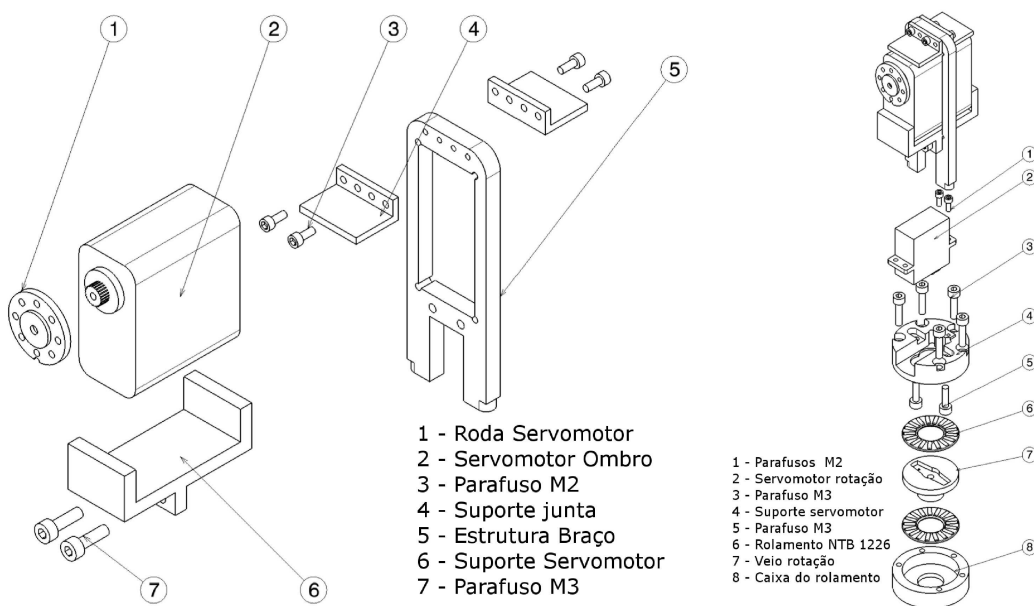


Figura 4.26: Suporte servomotor ombro e elementos de rotação do antebraço.

Desta forma, foram realizadas ao todo nove simulações numéricas, sete relativamente ao componente de suporte ao servomotor e duas relativamente ao veio de rotação do braço. No entanto, nesta secção, apenas são apresentadas o resultado de duas simulações referentes ao componente de suporte do servomotor do braço, e uma do componente do veio de rotação do braço, encontrando-se as restantes no anexo B.

Suporte do servomotor do braço

Para a realização desta simulação considerou-se que a parede lateral do componente onde o servomotor se encontra em contacto, encontra-se fixa, e a restante parte do componente pode deslocar-se conforme a carga que seja aplicada (Figura 4.27).

A carga aplicada nesta simulação tem incidência sobre superfície da parte de cima do componente, e cujo vector aponta no sentido negativo relativamente ao eixo do Z.

A magnitude da carga utilizada é idêntica à utilizada em simulações anteriores.

Para a todas as simulações numéricas referentes aos componentes dos membros superiores, foram utilizadas malhas com elementos tetraédricos de 10 nós com 0.4 milímetros.



Figura 4.27: Definição das condições impostas: suporte servomotor braço.

Realizada a computação da solução obtemos o seguinte resultado para os deslocamentos (Figura 4.28):

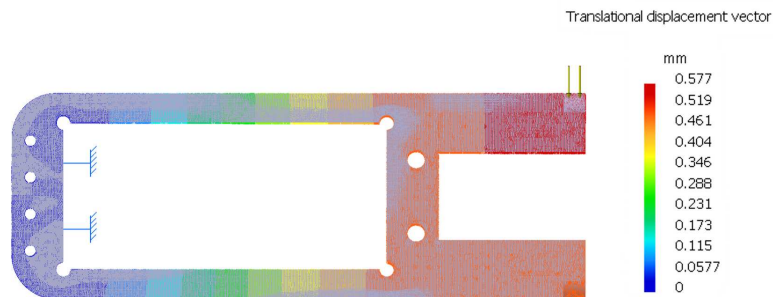


Figura 4.28: Resultado dos deslocamentos do componente de suporte ao servomotor do braço sujeito a uma carga de $100N$.

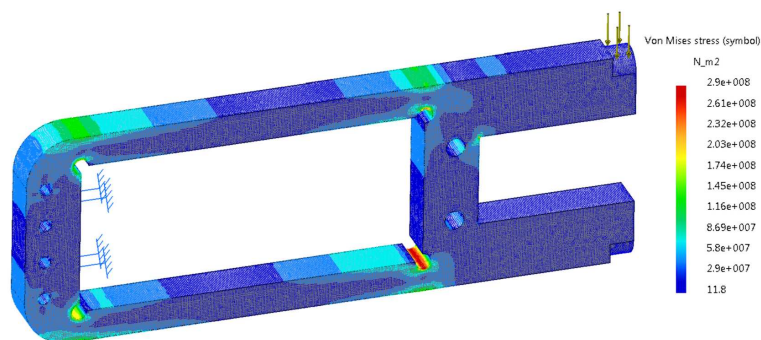


Figura 4.29: Campo de tensões do componente de suporte do servomotor sujeito a uma carga de $100N$.

Da análise efectuada ao resultado dos deslocamentos para este componente, é possível afirmar que o desenho deste é válido, dado que o deslocamento máximo é de $0.577mm$. No entanto, pela análise ao campo de tensões (Figura 4.29) verifica-se que existe uma concentração de tensões muito próxima da resistência máxima do material $290MPa$. Tal como foi

referido anteriormente, o valor da carga de $100N$ utilizada nestas simulações é meramente exemplificativa não sendo espectável que alguma vez seja ela seja atingida. No entanto, para efeito de dimensionamento é necessário determinar o valor da carga aplicada cujo o resultado do campo de tensões se situe dentro do regime elástico. Após a realização de novas simulações determinou-se que o valor máximo da carga a aplicar nesta situação é de $35N$.

Suporte do servomotor do braço 2

Nesta nova simulação tentou-se simular a torção do componente em torno da sua base. Para tal, fixou-se a base do componente e aplicaram-se duas cargas distribuídas em sentidos contrários ao longo do corpo (Figura 4.30 à esquerda).

Realizada a computação da solução obtemos o o resultado para os deslocamentos (Figura 4.30 à direita).

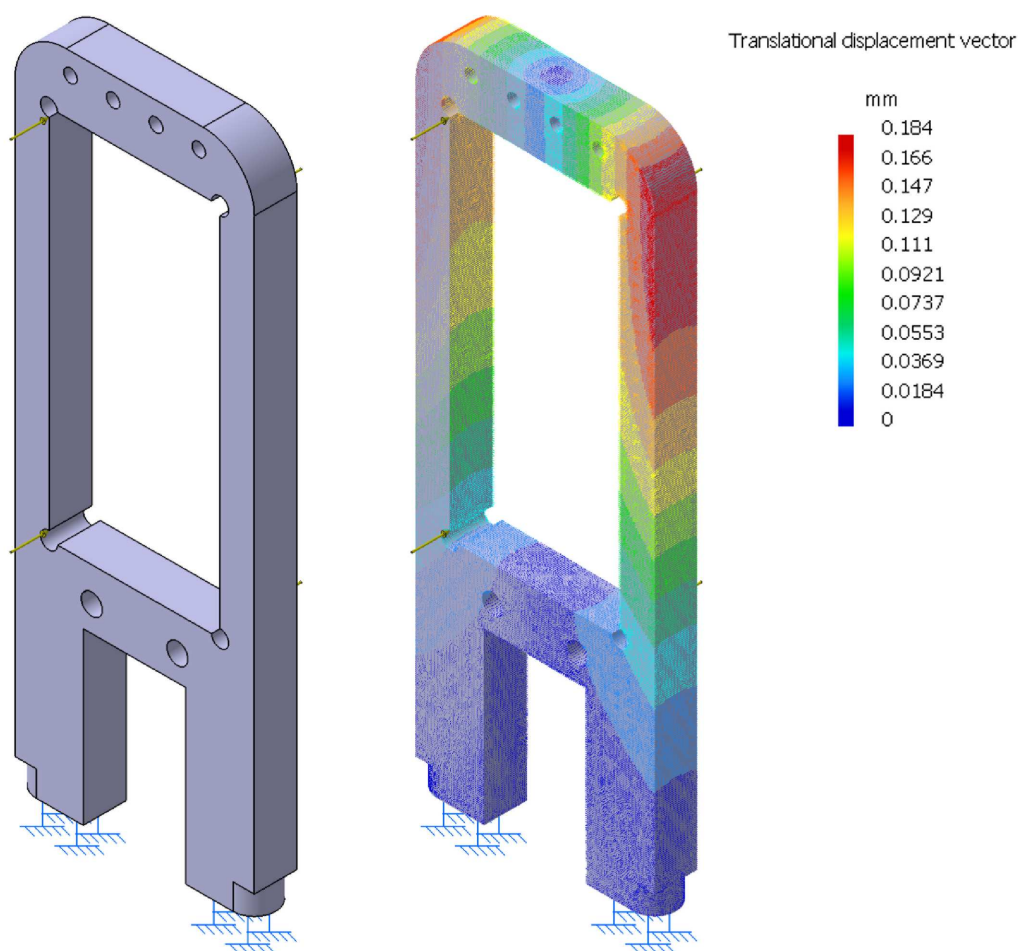


Figura 4.30: Definição das condições impostas ao componente e resultado dos deslocamentos do componente de suporte ao servomotor do braço sujeito a duas cargas opostas de $100N$.

Pelo resultado dos deslocamentos obtido para este componente, é possível afirmar igualmente que o desenho deste é válido, pois verifica-se que o deslocamento máximo é de $0.184mm$.

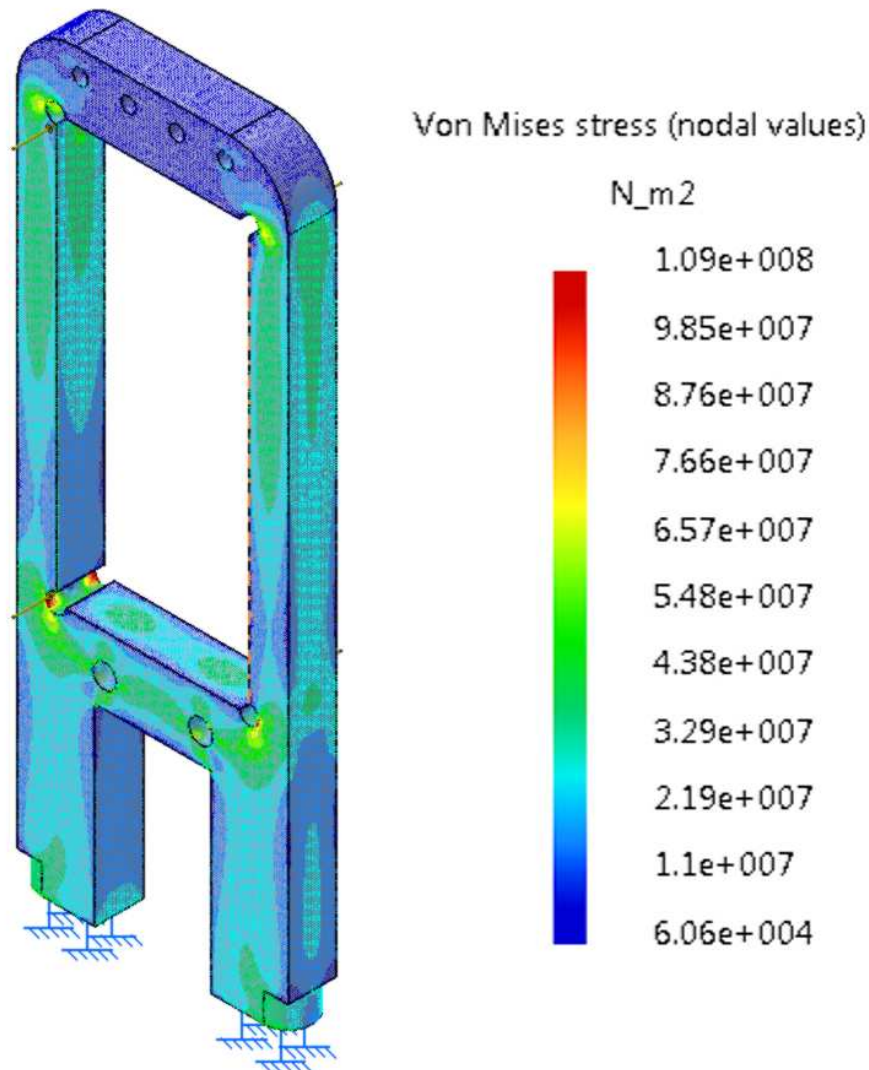


Figura 4.31: Campo de tensões do componente de suporte do servomotor sujeito a uma carga de $100N$.

Da análise ao campo de tensões é possível verificar que nos locais onde existem concentrações de tensões (Figura 4.31) o seu valor máximo é de $109MPa$. Embora este valor se encontre muito próximo da tensão de cedência do material, este, ainda se encontra no dentro do regime elástico, pelo que é possível validar o fabrico deste componente.

Veio de rotação do braço

Para a realização desta simulação foi efectuado um simples ensaio de tracção ao veio de rotação do braço. Fixou-se a parte de baixo do componente, a aplicou-se uma carga na superfície da parte de cima (Figura 4.32 à esquerda), e que cujo vector aponta no sentido positivo relativamente ao eixo do Z. A magnitude da carga utilizada é idêntica à utilizada em simulações anteriores.

Realizada a computação da solução obtemos o resultado para os deslocamentos (Figura 4.32 à direita).

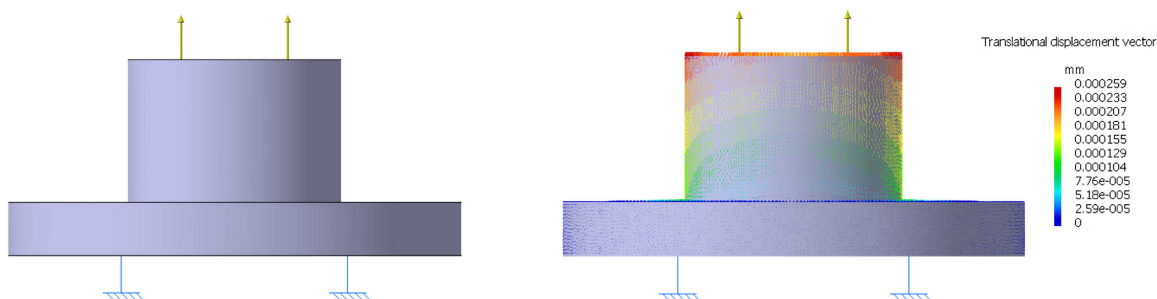


Figura 4.32: Definição das condições impostas ao componente e resultado dos deslocamentos do componente do veio de rotação do braço sujeito a uma carga de $100N$.

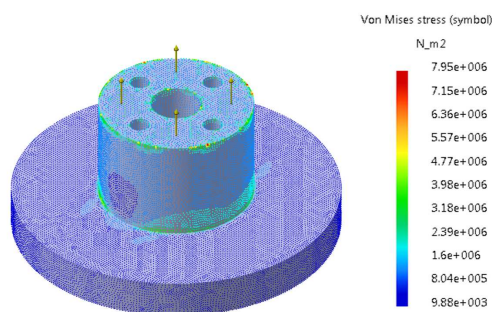


Figura 4.33: Campo de tensões do de rotação do braço sujeito a uma carga de $100N$.

Perante o resultado obtido para os deslocamentos neste componente, e pela análise do campo de tensões (Figura 4.33) é de todo possível afirmar que o desenho deste é igualmente válido, pois dada a carga aplicada na simulação verifica-se que o deslocamento máximo é de $0.000259mm$, e o campo de tensões situa-se dentro do regime elástico.

As simulações numéricas realizadas mostraram ser uma mais valia, durante o desenvolvimento da estrutura do robô humanóide, permitindo de uma forma simples a validação de componentes, que de uma outra forma seria bastante mais complexa.

De um forma geral, os resultados das simulações numéricas realizadas permitem afirmar que para a carga utilizada os valores dos deslocamentos nos diversos componentes são praticamente insignificantes, à excepção de duas simulações (ver anexo B) cujo o valor máximo obtido é de cerca de $2.8mm$. No contexto dos outros resultados obtidos este valor é de facto elevado, mas se for analisado relativamente ao contexto da estrutura do membro superior completo, e não apenas ao componente em si, é possível afirmar que este deslocamento tem um impacto bastante reduzido. Na análise ao campo de tensões é possível verificar em quatro simulações os resultados obtidos são bastante elevados. Como foi referido anteriormente, o valor da carga considerada para efeitos de simulação numérica não é expectável que este venha alguma vez a ser atingido. No entanto, nestes casos foi necessário efectuar novas simulações por forma a se determinar qual a carga máxima possível aplicar sem que o componente atinja o regime plástico.

Capítulo 5

Conclusões

Muito mais que os objectivos propostos para este trabalho, o grande objectivo era sem dúvida o culminar de mais uma etapa no desenvolvimento do projecto humanóide do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este trabalho segue na mesma linha do trabalho iniciado em 2009 cujo o resultado foi o desenvolvimento da estrutura das pernas do robô humanóide. Assim, com o trabalho que agora se conclui, foi possível obter uma nova estrutura para o robô humanóide, que servirá de base para o desenvolvimento de novos trabalhos em outras áreas ligadas à robótica humanóide.

5.1 Conclusões

De um ponto de vista geral, a estrutura desenvolvida cumpre os objectivos estabelecidos. No entanto, o fabrico revelou alguns pequenos problemas que, em parte, se deveram a opções tomadas durante a fase de desenvolvimento. Estes problemas foram referenciados mas não foi obtida qualquer solução para uma posterior correcção, pois esses problemas não alteram, de uma forma significativa, o desempenho final da estrutura no âmbito em que este projecto se insere.

Estrutura Final

A estrutura final desenvolvida (figura 5.1) tem aproximadamente 284 milímetros de altura que conjuntamente com o que já se encontrava construído perfaz uma estrutura humanóide com cerca de 667 milímetros de altura. O peso correspondente à parte agora desenvolvida é de 2,9 quilogramas, onde se incluem todos os componentes que a constituí, como os servomotores, as duas baterias e o respectivo suporte, a unidade de processamento e as duas unidades de visão. O peso final da estrutura humanóide completa situa-se aproximadamente nos 5,6 quilogramas.

No decorrer deste trabalho foram implementados doze novos graus de liberdade que conjuntamente com os treze graus de liberdades desenvolvidos anteriormente, perfaz uma estrutura humanóide com um total de vinte e cinco graus de liberdade. A implementação dos doze graus de liberdade permitiu dotar a estrutura com a capacidade de realizar movimentos complexos, em muito semelhantes aos do corpo humano.

Foi tido sempre um especial cuidado para que esta estrutura cumprisse na plenitude com as dimensões antropomórficas, tal não foi possível cumprir em algumas partes da estrutura, no

entanto os motivos pelos quais se deve tal incumprimento foram devidamente documentados na secção 4.1.1.

No desenvolvimento dos componentes foi necessário criar soluções que para além dos seu aspectos funcionais fossem possíveis maquinar, o que levou por diversas ocasiões a ser necessário efectuar pequenas alterações no desenho ou até mesmo ao redesenho das mesmas.

Um aspecto ambíguo interessante foi o da definição da espessura dos componentes que constitui a estrutura do tronco. Se por um lado se pretende obter uma estrutura rígida e robusta, por outro é obrigatório criar uma solução o mais leve possível. Desta forma, foi necessário obter um compromisso capaz de satisfazer ambos os objectivos, o que levou à escolha da espessura de $5mm$, e também do alumínio como material de fabrico.

Poderá pensar-se que outras alternativas mais leves que alumínio, como por exemplo o magnésio, seriam passíveis de se poder utilizar. Tal argumento esbarra no que ao aspecto financeiro lhe diz respeito, pois para além dos custos da matéria prima seria necessário efectuar um investimento em equipamentos (ferramentas) necessários à sua maquinação. No entanto, poderá ser um aspecto a ser desenvolvido no futuro.

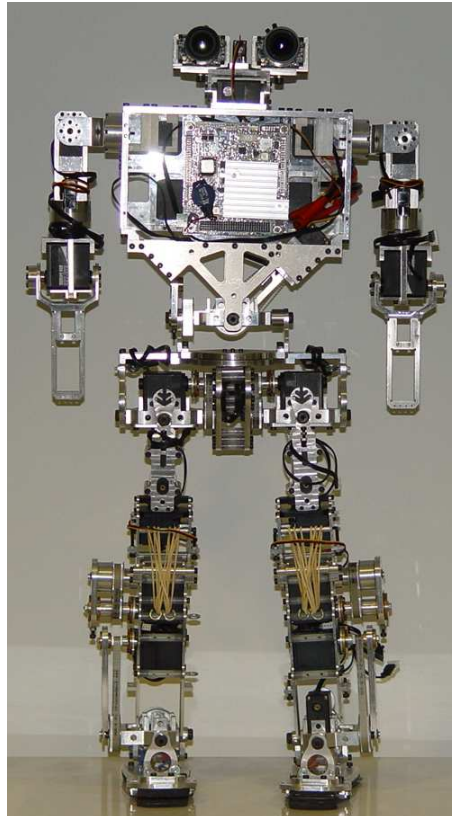


Figura 5.1: Estrutura desenvolvida do robô humanóide.

Dimensionamento

Tal como foi referido anteriormente, o dimensionamento de alguns dos aspectos funcionais da estrutura humanóide, como as suas dimensões, ocorreu ainda numa fase embrionária do desenvolvimento da proposta final.

Esta fase do projecto verificou-se ser uma das mais morosas, pois o processo de dimensionamento é um processo iterativo, a que uma ligeira modificação nos pressupostos iniciais dá origem a uma nova solução, que obrigatoriamente necessita da sua respectiva validação.

No entanto, este processo veio a ser um dos mais importantes em toda a fase de desenvolvimento, pois com ele foram definidas algumas imposições que de certa forma facilitaram o avançar no desenvolvimento da estrutura final. Para além disso, permitiu antecipadamente prever quais as necessidades no fornecimento de binários as juntas das articulações desenvolvidas. Com isto foi possível escolher qual o modelo de actuador que melhor se adapta a cada situação, evitando desta forma o sobre-dimensionamento da actuação nas juntas, cujo aspecto se reflecte consequentemente nos custos finais.

Outro resultado importante da realização deste processo é o de que com ele foi possível validar alguns aspectos do ponto de vista da construção dos componentes. Assim, foi possível o cumprimento com os objectivos inicialmente impostos de uma construção focada no correcto dimensionamento antropométrico.

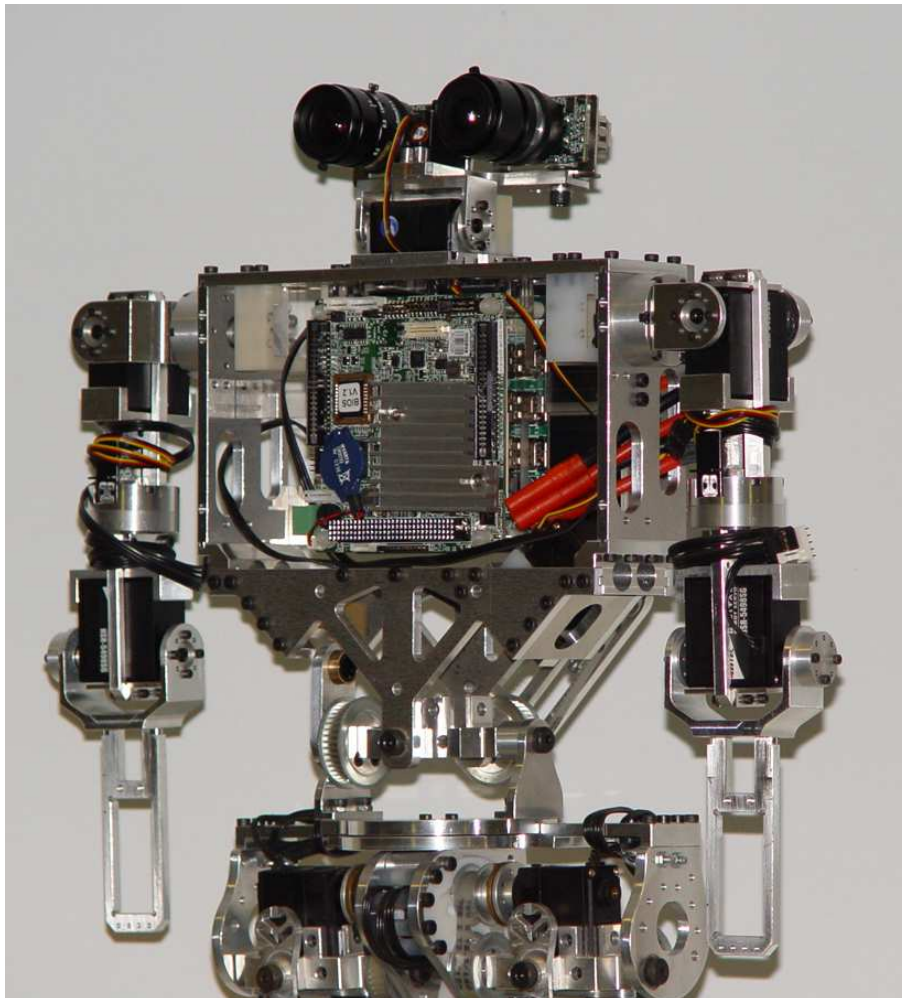


Figura 5.2: Estrutura desenvolvida do robô humanóide.

Actuação passiva

O processo de implementação da actuação passiva em duas das juntas da articulação do tronco verificou-se ser um processo moroso, dadas as alterações efectuadas durante a obtenção da solução final para este sistema, bem como o facto de ter sido necessário efectuar um levantamento dos esforços que actuam em cada junta dimensionada do tronco durante a realização do movimento previsto.

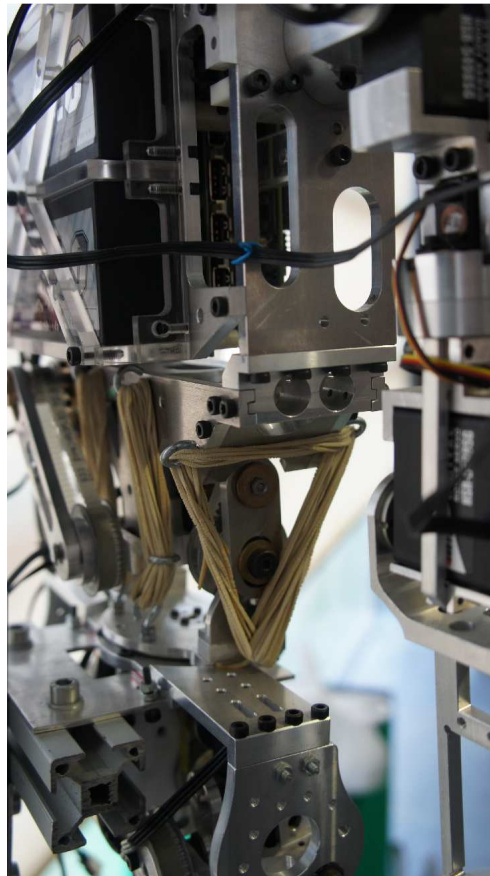


Figura 5.3: Sistema actuação passiva desenvolvido.

Para a obtenção da solução final da implementação da actuação passiva, foram idealizadas algumas soluções, que no decorrer da fase de construção tiveram de ser abandonadas pois o resultado final obtido não era o esperado. Um exemplo das soluções testadas foi o movimento de extensão do tronco ser totalmente realizado através de um sistema que utilizava molas em espiral (muito utilizadas em pequenos brinquedos). No entanto, tal sistema verificou-se ser manifestamente insuficiente dado o peso do tronco e dos membros superiores. Posteriormente foram desenvolvidos os sistemas documentados na secção 3.3. Um aspecto interessante é o de que a solução final implementada é, de todas as que foram idealizadas, a mais simples e a que melhor potencia o efeito da utilização da actuação passiva na estrutura do robô humanóide.

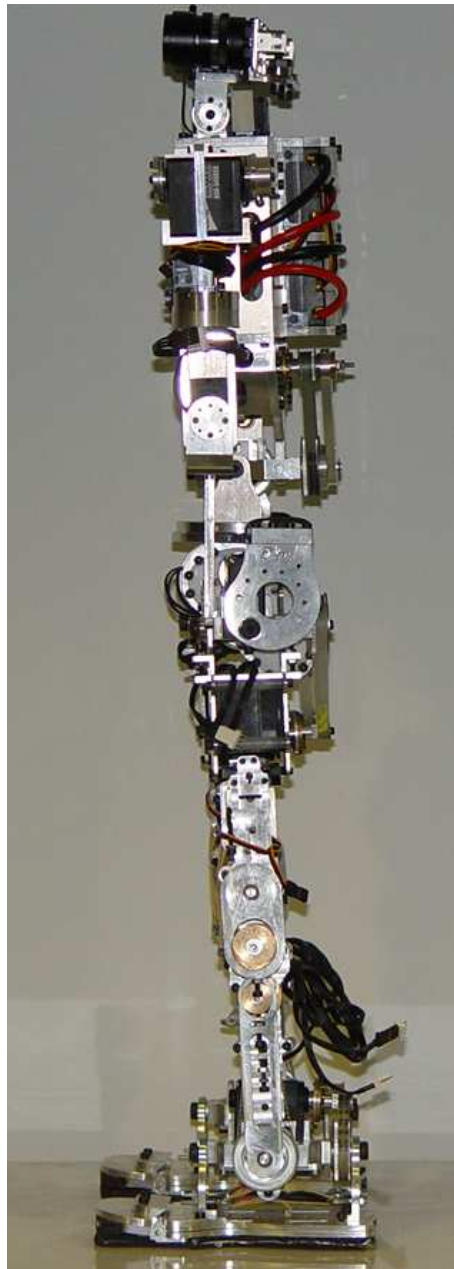


Figura 5.4: Estrutura desenvolvida do robô humanóide.

5.2 Trabalhos Futuros

Do ponto de vista de um futuro próximo, o primeiro ponto a ser trabalhado deverá ser necessariamente o desenvolvimento de todo um conjunto de componentes de *hardware* assim como o *software* necessário ao controlo da estrutura do tronco e dos membros superiores do robô humanóide. Só após esta fase será possível testar as capacidades reais da estrutura, bem como descortinar eventuais erros de aspecto mecânico que não tenham sido previstos durante a fase de desenvolvimento e construção.

Um aspecto que deve de ser desenvolvido é o da optimização em todos os componentes da estrutura para a redução do peso final. Hoje em dia certas ferramenta de CAD 3D permitem estimar, de uma forma simples, pequenas alterações que podem ser efectuadas no desenho de uma peça para reduzir a quantidade de material necessário, e consequentemente, reduzir o seu peso, sem que com isso se perca as características mecânicas do componente definidas anteriormente.

Ainda sobre a questão da redução do peso final da estrutura, deverá ser efectuado um levantamento sobre quais os componentes que possam ser substituídos por outros que sejam feitos a partir de materiais mais leves, ou que, caso o componente em causa o permita, substituir parte desse material por um outro mais leve, garantindo sempre que o componente final seja capaz de resistir aos esforços que lhe são aplicados. O resultado esperado será a criação de uma estrutura ainda mais leve, e mais ágil.

Tendo em conta que esta nova plataforma servirá essencialmente como uma base de desenvolvimento da investigação na área da robótica humanóide é, naturalmente, de todo o interesse que esta plataforma esteja o mais completa possível. Para tal deverá ser desenvolvido o aspecto referente às juntas do pulso, e às respectivas mãos. Parte da junta do pulso encontra-se projectada de forma a que possa acomodar componentes idênticos aos que foram utilizados nas outras juntas dos membros superiores. No entanto, esta junta estará sempre dependente dos objectivos que se pretendam aplicar no desenvolvimento das mãos.

A articulação do tronco, para além de unir duas subestruturas importantes do robô humanóide, marca igualmente a união de dois trabalhos realizados por pessoas com formas de pensar diferentes mas com um objectivo global em mente. Durante a fase de desenvolvimento da integração do tronco na estrutura das pernas já construída, pensou-se em redesenhar o que já se encontrava projectado para esta articulação; tal não foi realizado pelos motivos apresentados anteriormente na secção 3.2.1. No futuro esta articulação poderá ser redesenhada por forma a desenvolver-se algo parecido com a coluna vertebral do ser humano, em que a actuação mecânica da junta deixaria de estar a ser exercida num só ponto, para passar a ser exercida em vários pontos, sendo que os movimentos resultantes seriam a soma da actuação nesses pontos.

Para além dos pontos acima referidos, existem diversas áreas de investigação que podem vir a ser desenvolvidas por forma a tornar esta plataforma humanóide ainda mais completa.

Apêndice A

Instalação do Sistema Operativo

Este tutorial descreve os passos necessários à configuração e instalação de um sistema operativo no computador embecido PC-104. O método de instalação utilizado foi o de instalação a partir de um dispositivo USB. Este método permite uma maior facilidade na instalação, fazendo com que não seja necessária a instalação de uma drive CD-ROM.

De referir que este método de instalação pode ser usado em qualquer computador, desde que a sua BIOS permita o arranque por dispositivos USB.

A.1 Pré-requisitos

Antes de se proceder à configuração instalação do sistema operativo, é necessário ter em conta alguns aspectos, como o material necessário à realização desta tarefa. Para tal será necessário:

- Motherboard PC-104.
- Disco IDE SSD.
- Memória SO-DIMM DDR2 de 2GB
- Fonte alimentação ATX.
- Conversor LVDS para VGA.
- Placa Expansão para PCI-104.
- Rato, teclado, monitor e cabos.
- Computador com Linux instalado.
- USB Flash Pen Drive, no mínimo de 1GB.
- CD ou imagem .ISO com sistema operativo a instalar.

O computador PC-104 é o modelo PM-US15W e é composto pelo processador Intel® Atom Z530 1.6 GHz e suporta até 2GB de memória.

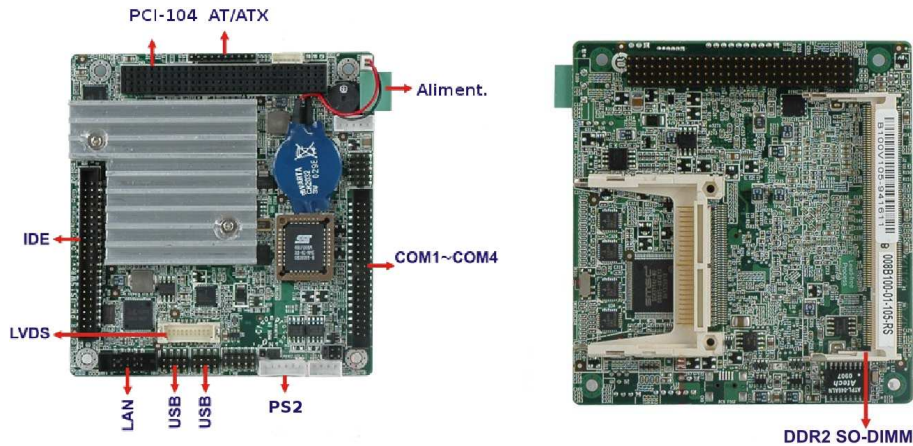


Figura A.1: PC-104 Vista de cima e vista de baixo respectivamente.

O rato e o teclado escolhidos têm uma interface por USB. No entanto, o PC-104 tem disponível duas portas PS2 (figura A.1), podendo assim libertar as entradas USB para outro tipo de utilização.

O conjunto de pinos AT/ATX, numerados de 1 a 9 da esquerda para a direita, servem para ligar os Led's referente ao estado ligado do pc (pinos 1 e 2, sendo pino 2 o pólo negativo), a indicação da utilização do disco IDE (pinos 3 e 4, sendo pino 4 o pólo negativo), botão de ligar o computador (pinos 5 e 6), o botão de *reset* (pinos 7 e 8). Os pinos 9 e 10 servem para indicar ao PC-104 o modo de arranque com alimentação, estando configurado do seguinte modo: se estes pinos tiverem o *jumper*, o PC-104 estará a espera do sinal do botão de ligar para iniciar, caso estes pinos estejam em "aberto", o PC-104 iniciará logo que a fonte esteja ligada.

A figura A.2, mostra a placa de expansão do PC-104. Esta placa proporciona uma extensão das portas USB disponibilizadas pelo PC-104 bem como a adição de três portas *FireWire* ou *IEEE 1394*. Devido a problemas ocorridos durante o arranque e a instalação do sistema operativo, descobriu-se que a melhor configuração dos *jumpers* referentes as portas USB seria deixar tudo em "aberto". Com esta configuração consegue-se arrancar o sistema operativo no PC-104 sem problemas, no entanto essas quatro portas extra USB deixaram de estar disponíveis.

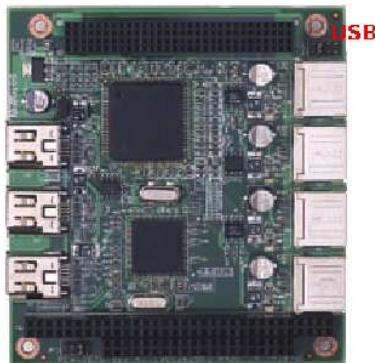


Figura A.2: Placa expansão do PC-104

Posteriormente montaram-se todos os componentes e procedeu-se então à criação da pen USB para se instalar o sistema operativo no PC-104.

A.2 Criação imagem USB

Para a criação do disco de arranque na Pen USB utilizou-se o programa *Unetbootin*. Como este programa não se encontra instalado por defeito no Ubuntu 10.10 foi necessário proceder à instalação, bastando para isso basta aceder ao terminal e escrever o código:

```
sudo apt-get install unetbootin
```

Depois de instalado, basta aceder ao programa através do menu Aplicações > Ferramentas do Ubuntu, ou fazer Alt+F2 e escrever unetbootin. Existe outra alternativa que é o Criador de Disco de Arranque que vem instalado por defeito, no entanto o primeiro foi escolhido, em detrimento do segundo, porque permite efectuar o descarregamento do ISO directamente da Internet (figura A.3), enquanto que o segundo programa necessita de ter a imagem gravada previamente no disco. Além disso permite a criação de um USB com ferramentas de apoio à manutenção do sistema quer para Linux quer para Windows.

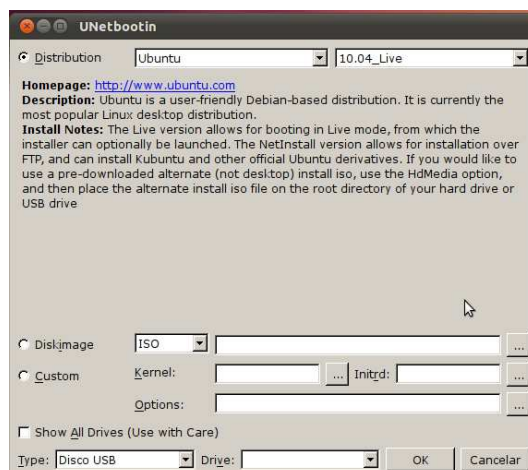


Figura A.3: Unetbootin.

A distribuição usada para a criação da imagem na pen USB e posterior instalação no PC-104 foi a Lubuntu. Esta distribuição é um derivativo não oficial do Ubuntu, e a principal razão para esta escolha foi o facto de se pretender um sistema operativo leve e bastante compacto, pelo que distribuições como o Ubuntu baseado no ambiente gráfico GNOME ou KDE estariam postas de parte por serem bastante pesadas. O Lubuntu é baseado no ambiente gráfico LXDE, *Lightweight X11 Desktop Environment*, e é direccionado a PC's normais ou a portáteis com configurações de hardware antigo ou de baixos recursos.

Depois de efectuado o descarregamento da imagem ISO do Lubuntu selecciona-se a opção Diskimage no Unetbootin (figura A.4), deixa-se a ficar a opção ISO, e selecciona-se a imagem ISO correspondente.

No campo Type, selecciona-se o dispositivo para onde se pretende criar a imagem, deve-se ter muita atenção na escolha do campo Drive, por defeito aquando da selecção da opção



Figura A.4: Selecção de opções.

Disco USB no campo anterior, o Unetbootin detecta a respectiva drive da pen USB, no entanto deve-se sempre confirmar se os dados estão correctos, uma vez que a escolha de uma drive diferente poderá levar à perda de todos os dados no computador.

Depois de confirmar tudo selecciona-se o botão ok e aguarda-se pelo fim da instalação (figura A.5), esta tarefa poderá levar alguns minutos a ser concluída.

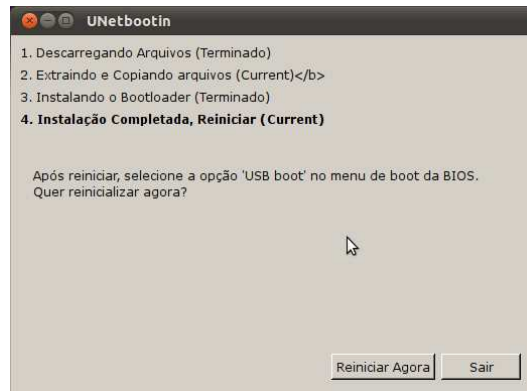


Figura A.5: Fim da criação da imagem USB.

Concluída a criação do disco USB, sai-se do programa Unetbootin, e faz-se ejectar a unidade USB do computador, estando agora pronto para se iniciar a instalação do sistema operativo no PC-104.

A.3 Instalação Lubuntu

Criada a pen USB de arranque, procede-se a instalação do sistema operativo no PC-104. Esta versão da BIOS, permite durante o POST entrar no menu de selecção de dispositivo de arranque, bastando para isso pressionar a tecla F11 do teclado. Para versões da BIOS que não disponibilizem este menu, será necessário aceder ao menu da BIOS, normalmente pressionando a tecla Del, e alterar a ordem por que é feito o arranque de dispositivos. De referir que, para qualquer dos métodos, a pen USB terá de estar conectada antes de se ligar o PC.

As figuras seguintes mostram os principais passos a seguir para se instalar o sistema operativo. Após o arranque pela pen USB deverá aparecer no monitor um menu de selecção do idioma pretendido, após escolhido o idioma deverá escolher a opção do menu instalar. Deverá aguardar durante alguns minutos para que possa carregar o sistema. Após o sistema ter sido carregado deverá aparecer um novo menu de selecção de idioma do sistema operativo (figura A.6).

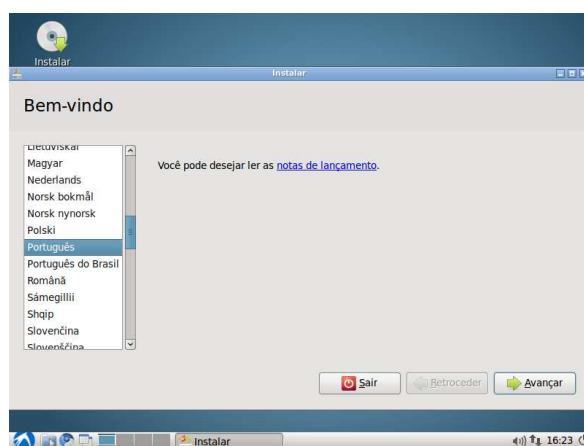


Figura A.6: Menu selecção idioma.

Após a selecção do idioma pretendido faz-se avançar.

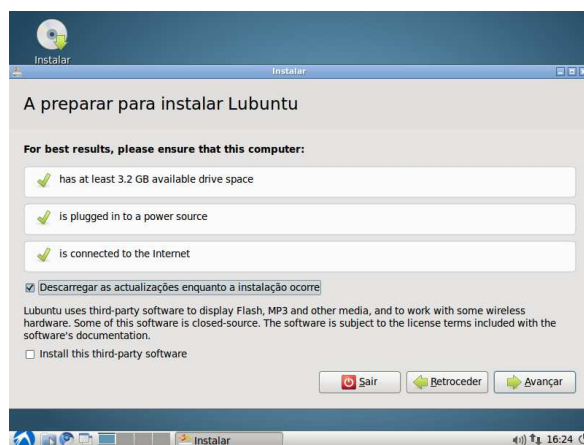


Figura A.7: Menu configuração instalação.

Neste menu (figura A.7), foi usada a opção de descarregar as actualizações durante a instalação, para que certos pacotes, ao serem instalados sejam os mais recentes. Fazendo avançar novamente chegamos ao menu de configuração da utilização disco (figura A.8), onde foi escolhida a primeira opção, Apagar e utilizar o disco inteiro.

Avançando novamente chegamos ao menu de configuração do fuso horário (figura A.9). De referir o facto de que entrando neste menu já se pode ver a instalação do sistema a decorrer.

Continuando a instalação aparece um novo menu (figura A.10), onde se escolhe a disposição do teclado, seleccionando a opção Portugal, Portugal.

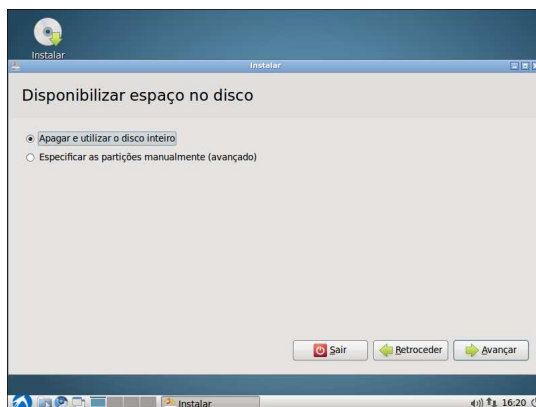


Figura A.8: Menu configuração disco.

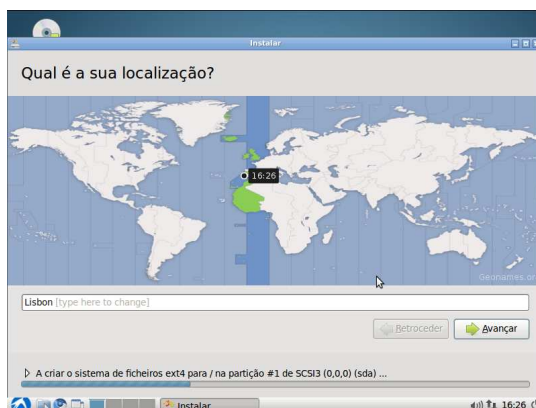


Figura A.9: Menu selecção fuso horário.

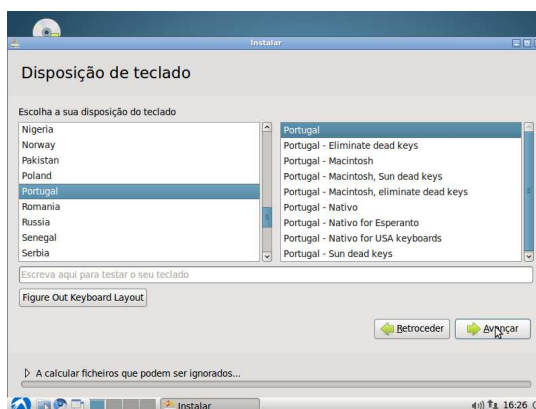


Figura A.10: Menu selecção disposição teclado.

Configurada a disposição do teclado, avança-se com a instalação, para o último menu de configuração (figura A.11), onde se configura o nome do computador e nome de utilizador assim como a respectiva senha de acesso. Nesta instalação a chave de acesso é igual ao nome do utilizador.

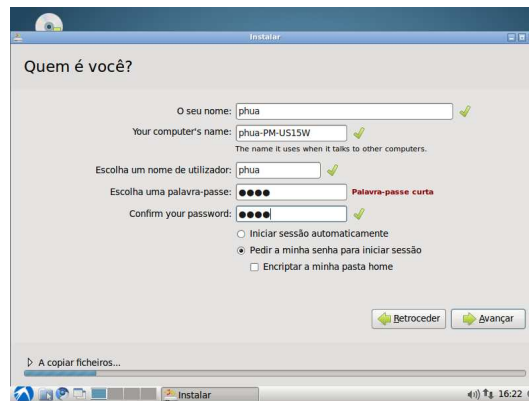


Figura A.11: Menu configuração utilizador.

Concluída a configuração da instalação do Ubuntu, deixa-se o sistema proceder à instalação do respectivo sistema operativo (figura A.12).

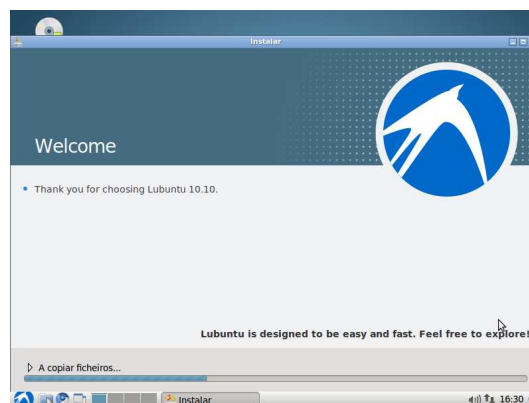


Figura A.12: Instalação sistema operativo.

Após a conclusão da instalação é necessário efectuar uma reinicialização do sistema, neste momento deverá-se retirar a pen USB do sistema. A figura A.13 mostra o ambiente gráfico LXDE a correr no PC-104.

A.4 Pós-Instalação

Após a instalação do sistema operativo foram necessárias efectuar as seguintes configurações:

- Remoção partição de *swap*
- Actualizações de *software*
- Instalação software proprietário camara Firefly MV FFMV-03MTC

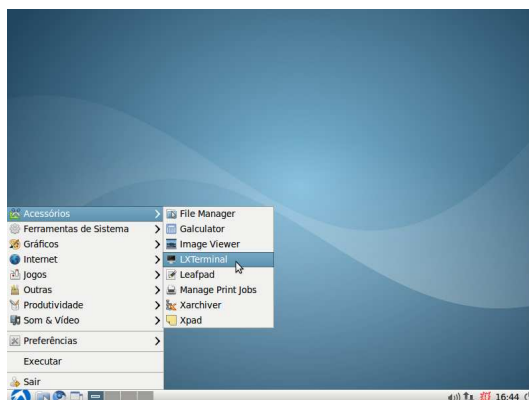


Figura A.13: Ambiente gráfico LXDE.

Linux-Swap

Devido as limitações dos ciclos de escrita do dispositivo de memória de massa usado, um *Solid State Drive*, decidiu-se prescindir da área de *Swap*, reduzindo assim uma das fontes de acesso ao disco mais frequentes. A área de *Swap* é uma zona de memória reservada no dispositivo de memória de massa na qual o SO escreve como complemento à memória RAM [38].

Para a remoção da partição do Linux de *Swap* foi necessário instalar o *GParted*. O *GParted* é uma aplicação gráfica de edição de partições, e para o instalar basta aceder ao terminal e escrever o código:

```
sudo apt-get install gparted
```

Iniciado o *GParted*, basta ir a partição definida como Linux-swap, com o botão direito do rato clicar em cima e escolher a opção desactivar *Swap*. Depois de desactivada o espaço pode ser utilizado como uma nova partição, bastando para isso formata-lo para um dos tipos de ficheiros disponíveis.

Actualizações software

Sendo o *Lubuntu* uma distribuição baseada no *Ubuntu* é expectável, que venha nele incluído o programa *update-manager*, para aceder a este programa basta fazer **ALT+F2**, e escrever *update-manager*. Ao abrir este programa verificará se existem actualizações disponíveis (figura A.14), ficando a aguardar pela confirmação por parte do utilizador. Confirmada a ordem para actualizar, resta ao utilizador aguardar pelo programa instalar automaticamente as actualizações.

Instalação software camaras

Nesta parte será descrito o procedimento de instalação do software proprietário de visualização das camaras *Firefly*. A escolha deste software em detrimento de outro, por exemplo o *coriander*, foi o de se tentar obter um maior desempenho das camaras.

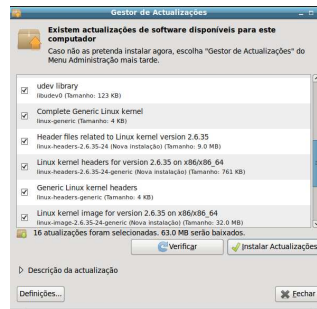


Figura A.14: Gestor de Actualizações.

Para a instalação do software é necessário efectuar o download da aplicação *FlyCapture 2.0*, esta pode ser obtida no endereço www.ptgrey.com sendo necessário efectuar registo.

Efectuado o registo procede-se então download da aplicação para Linux no formato `.tgz`. Em seguida extrai-se o conteúdo do ficheiro através do seguinte comando no terminal:

```
tar -xvf flycapture2-2.1.3.4-i386-pkg.tgz
```

Extraído o conteúdo é necessário efectuar a instalação de alguns pacotes adicionais, pois estes são pré-requisitos da instalação, para tal basta escrever novamente no terminal o seguinte comando:

```
sudo apt-get install libraw1394-11 libgtk2.0-0 libgtkmm-2.4-dev
```

```
sudo apt-get install libglademm-2.4-dev libgtkglextmm-x11-1.2-dev libusb-1.0-0
```

Após a instalação destes pacotes procede-se então a execução na consola do script de instalação do programa:

```
sudo ./install_flycapture.sh
```

Durante a execução deste script será necessário responder a algumas questões sobre a instalação:

```
Would you like to continue and install all the FlyCapture SDK Packages? (y/n)$ y
```

```
Would you like to add a udev entry to allow access to 1394 and USB hardware?(y/n)$y
```

```
Enter the name to the user to add to this user group $ humanoid
```

```
Is this user name ok?: humanoid (y/n)$ y
```

```
Add user humanoid to group pgrimagimg. Is this ok?: (y/n)$ y
```

```
Do you want to restart the udev deamon? (y/n)$ y
```

Se tudo correu bem no final deverá aparecer a mensagem *Complete*. Para executar o programa de visualização basta fazer ALT+F2 e escrever *flycap*. Em seguida, surgirá o menu de selecção de camara (figura A.15), e onde se pode configurar os parâmetros da mesma.

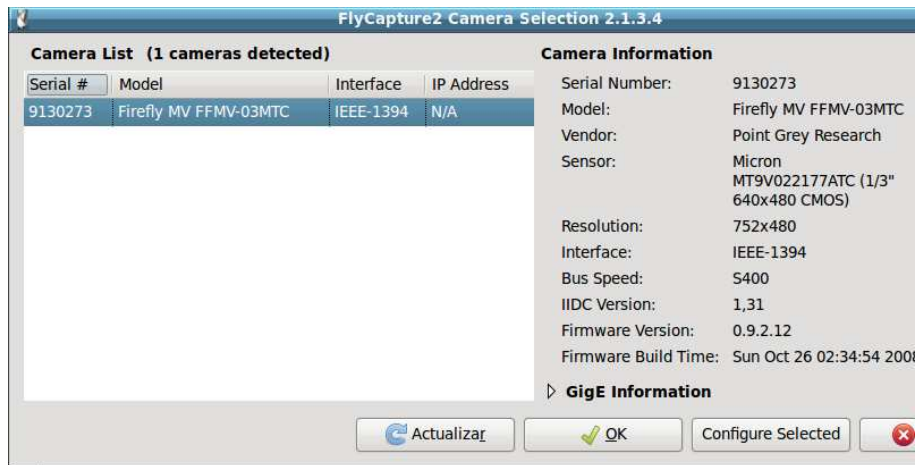


Figura A.15: Menu selecção camara.

Escolhida a camara que se pretende ver faz-se OK, onde surgirá uma nova janela (figura A.16), onde se pode visualizar a área de captura, neste caso o pc-104 montado.

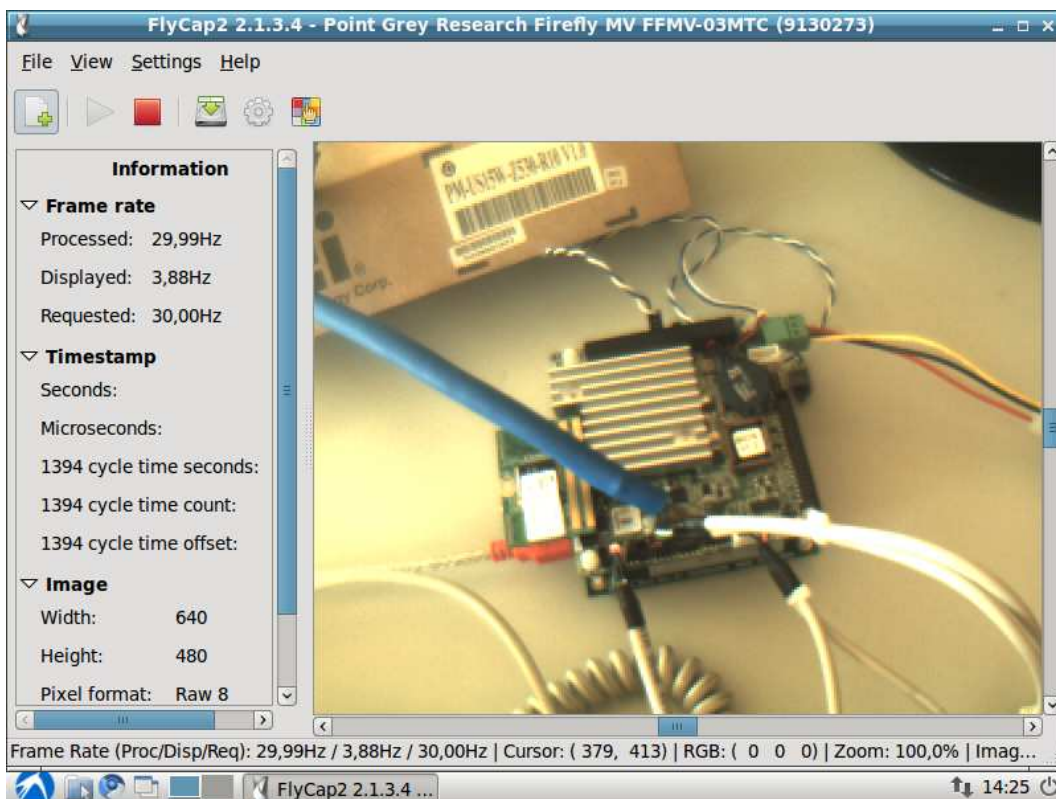


Figura A.16: Ambiente de visualização.

Apêndice B

Resultados Simulação Numérica

Simulação do componente base posterior

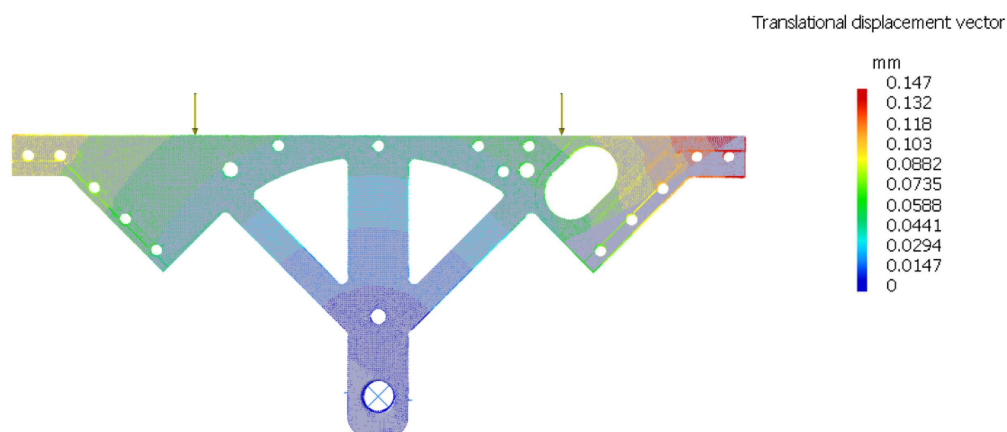


Figura B.1: Campo de deslocamentos do componente base posterior sujeito a uma carga de $100N$. Vista de frente.

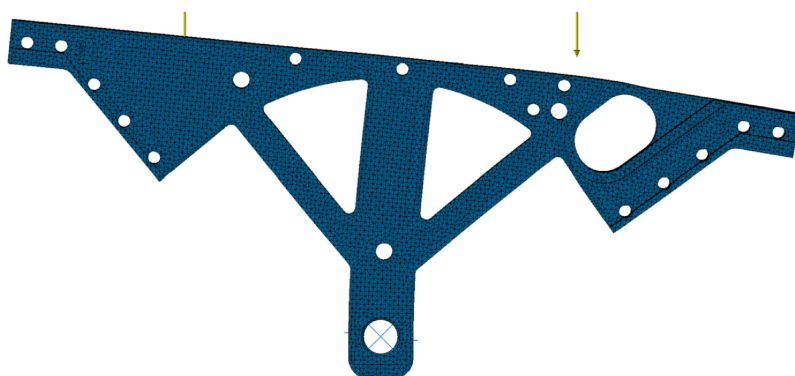


Figura B.2: Deformada da base posterior a uma escala de 100 vezes o valor real do deslocamento.

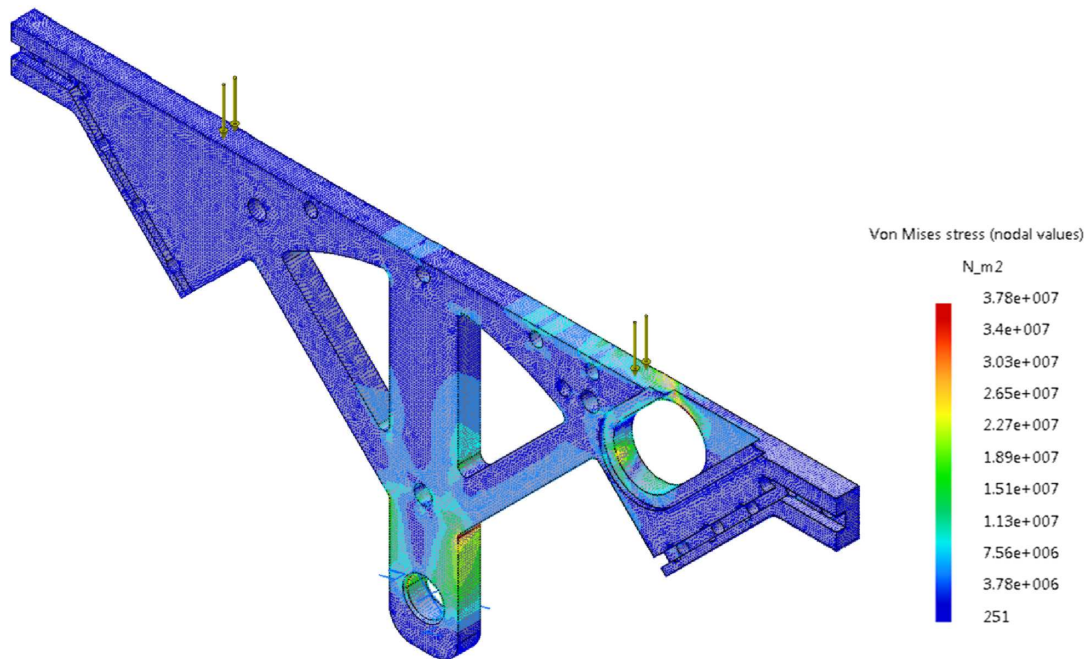


Figura B.3: Campo de tensões do componente base posterior sujeito a uma carga de 100N.

Simulação do componente base anterior

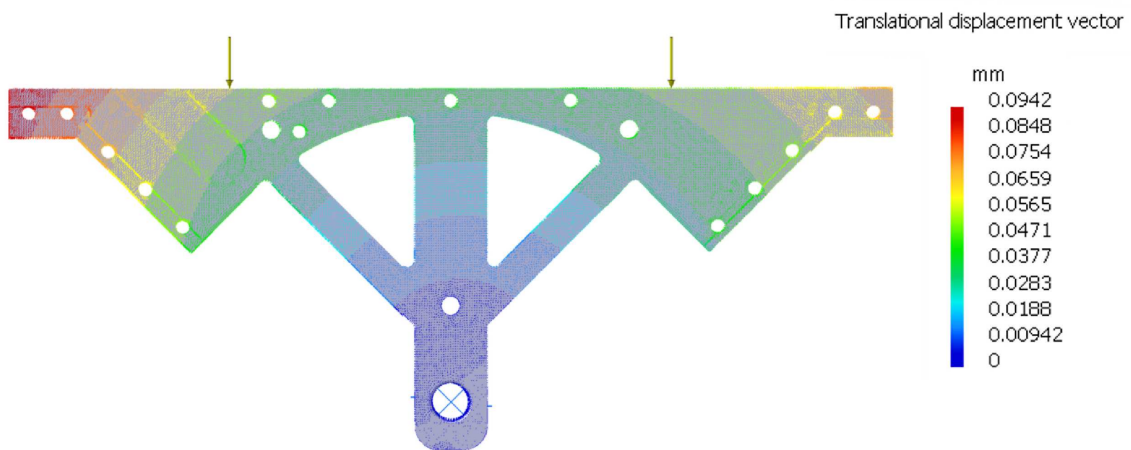


Figura B.4: Campo de deslocamentos do componente base anterior sujeita a uma carga de 100N. Vista de frente.

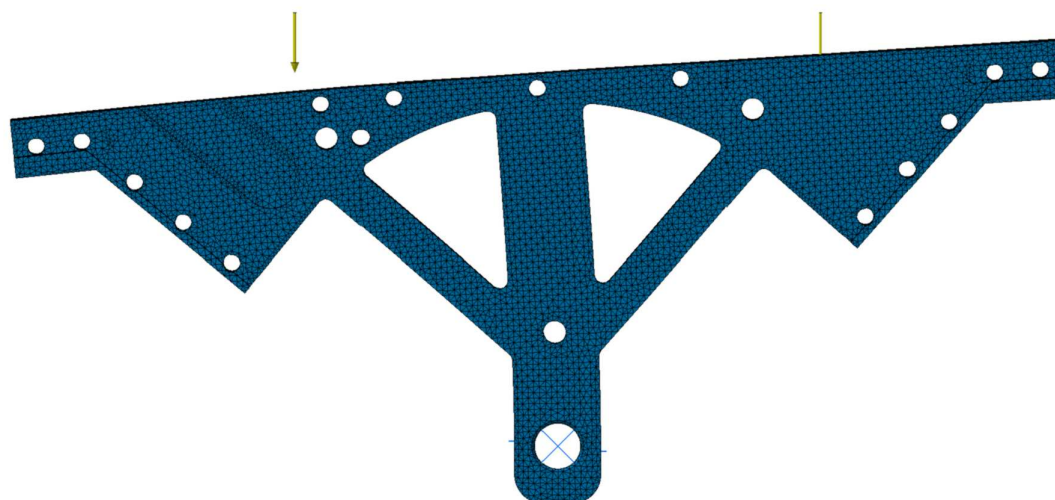


Figura B.5: Deformada da base anterior a uma escala de 100 vezes o valor real do deslocamento.

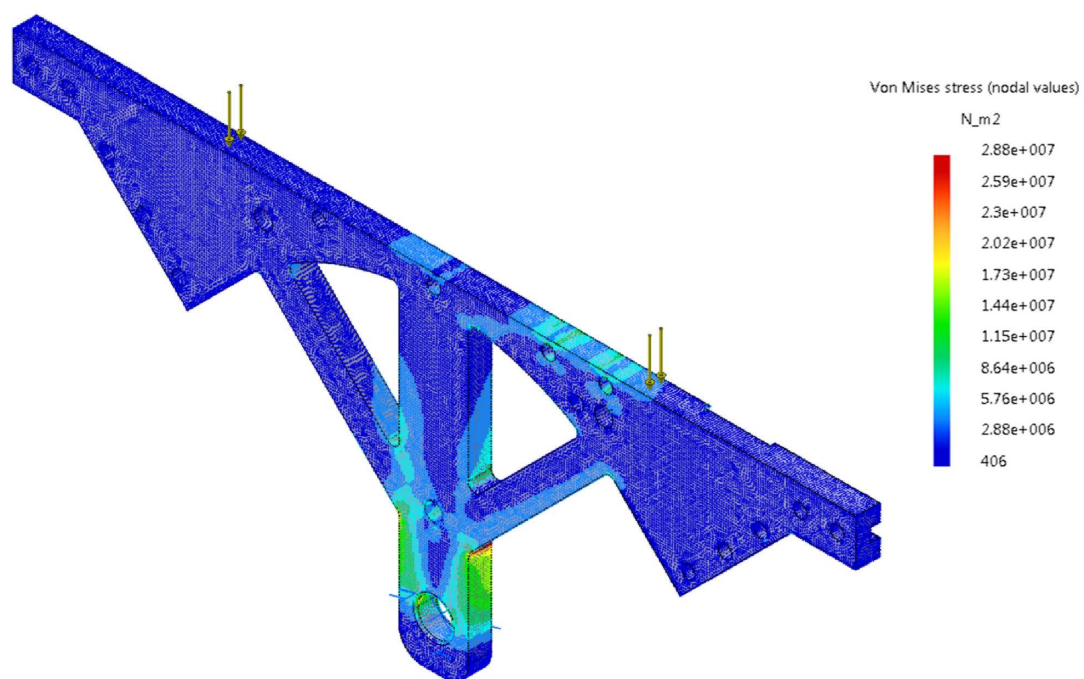


Figura B.6: Campo de tensões do componente base anterior sujeito a uma carga de 100N.

Simulação suporte do servomotor do braço 1

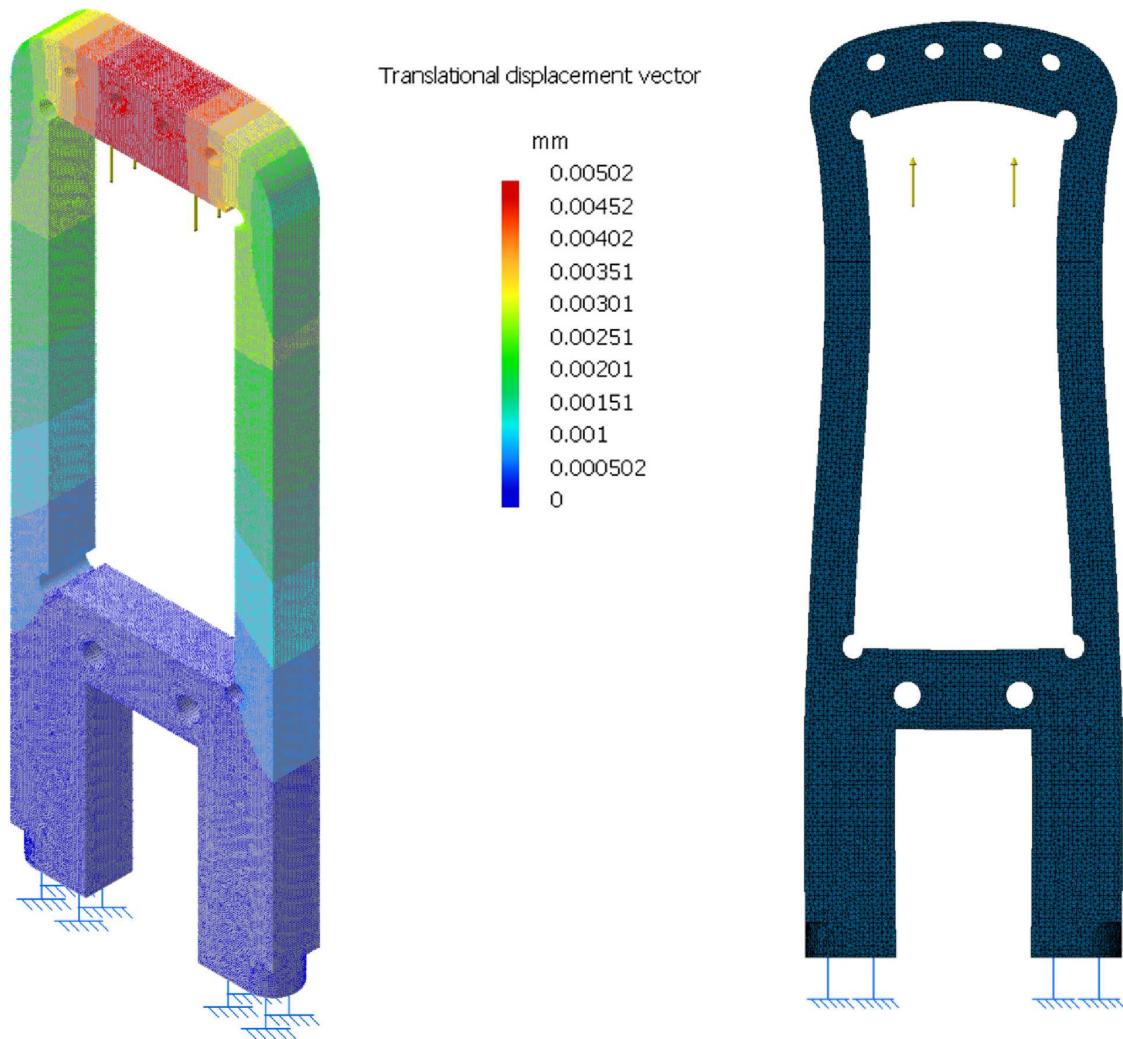


Figura B.7: Campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de $100N$ e respectiva deformada a uma escala de 1000 vezes o valor real do deslocamento.

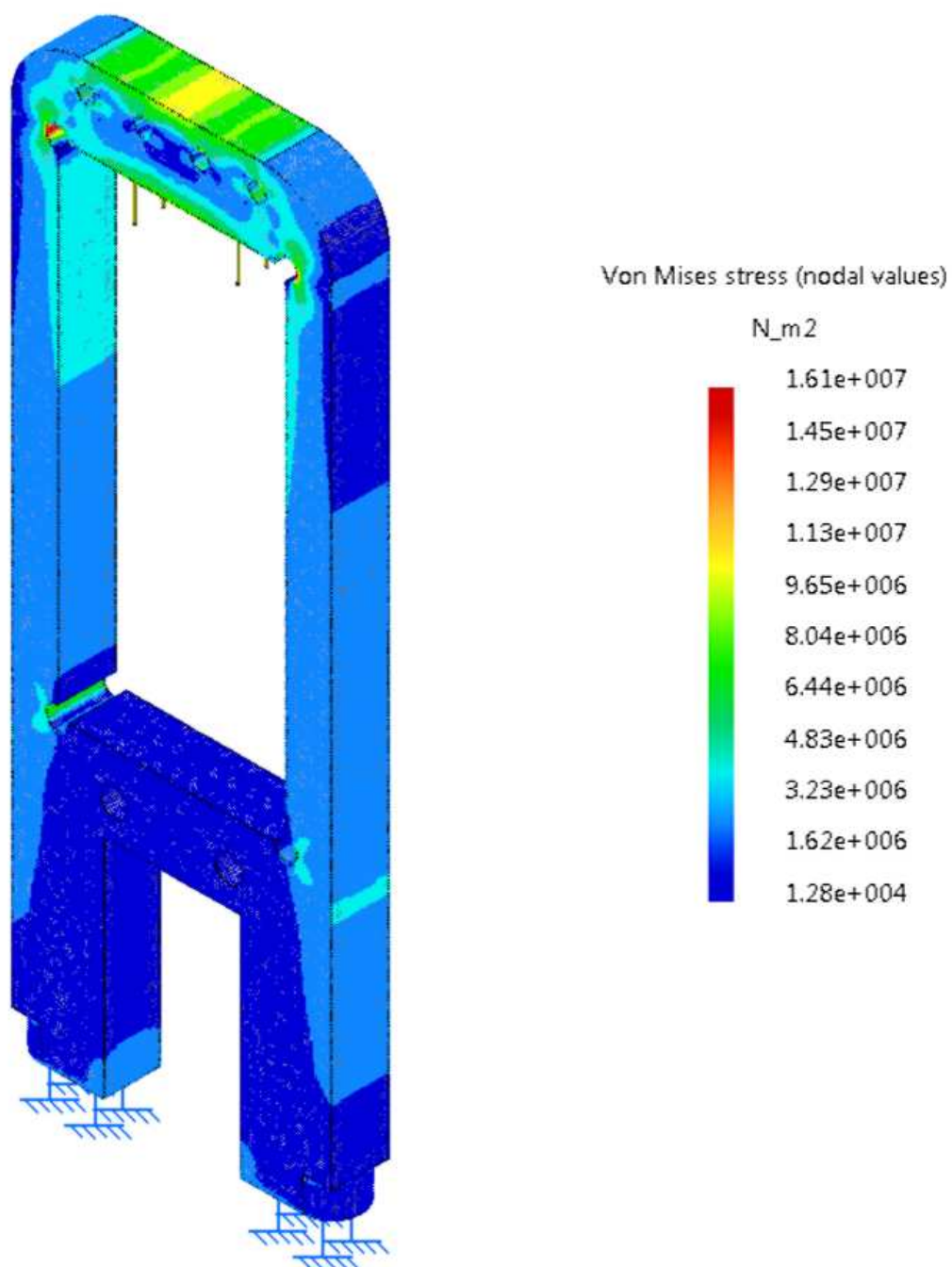


Figura B.8: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

Simulação suporte do servomotor do braço 2

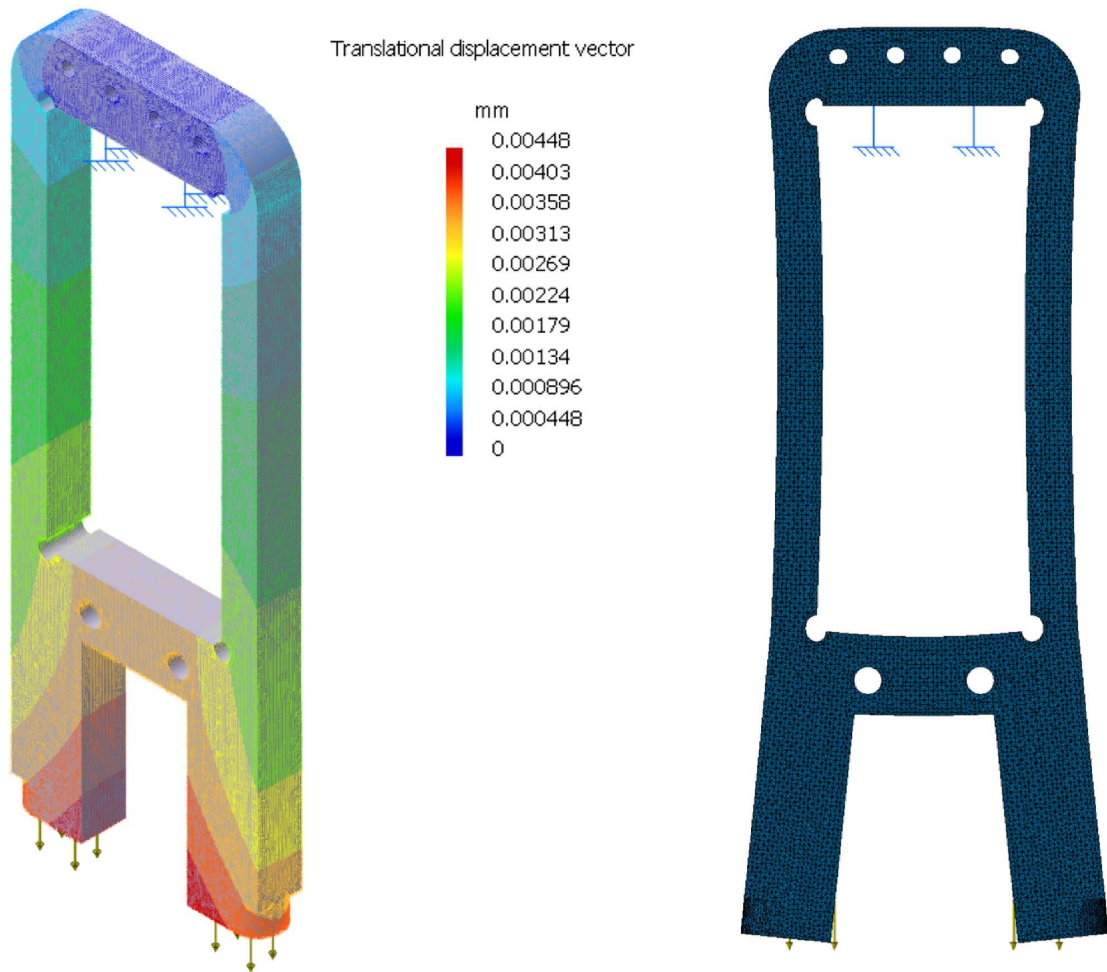


Figura B.9: Campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de $100N$ e respectiva deformada a uma escala de 1000 vezes o valor real do deslocamento.

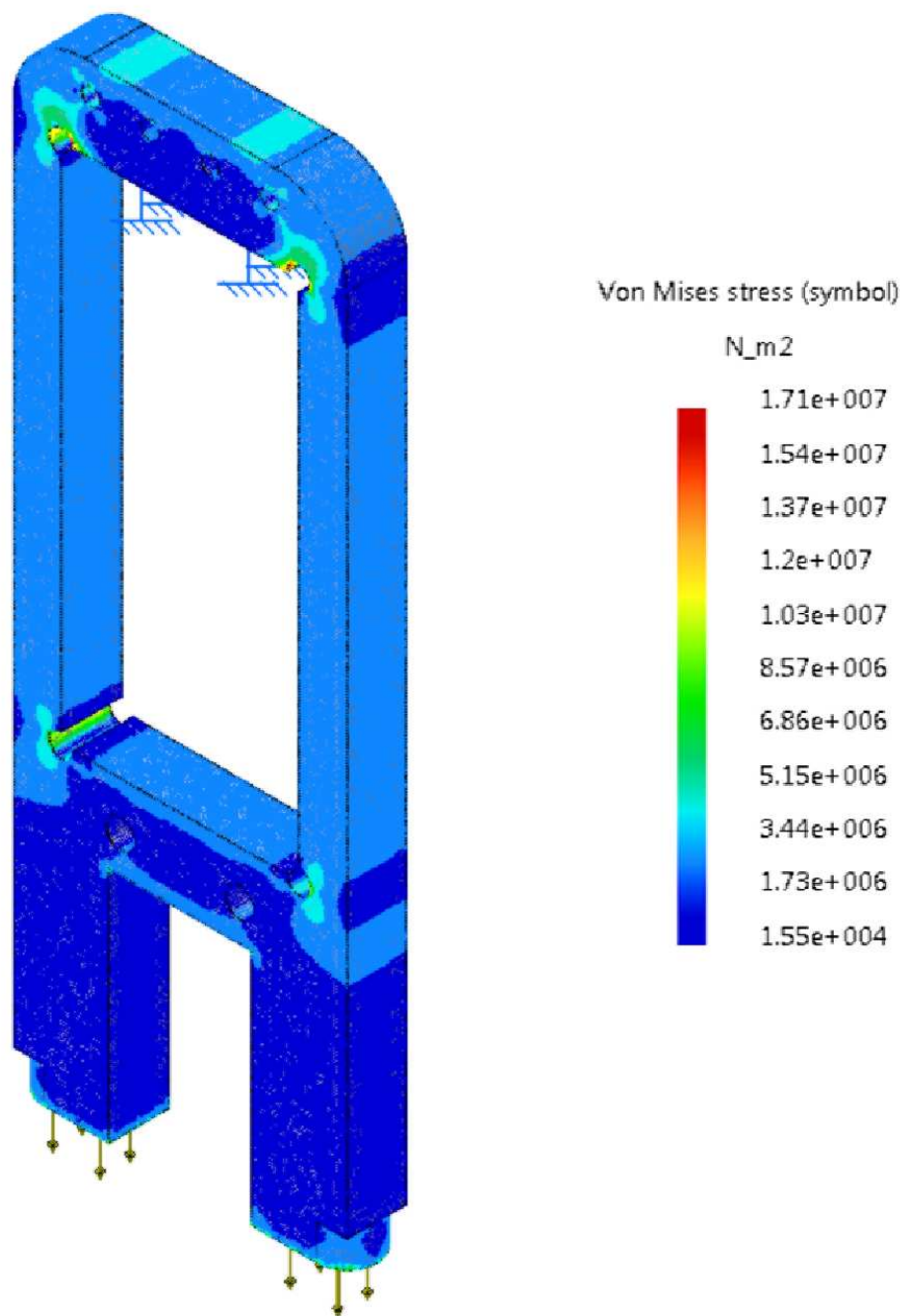


Figura B.10: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

Simulação suporte do servomotor do braço 3

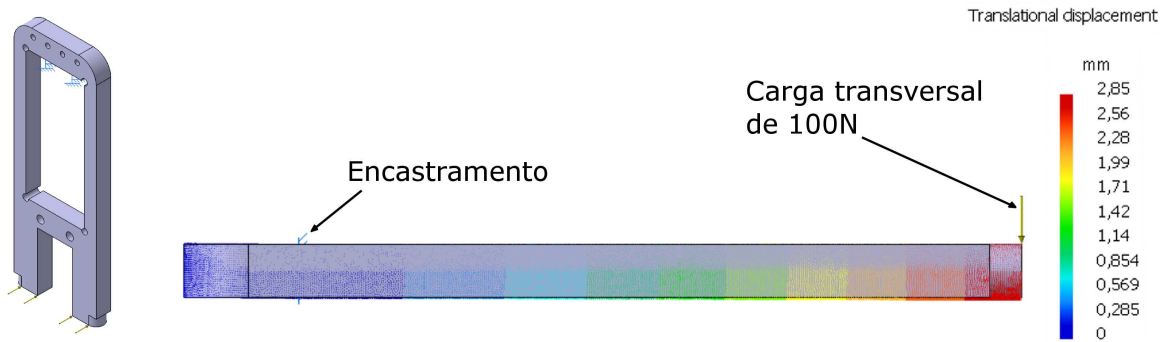


Figura B.11: Definição das condições impostas e campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.



Figura B.12: Deformada do componente do braço à escala real do deslocamento.

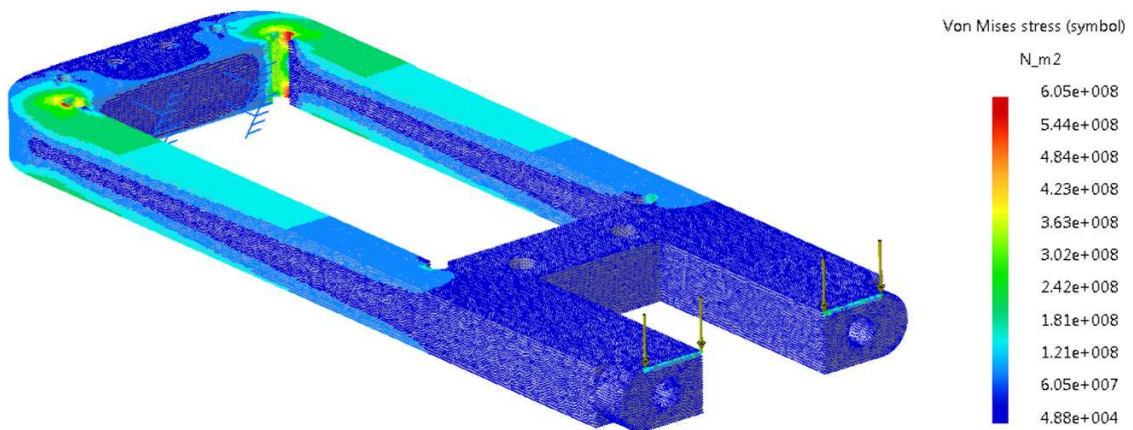


Figura B.13: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

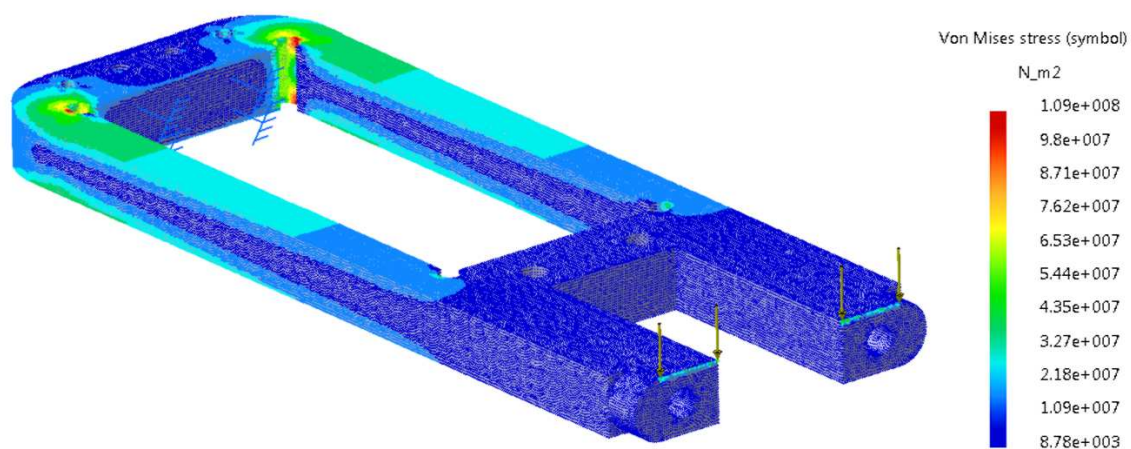


Figura B.14: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 18N.

Simulação suporte do servomotor do braço 4

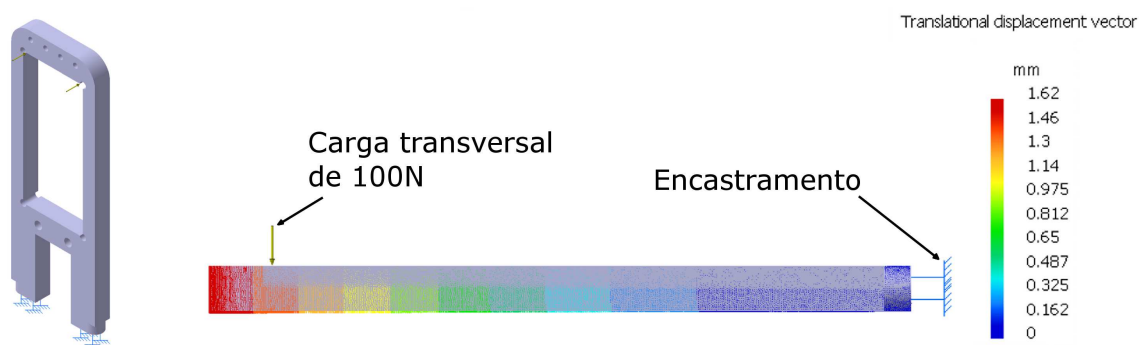


Figura B.15: Definição das condições impostas e campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

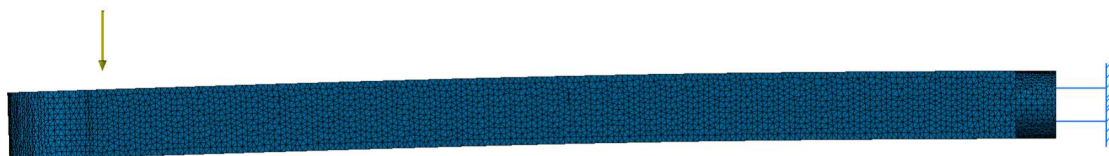


Figura B.16: Deformada do componente do braço à escala real do deslocamento.

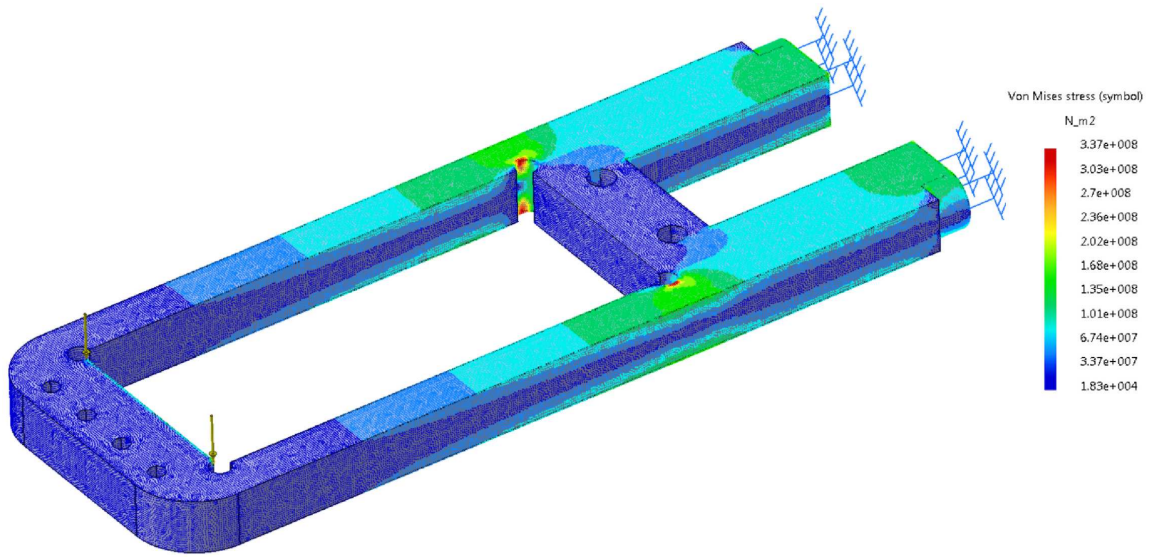


Figura B.17: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

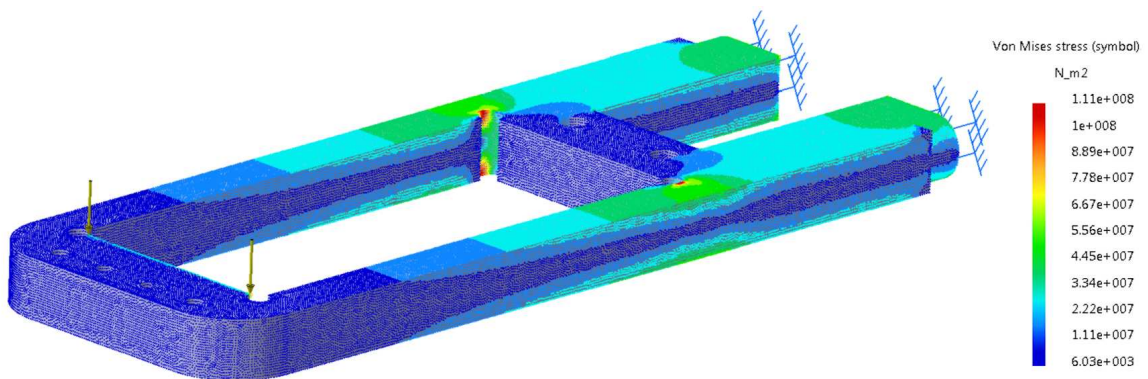


Figura B.18: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 33N.

Simulação suporte do servomotor do braço 5

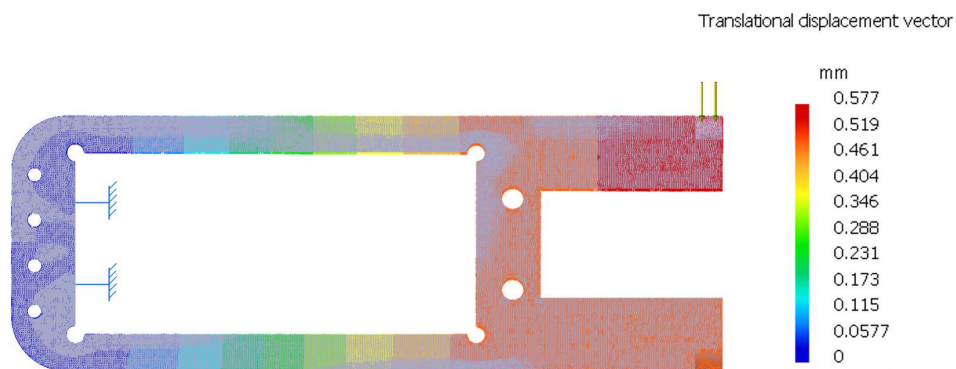


Figura B.19: Campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

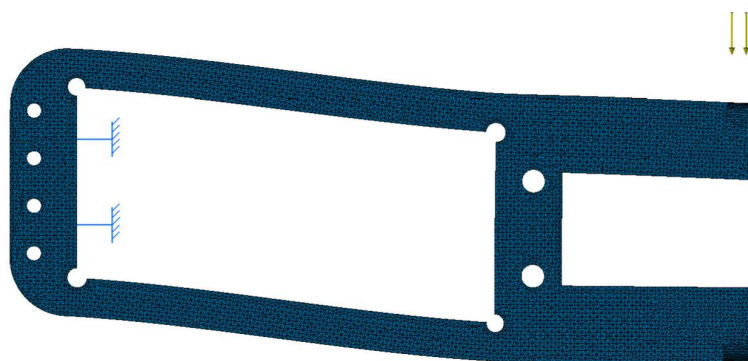


Figura B.20: Deformada do componente do braço a uma escala de 10 vezes o valor real do deslocamento.

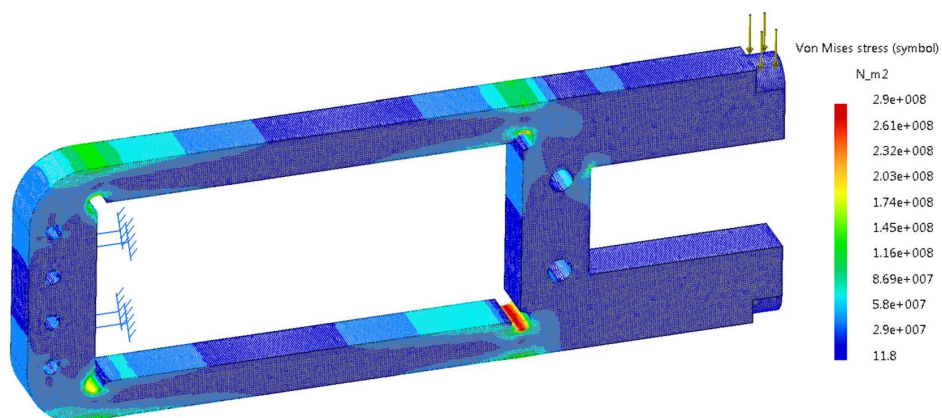


Figura B.21: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

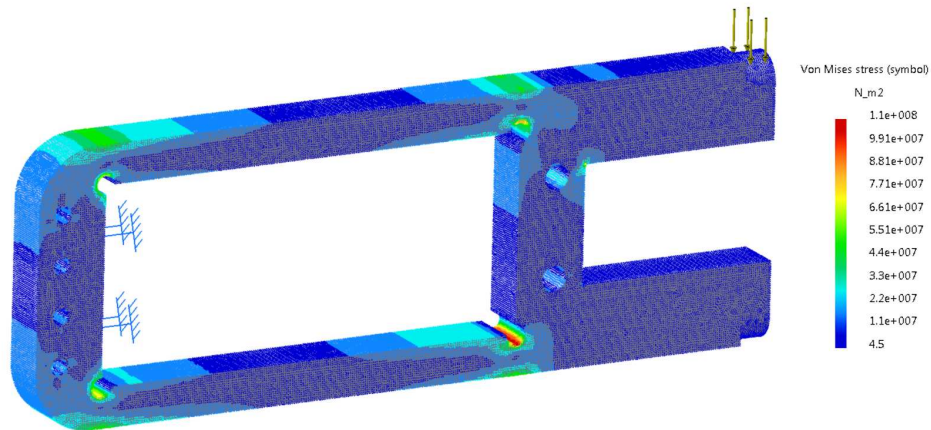


Figura B.22: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 38N.

Simulação suporte do servomotor do braço 6

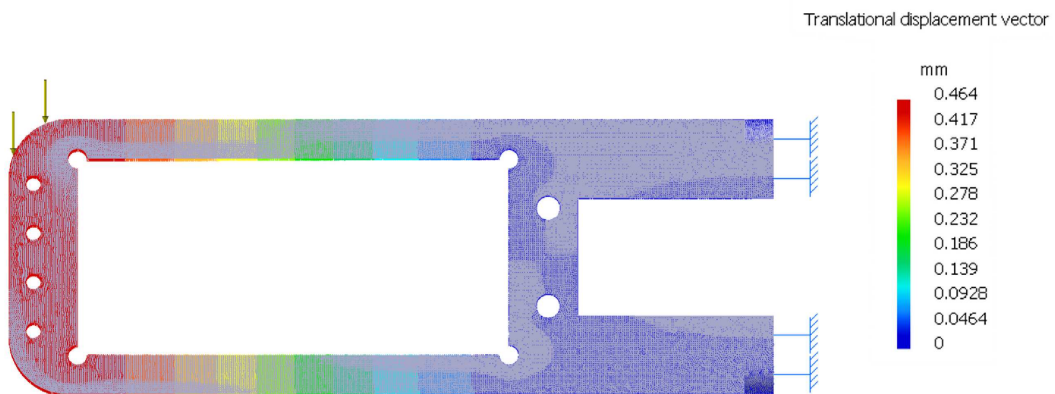


Figura B.23: Campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

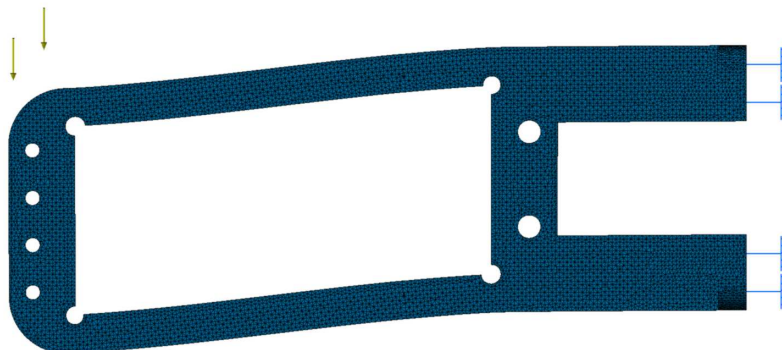


Figura B.24: Deformada do componente do braço a uma escala de 10 vezes o valor real do deslocamento.

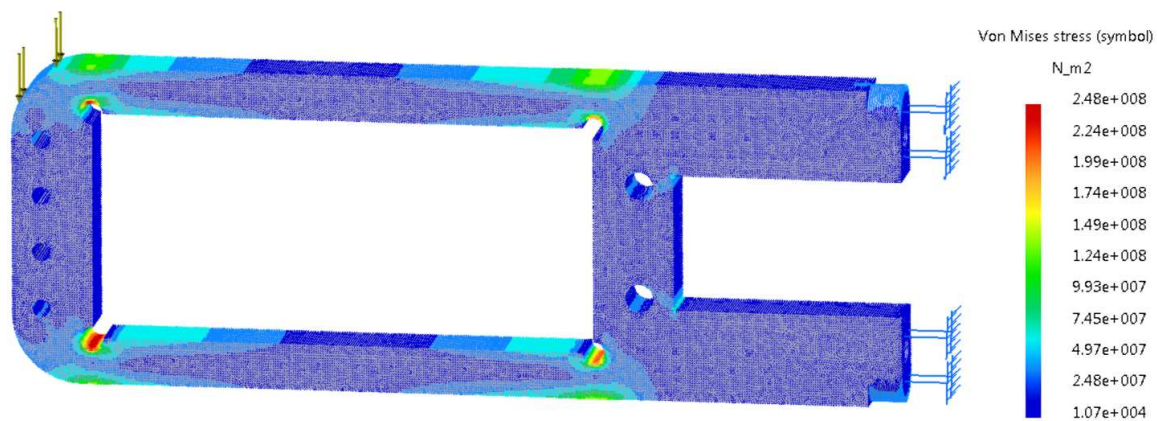


Figura B.25: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

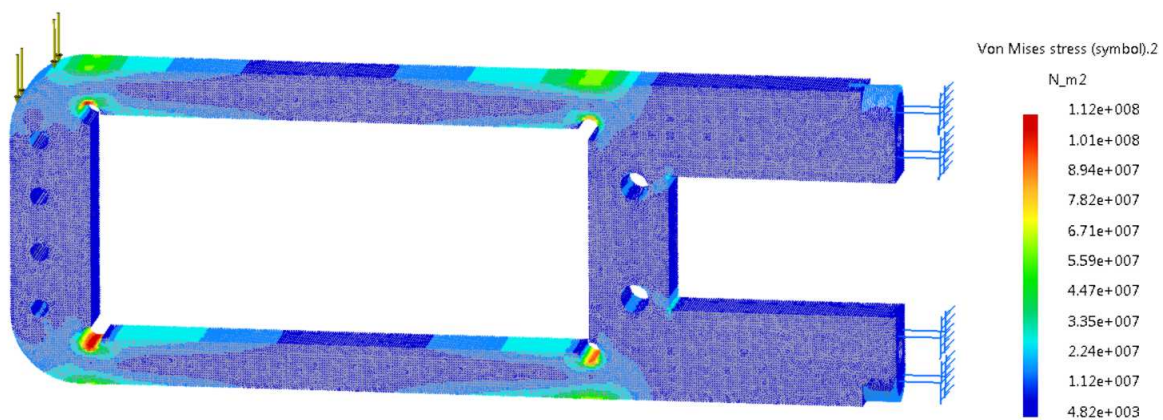


Figura B.26: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 45N.

Simulação suporte do servomotor do braço 7

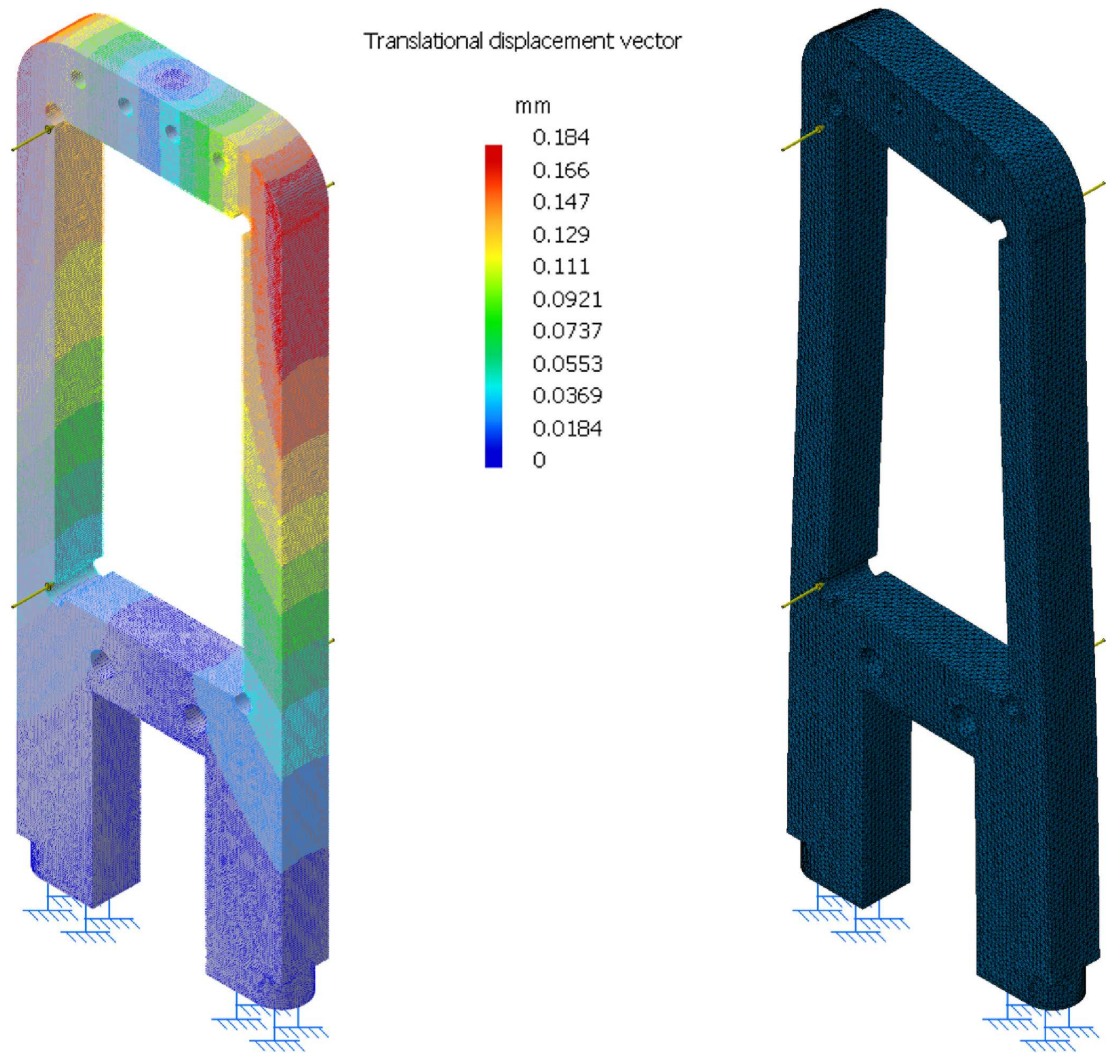


Figura B.27: Campo de deslocamentos do componente do braço sujeito a uma carga de $100N$ e respectiva deformada a uma escala de 10 vezes o valor real do deslocamento.

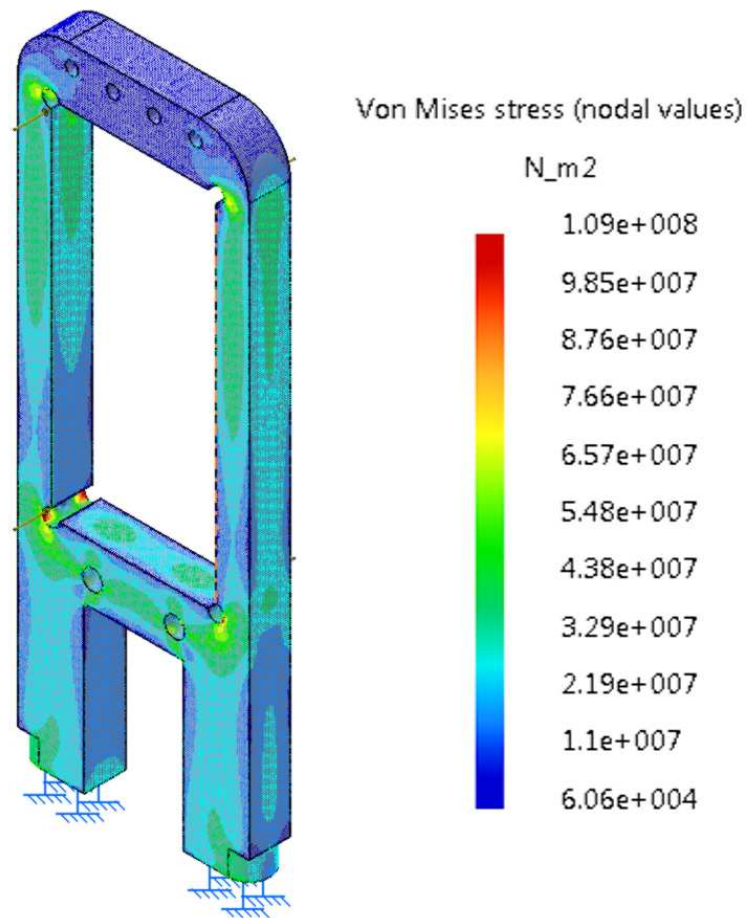


Figura B.28: Campo de tensões do componente do braço sujeito a uma carga de 100N.

Simulação veio rotação ombro 1

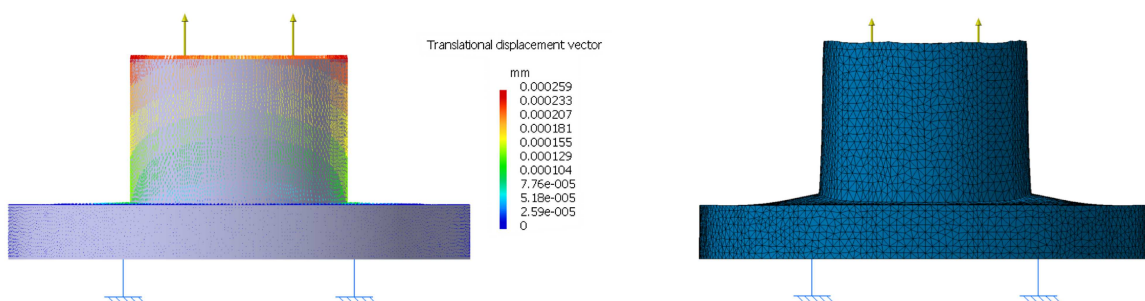


Figura B.29: Campo de deslocamentos do eixo de rotação do ombro sujeito a uma carga de 100N e respectiva deformada a uma escala de 1000 vezes o valor real do deslocamento.

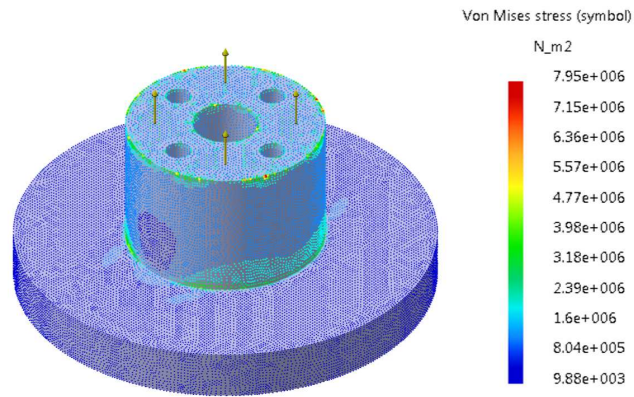


Figura B.30: Campo de tensões do componente de rotação do braço sujeito a uma carga de $100N$.

Simulação veio rotação ombro 2

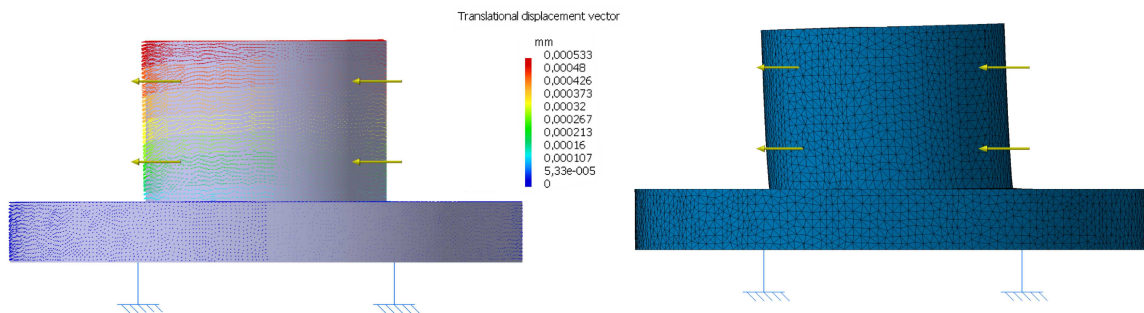


Figura B.31: Campo de deslocamentos do eixo de rotação do ombro sujeito a uma carga de $100N$ e respectiva deformada a uma escala de 1000 vezes o valor real do deslocamento.

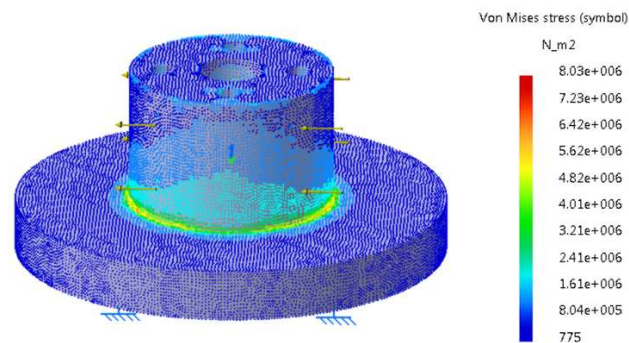


Figura B.32: Campo de tensões do componente de rotação do braço sujeito a uma carga de $100N$.

Apêndice C

Desenho dos Componentes

C.1 Membros Superiores

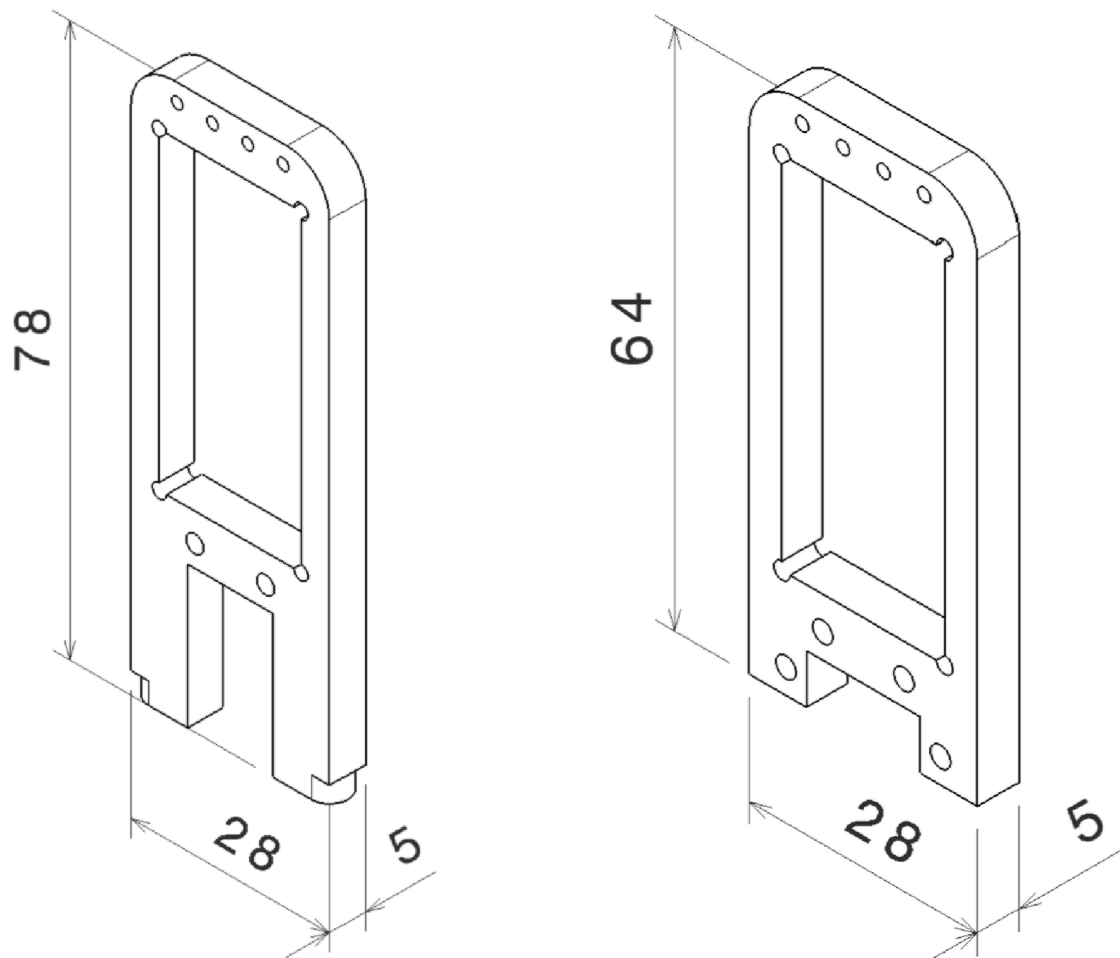


Figura C.1: Suportes dos servomotores do ombro do pulso e do cotovelo.

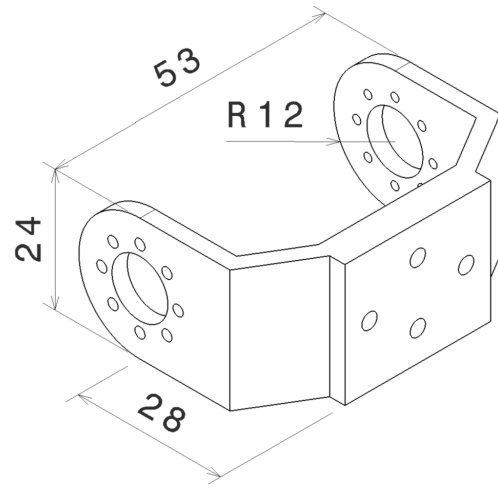
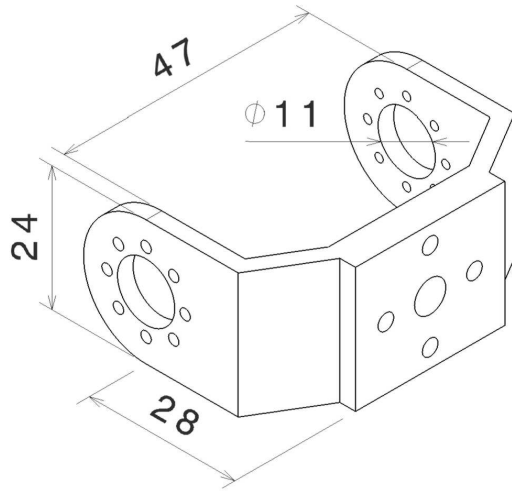


Figura C.2: Componente da junta ombro.

Figura C.3: Componente da junta cotovelo.

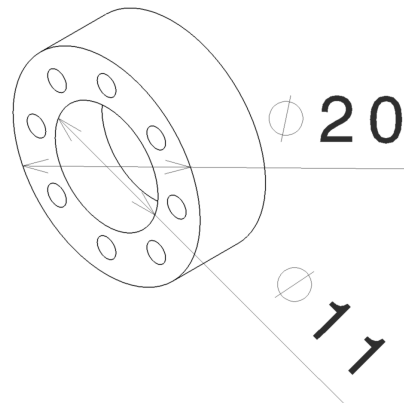
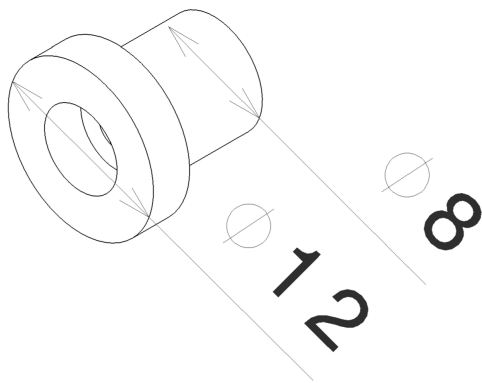


Figura C.4: Apoio do eixo do servomotor.

Figura C.5: Caixa do rolamento KT 8118N.

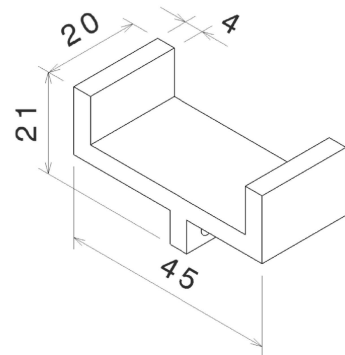
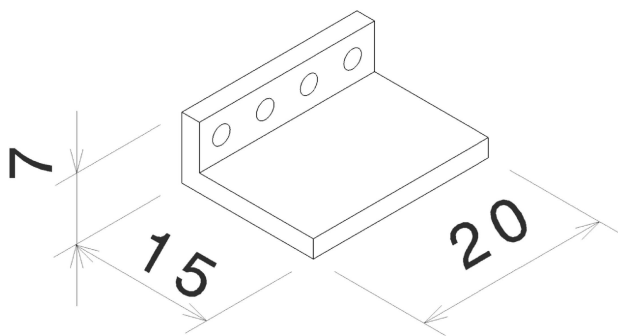


Figura C.6: Apoio superior e inferior do servomotor.

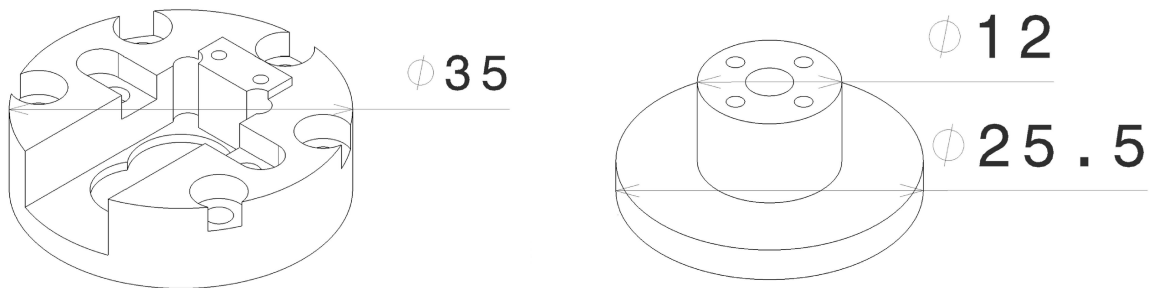


Figura C.7: Suporte do servomotor e veio rotação do antebraço.

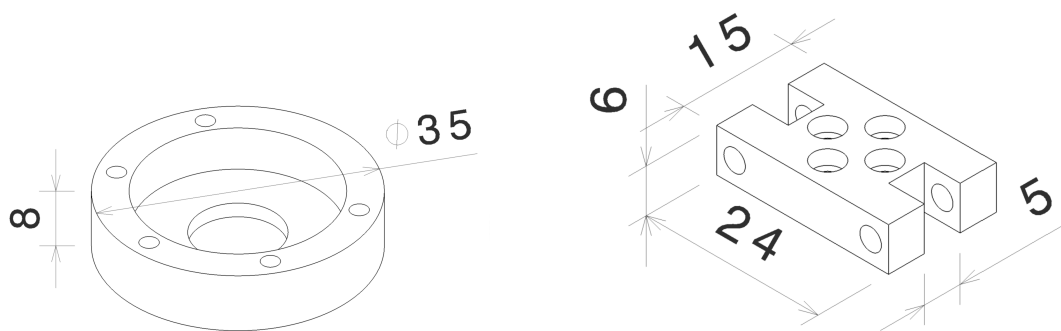


Figura C.8: Caixa do rolamento NTB 1226. Figura C.9: Ligador dos suportes no braço.

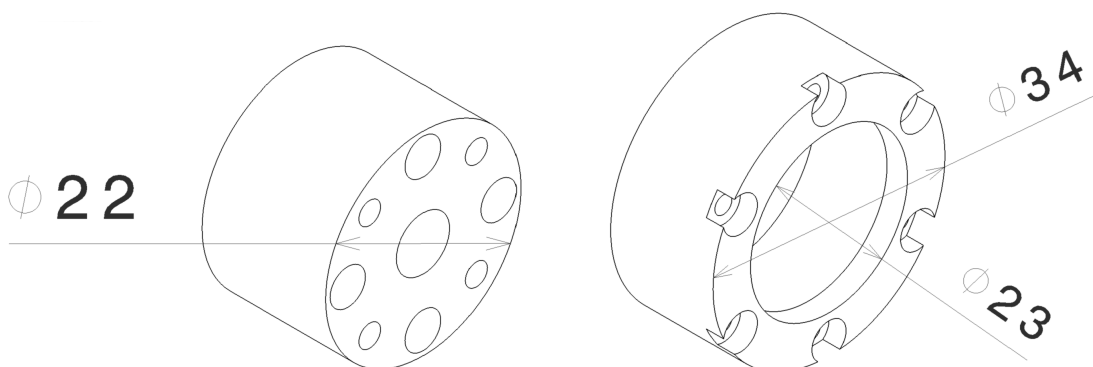


Figura C.10: Veio de extensão do ombro. Figura C.11: Caixa do rolamento KT 2226.

C.2 Cabeça

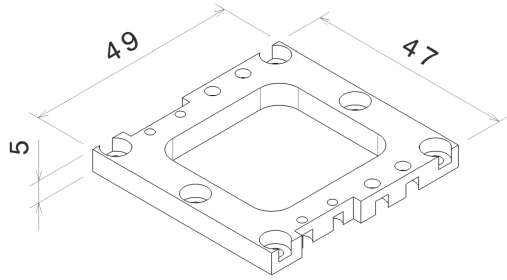


Figura C.12: Estrutura de base da cabeça.

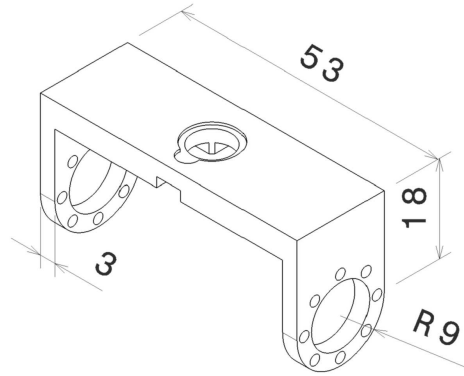


Figura C.13: Estrutura de "tilt".

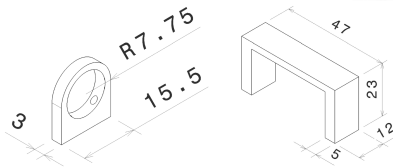


Figura C.14: Estrutura de suporte e fixação do servomotor de "tilt".

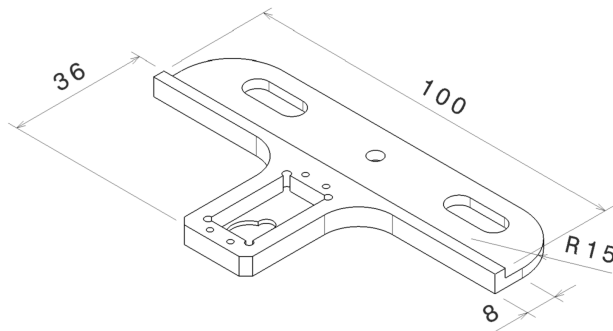


Figura C.15: Estrutura de "pan" da cabeça.

C.3 Tronco

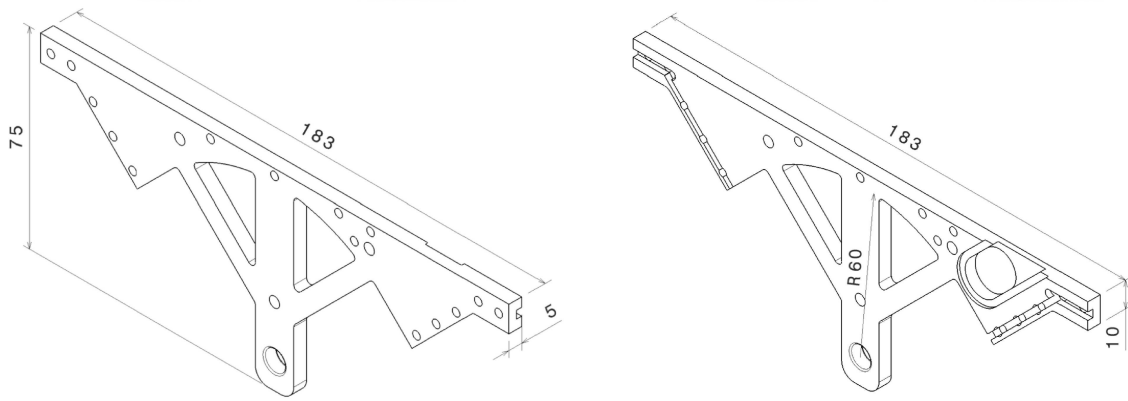


Figura C.16: Componentes anterior e posterior da base do tronco.

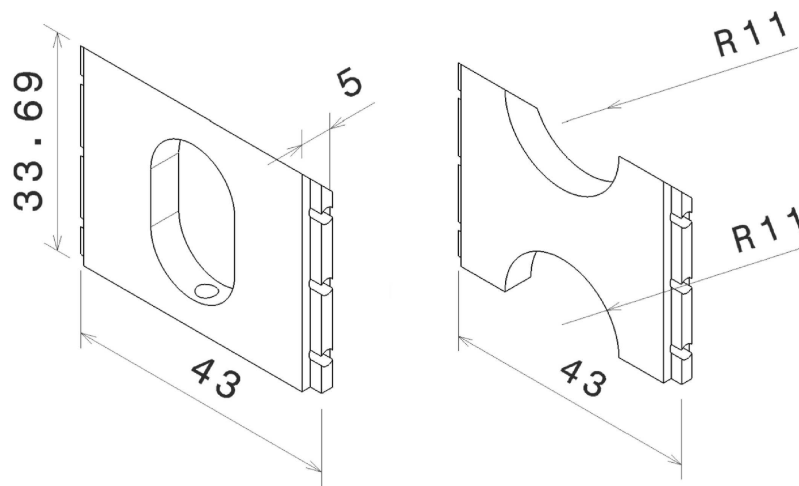


Figura C.17: Componentes laterais esquerda e direita da base do tronco.

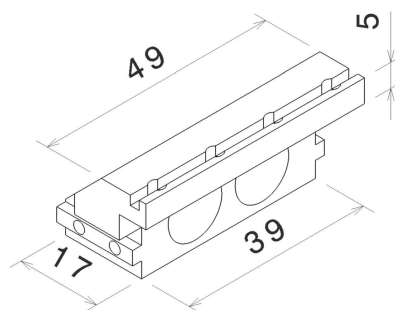


Figura C.18: Elemento de ligação de componentes da base do tronco.

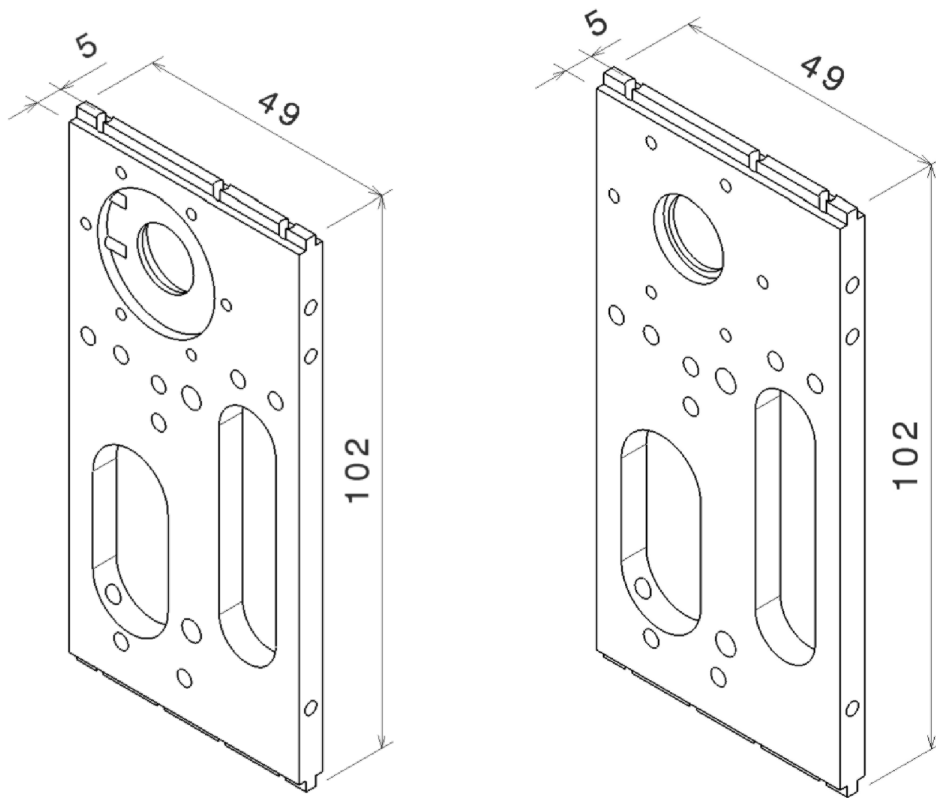


Figura C.19: Exterior esquerdo e interior direito dos componentes laterais do tronco.

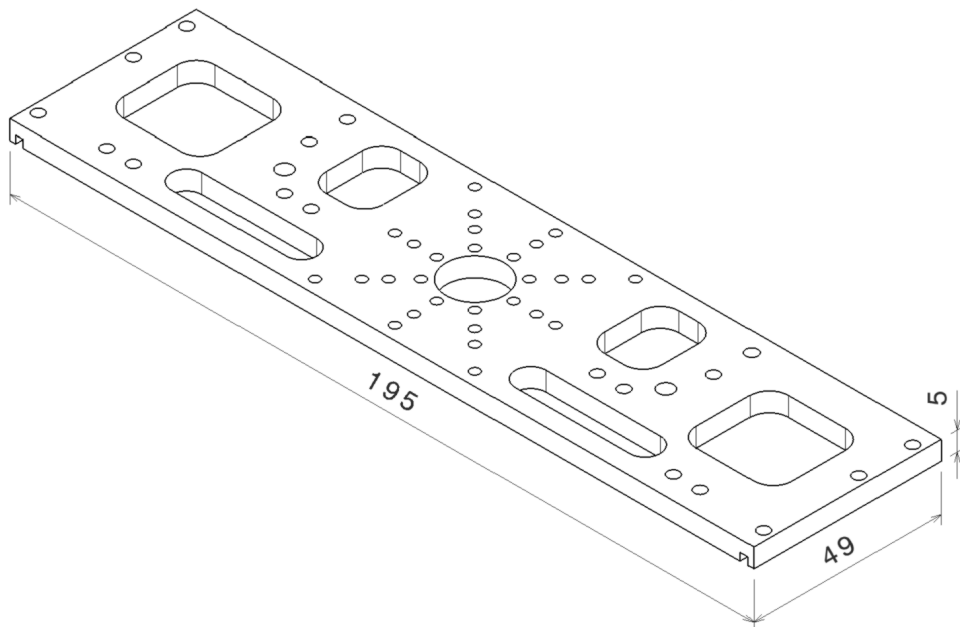


Figura C.20: Elemento da parte de cima do tronco.

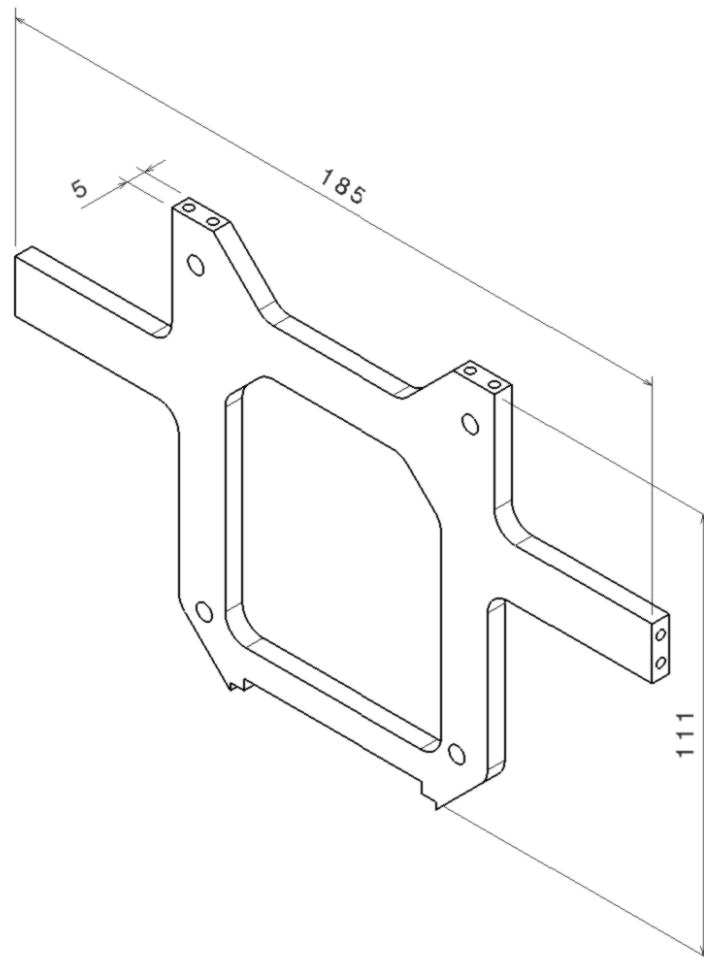


Figura C.21: Elemento de suporte da placa de computador embebido baseado em PC-104.

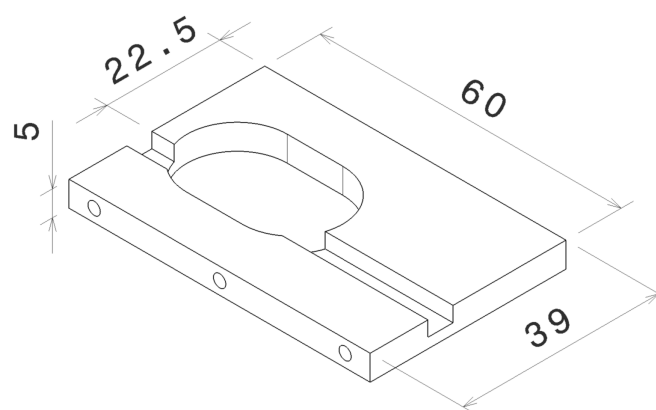


Figura C.22: Elemento de suporte da estrutura da placa de computador embebido baseado em PC-104.

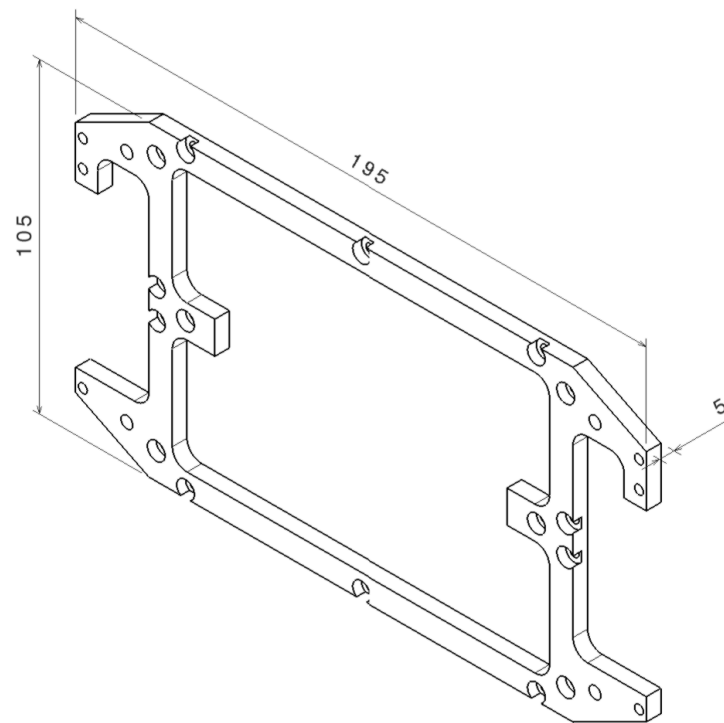


Figura C.23: Elemento de suporte das baterias.

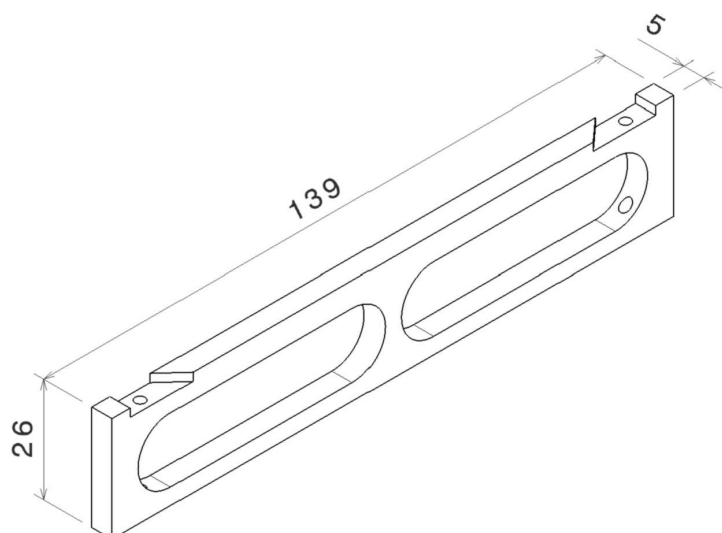


Figura C.24: Componente central de suporte das baterias.

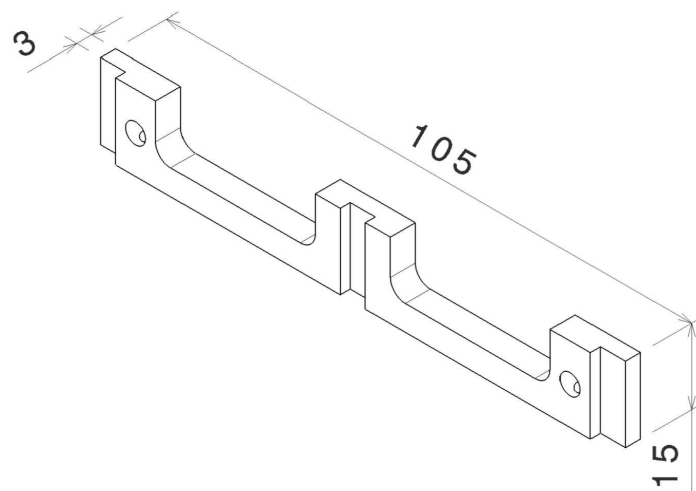


Figura C.25: Componente lateral de suporte das baterias.

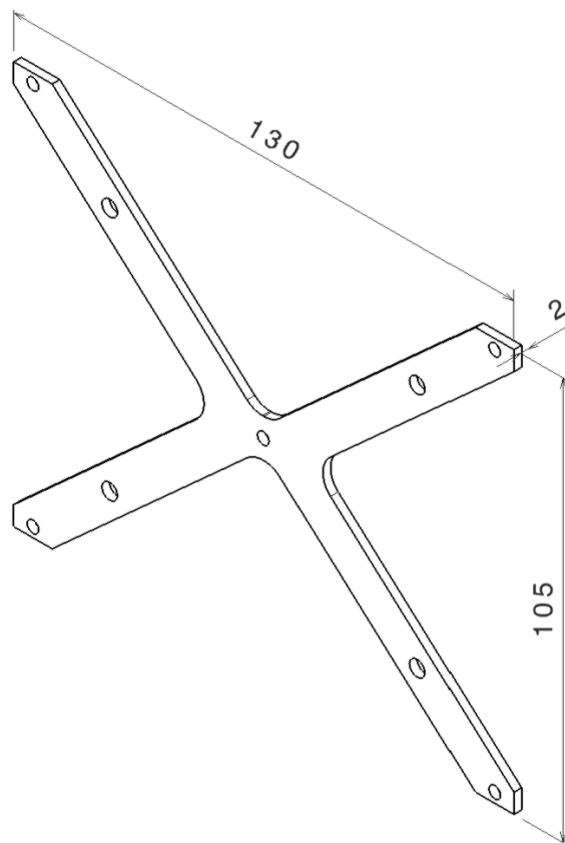


Figura C.26: Elemento de fixação das baterias.

Apêndice D

Dados Inerciais

Inclinação Lateral

Tabela D.1: Dados do dimensionamento dos actuadores passivos

γ	G_x	G_y	G_z	r_{cm}	α	$r_{elástico}$	e	θ	k
0	0.91	-10.26	109.99	109.99	89.53	57.69	37.762	67.60	13.25
1	2.97	-10.26	109.95	109.98	88.46	57.69	38.691	66.88	42.51
2	5.02	-10.26	109.86	109.97	87.38	57.69	38.521	58.97	77.62
3	7.08	-10.26	109.74	109.97	86.31	57.69	40.533	65.47	97.91
4	9.13	-10.26	109.59	109.97	85.24	57.69	41.446	64.77	124.22
5	11.18	-10.26	109.40	109.97	84.17	57.69	42.355	64.07	149.72
6	13.23	-10.26	109.17	109.97	83.09	57.69	43.257	63.38	174.46
7	15.27	-10.26	108.91	109.97	82.02	57.69	44.155	62.69	198.51
8	17.30	-10.26	108.61	109.98	80.95	57.69	45.047	62.01	221.91
9	19.34	-10.26	108.28	109.99	79.88	57.69	45.933	61.33	244.75
10	21.36	-10.26	107.91	110.01	78.80	57.69	46.813	60.65	267.04
11	23.38	-10.26	107.51	110.02	77.73	57.69	47.688	59.98	288.84
12	25.39	-10.26	107.07	110.04	76.66	57.69	48.557	59.31	310.19
13	27.39	-10.26	106.60	110.06	75.59	57.69	49.419	58.65	331.13
14	29.39	-10.26	106.09	110.09	74.52	57.69	50.277	57.98	351.69
15	31.37	-10.26	105.55	110.11	73.45	57.69	51.127	57.32	371.90
16	33.35	-10.26	104.97	110.14	72.38	57.69	51.972	56.67	391.80
17	35.31	-10.26	104.36	110.17	71.30	57.69	52.809	56.61	408.60
18	37.27	-10.26	103.71	110.21	70.23	57.69	53.642	55.36	430.78
19	39.21	-10.26	103.03	110.24	69.16	57.69	54.467	54.71	449.92
20	41.14	-10.26	102.32	110.28	68.10	57.69	55.285	54.07	468.86
21	43.06	-10.26	101.57	110.32	67.03	57.69	56.097	53.42	487.62
22	44.96	-10.26	100.79	110.37	65.96	57.69	56.903	52.78	506.21
23	46.86	-10.26	99.98	110.41	64.89	57.69	57.701	52.14	524.67
24	48.73	-10.26	99.13	110.51	63.82	57.69	58.492	51.51	543.02
25	50.59	-10.26	98.25	110.57	62.75	57.69	59.276	50.87	561.27
26	52.44	-10.26	97.34	110.62	61.69	57.69	60.055	50.24	579.44

continua na próxima página

Tabela D.1 – continuação da pagina anterior

γ	G_x	G_y	G_z	r_{cm}	α	$r_{elástico}$	e	θ	k
27	54.27	-10.26	96.40	110.68	60.62	57.69	60.818	49.61	597.64
28	56.08	-10.26	95.42	110.74	59.56	57.69	61.588	48.98	615.66
29	57.87	-10.26	94.41	110.80	58.49	57.69	62.344	48.36	633.71
30	59.65	-10.26	93.38	110.87	57.43	57.69	63.093	47.73	651.79
31	61.41	-10.26	92.31	110.94	56.36	57.69	63.834	47.11	669.88
32	63.15	-10.26	91.21	111.01	55.30	57.69	64.569	46.49	687.99
33	64.87	-10.26	90.08	111.08	54.24	57.69	65.295	45.87	706.16
34	66.57	-10.26	88.92	111.01	53.18	57.69	66.014	45.25	724.40
35	68.25	-10.26	87.73	111.15	52.12	57.69	66.725	44.63	742.72
36	69.91	-10.26	86.51	111.23	51.06	57.69	67.429	44.02	761.14
37	71.55	-10.26	85.26	111.30	50.00	57.69	68.124	43.41	779.69
38	73.16	-10.26	83.99	111.39	48.94	57.69	68.812	42.80	798.39
39	74.76	-10.26	82.68	111.47	47.88	57.69	69.492	42.19	817.23
40	76.33	-10.26	81.35	111.55	46.83	57.69	70.164	41.58	836.26
41	77.87	-10.26	79.99	111.64	45.77	57.69	70.828	40.97	855.49
42	79.40	-10.26	78.61	111.73	44.71	57.69	71.485	40.36	874.91
43	80.90	-10.26	77.20	111.82	43.66	57.69	72.133	39.76	894.58
44	82.37	-10.26	75.76	111.91	42.61	57.69	72.772	39.15	914.51
45	83.82	-10.26	74.30	112.01	41.56	57.69	73.404	38.55	934.70

Onde G_x , G_y e G_z são as componentes da posição do centro de massa em relação à origem.

Flexão/Extensão

Tabela D.2: Dados do dimensionamento dos actuadores passivos

γ	G_x	G_y	G_z	r_{cm}	α	e_1	β	θ	k
0	0.91	-10.26	109.99	110.47	84.67	15.06	32.26	44.99	-291.38
1	0.91	-8.05	110.15	110.44	85.82	15.46	32.29	45.00	-226.52
2	0.91	-5.84	110.28	110.43	86.97	15.86	32.31	45.00	-162.84
3	0.91	-3.63	110.36	110.42	88.12	16.26	32.32	44.99	-100.30
4	0.91	-1.42	110.41	110.42	89.26	16.66	32.32	44.97	-38.86
5	0.91	0.79	110.42	110.42	90.41	17.06	32.30	44.94	21.53
6	0.91	13.01	110.39	110.43	91.56	17.46	32.28	44.91	80.93
7	0.91	5.22	110.32	110.44	92.71	17.87	32.24	44.86	139.36
8	0.91	7.43	110.21	110.46	93.85	18.27	32.20	44.81	196.89
9	0.91	9.63	110.07	110.49	95.00	18.67	32.15	44.75	253.55
10	0.91	11.84	109.89	110.52	96.15	19.06	32.08	44.67	309.03
11	0.91	14.04	109.66	110.56	97.30	19.46	32.01	44.59	364.33
12	0.91	16.24	109.40	110.60	98.44	19.86	31.93	44.50	418.56
13	0.91	18.43	109.10	110.65	99.59	20.26	31.84	44.41	472.02
14	0.91	20.62	108.77	110.70	100.73	20.65	31.75	44.30	524.81

continua na próxima página

Tabela D.2 – continuação da pagina anterior

γ	Gx	Gy	Gz	r_{cm}	α	e_1	β	θ	k
15	0.91	22.80	108.39	110.76	101.88	21.05	31.64	44.18	576.88
16	0.91	24.97	107.98	110.83	103.02	21.44	31.53	44.06	628.32
17	0.91	27.13	107.53	110.90	104.16	21.83	31.41	43.92	679.08
18	0.91	29.29	107.04	110.97	105.30	22.22	31.28	43.78	729.30
19	0.91	31.44	106.51	111.05	106.45	22.61	31.15	43.62	778.91
20	0.91	33.58	105.95	111.14	107.59	23.00	31.01	43.46	827.96
21	0.91	35.71	105.35	111.23	108.73	23.39	30.87	43.29	876.51
22	0.91	37.83	104.71	111.33	109.86	23.77	30.71	43.10	924.51
23	0.91	39.93	104.03	111.43	111.00	24.15	30.56	42.91	972.02
24	0.91	42.03	103.32	111.54	112.14	24.53	30.39	42.71	1019.10
25	0.91	44.11	102.57	111.66	113.27	24.91	30.22	42.50	1065.77
26	0.91	46.18	101.79	111.78	114.40	25.29	30.05	42.27	1111.99
27	0.91	48.23	100.97	111.90	115.53	25.66	29.87	42.04	1157.80
28	0.91	50.27	100.11	112.03	116.67	26.04	29.68	41.80	1203.24
29	0.91	52.30	99.22	112.16	117.79	26.41	29.49	41.54	1248.35
30	0.91	54.31	98.29	112.30	118.92	26.78	29.29	41.28	1293.10
31	0.91	56.30	97.33	112.44	120.05	27.14	29.09	41.00	1337.55
32	0.91	58.28	96.34	112.59	121.17	27.51	28.89	40.71	1381.72
33	0.91	60.23	95.30	112.75	122.29	27.87	28.68	40.41	1425.63
34	0.91	62.17	94.24	112.90	123.41	28.23	28.46	40.10	1469.25
35	0.91	64.09	93.14	113.07	124.53	28.58	28.25	39.78	1512.72
36	0.91	65.99	92.01	113.23	125.65	28.94	28.02	39.45	1555.92
37	0.91	67.88	90.84	113.40	126.77	29.29	27.80	39.11	1598.90
38	0.91	69.74	89.65	113.58	127.88	29.64	27.57	38.75	1641.79
39	0.91	71.57	88.42	113.76	128.99	29.98	27.33	38.38	1684.52
40	0.91	73.39	87.16	113.94	130.10	30.33	27.10	38.00	1727.10
41	0.91	75.19	85.86	114.13	131.21	30.67	26.86	37.60	1769.63
42	0.91	76.96	84.54	114.33	132.31	31.01	26.61	37.20	1812.09
43	0.91	78.71	83.18	114.52	133.42	31.34	26.36	36.78	1854.47
44	0.91	80.43	81.80	114.72	134.52	31.67	26.11	36.35	1896.85
45	0.91	82.13	80.38	114.93	135.62	32.00	25.86	35.90	1939.28

$r_{elástico} = 43.01mm, e_2 = 42.52mm$

Referências

- [1] Charles C. Kemp, Paul Fitzpatrick, Hirohisa Hirukawa, Kazuhito Yokoi, Kensuke Harada, and Yoshio Matsumoto. *Handbook of Robotics*. Springer, 2008.
- [2] Renato Barbosa and Luís Rego. Estudos Funcionais de uma Plataforma para um Sistema Robótico Humanóide. Relatório final de projecto, Universidade Aveiro, Julho 2004.
- [3] Yu Ogura, Hiroyuki Aikawa, Kazushi Shimomura, Hideki Kondo, Akitoshi Morishima, Hun ok Lim, and Atsuo Takanishi. Development of a New Humanoid Robot WABIAN-2. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 76–81, Orlando, Florida, May 2006.
- [4] B. Wilcox, J. Yuh, G. Bekey, R. Ambrose, D. Lavery V. Kumar, A. Sanderson, and Y. Zheng. *Robotics: State of the Art and Future Challenges*. Imperial College Press, 2008.
- [5] Thomas L. Kurfess. *Robotics and Automation Handbook*. CRC Press, 2000.
- [6] Md. Akhtaruzzamen and A. A. Shafie. Evolution of Humanoid Robot and Contribution of Various Countries in Advancing the Research and Development of the Platform. In *International Conference on Control, Automation and Systems 2010*, Gyeonggi-do, Korea, October 27-30, 2010.
- [7] Jo Riley. *Chinese Theatre and the Actor in Performance*. Cambridge University Press, 1997.
- [8] Marco Ceccarelli. *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science: Their Contributions and Legacies*, volume 2. Springer, 1 edition, 2009.
- [9] Eric Möller. Public domain photos and images. Disponível em: <http://public-domain-images.blogspot.com/2010/06/robot-based-on-drawings-by-leonardo-da.html>. Último acesso: Abril 2011.
- [10] Edmond Droz. From jointed doll to talking robot. *New Scientist*, 14(282):37 – 40, April 1962.
- [11] Aepli Nadia. Jacques de Vaucanson. Disponível em: http://research.miralab.ch/automata/eighteenth/vaucanson_uk.htm. Último acesso: Abril 2011.
- [12] Gajitz. Like clockwork: Incredible 18th century swiss automatons. Disponível em: <http://gajitz.com/like-clockwork-incredible-18th-century-swiss-automatons/>. Último acesso: Abril 2011.

- [13] Lisa Nocks. *The Robot: The Life Story of a Technology*. Greenwood Press, 2007.
- [14] Jaeger. History of robotics. Disponível em: <http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~jaeger/visualMedia/robotHistory.html>. Último acesso: Abril 2011.
- [15] Museum of American Heritage. Robots! Disponível em: <http://www.moah.org/exhibits/archives/robots.html>. Último acesso: Abril 2011.
- [16] Atsuo Takanishi. In Memoriam: Professor Ichiro Kato. In *Autonomous Robots*, pages 7–10. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [17] Takanishi Laboratory. Biped humanoid robot. Disponível em: http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/wabian/previous_research/previous_research.htm. Último acesso: Abril 2011.
- [18] Honda. Technical guide: The world's most advanced humanoid robot. Disponível em: <http://www.asimo.com.au>.
- [19] National Aeronautics and Space Administration. Robonaut 2. Disponível em: http://www.nasa.gov/pdf/464887main_Robonaut2FactSheet.pdf.
- [20] Albert Albers, Sven Brudniok, Jens Ottnad, Cristian Sauter, and Korkiat Sedchaicharn. Upper Body of a new Humanoid Robot - the Design of Armar III. In *Humanoids 06 - 2006 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Genova, Italy, December 4-6, 2006.
- [21] Lawrence H. Mathers. *Clinical Anatomy Principles*. Elsevier Health Sciences, 1996.
- [22] Henry Gray and H.V. Carter. *Gray's Anatomy The Anatomical Basis of Clinical Practice*. Churchill Livingstone Elsevier, 40 edition, 2008.
- [23] Stephanie McCann and Eric Wise. *Anatomy Coloring Book*. Kaplan, 3 edition, 2008.
- [24] Adolf Faller, Michael Schünke, Gabriele Schünke, and Ethan Taub. *The Human Body: an introduction to structure and function*. Thieme, 2004.
- [25] Frederic P Miller, Agnes F Vandome, and John McBrewster. *Degrees of Freedom*. VDM Publishing House, 2010.
- [26] Richard C Dorf and Andrew Kusiak. *Handbook of design, manufacturing, and automation*. Wiley-IEEE, 1994.
- [27] F. A. Davis Company. Davis plus instructor and student online resource center. Disponível em: <http://www.davisplus.fadavis.com/tabers21/animations.cfm>. Último acesso: Março 2011.
- [28] Daniel J. Schneck and Joseph D. Bronzino. *Biomechanics: Principles and Applications*. CRC Press, 2003.
- [29] Frank H. Netter. *Atlas de Anatomía Humana*. Elsevier, 4 edition, 2010.
- [30] Sports Coach. Range of movement. Disponível em: <http://www.brianmac.co.uk/musrom.htm>. Último acesso: Março 2011.

- [31] Edward M. Winter. *Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines: the British Association of Sport and Exercise Sciences Guide*, volume I. Routledge, 2007.
- [32] Stephen T. Pheasant and Christine M. Haslegrave. *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*. Taylor and Francis, 2006.
- [33] A. Completo. *Biomecânica Básica*. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2009. Departamento Engenharia Mecânica, Universidade Aveiro.
- [34] Nuno Beça and Ângelo Cardoso. Desenvolvimento e Integração das Subestruturas Inferior e Superior para Locomoção de uma Plataforma Humanóide. Relatório final de projecto, Universidade Aveiro, 2005.
- [35] Milton Ruas da Silva. Desenvolvimento de Algoritmos de Controlo para Locomoção de um Robô Humanóide. Relatório final de projecto, Universidade Aveiro, Julho 2006.
- [36] Mauro Silva and Luís Gomes. Concepção e Desenvolvimento de Unidade de Percepção e Controlo para um Robô Humanóide. Relatório final de projecto, Universidade Aveiro, Julho 2005.
- [37] Rémi Sobreira Sabino. Estrutura Híbrida de Locomoção para um Robô Humanóide. Dissertação, Universidade Aveiro, Dezembro 2009.
- [38] Mauro André Moreira Rodrigues. Unidade de Processamento e Sistema de Visão para um Robô Humanóide. Dissertação, Universidade Aveiro, 2008.