



*Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade de Aveiro*

Estudos funcionais de uma plataforma para um sistema robótico humanóide

RELATÓRIO FINAL DE PROJECTO

Autores:

*Luís Rêgo -----n.º mec.: 20008
Renato Barbosa -----n.º mec.: 18382*

Orientadores:

*Professor Vítor Santos.
Professor Filipe Teixeira Dias.*

Aveiro, 26 de Julho de 2004

“Eppur’ si muove” – “E, contudo ela move-se”, Galileo Galilei

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado àqueles que deram a sua contribuição para que este projecto fosse realizado. A todos eles deixamos aqui o nosso agradecimento sincero.

Em primeiro lugar agradecemos ao Prof. Vítor Santos a forma como orientou o nosso trabalho. O seu apoio, as suas recomendações, e a cordialidade com que sempre nos recebeu.

Em segundo lugar agradecemos ao Prof. Filipe Silva, pela colaboração e material disponibilizado que tornaram possível levar as análises e simulações mais longe.

Gostaríamos ainda de agradecer ao Prof. Teixeira Dias pelos conselhos fornecidos relativamente a escolha de materiais e ainda ao Eng. António Ramos pela ajuda dada acerca da aplicabilidade de estudos de análise estrutural.

Deixamos também uma palavra de agradecimento ao Eng. Festas pela ajuda na construção e também pelo aconselhamento acerca dos métodos de fabrico mais indicados. Ao Prof. António Bastos pelo auxílio sobre colagens. Ao Prof. Balacó de Moraes pela contribuição nos dimensionamentos e opinião acerca dos mecanismos a usar. E ainda ao Eng. Camilo Christo pela sua constante simpatia e disponibilidade.

São também dignos de uma nota de apreço todos os colegas que nos acompanharam e ajudaram ao longo deste ano.

Finalmente, gostaríamos de deixar agradecimentos especiais às nossas famílias pelo apoio ao longo de todos estes anos.

RESUMO

Os robots humanóides correspondem a um dos maiores desenvolvimentos até agora conseguidos na área da robótica. O sistema humanóide representa o sonho inato do engenho humano para a criação artificial de um ser antropomórfico para o servir e ajudar.

Este projecto tem como principal objectivo a realização de estudos funcionais, e posterior desenvolvimento de uma plataforma robótica humanóide.

Neste documento introduz-se sucintamente o problema, e descrevem-se os modelos utilizados, as simulações efectuadas e a concepção das pernas do robot humanóide.

Aconselha-se a consulta de toda a documentação existente, para maior esclarecimento do que foi efectuado.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. LEVANTAMENTO DE ROBOTS EXISTENTES.....	13
2.1. CLASSE H-40.....	14
2.2. CLASSE H-80.....	20
2.3. CLASSE H-120.....	31
3. PROPOSTA CONCEPTUAL DA SOLUÇÃO.....	44
3.1. REGRAS DE PARTICIPAÇÃO DO ROBOCUP.....	44
3.2. DECISÕES TOMADAS.....	47
4. SIMULAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA.....	53
4.1. CINEMÁTICA DIRECTA DE UMA PERNA NO PLANO ZX.....	55
4.2. ANÁLISE ESTÁTICA DE UMA PERNA NO PLANO ZX.....	56
4.2.1. Restrição do Centro de Massa.....	58
4.2.2. Caso 1: Perna Apoiada no Solo.....	60
4.2.3. Caso 2: Perna Livre.....	62
4.3. CINEMÁTICA DIRECTA DE UMA PERNA NO PLANO ZY.....	63
4.3.1. Restrição do Centro de Massa.....	65
4.4. CINEMÁTICA DIRECTA DAS DUAS PERNAS, 10DOF.....	66
4.4.1. Metodologia de Denavit – Hartenberg.....	68
4.4.2. Parâmetros Cinemáticos para as Pernas com 10 DOF.....	69
4.4.3. Funções e Scripts para Cinemática Directa das Pernas.....	72
4.5. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS.....	74
4.5.1. Planeamento de Trajectórias nas Juntas.....	74
4.5.2. Planeamento nas Juntas com Pontos Intermédios de Passagem.....	75
4.6. BINÁRIOS ESTÁTICOS, 10 DOF.....	77
4.7. CINEMÁTICA DIRECTA DAS PERNAS COM 12 DOF.....	78
4.8. DINÂMICA INVERSA, 10DOF.....	82
4.8.1. Formulação Lagrangeana para Dinâmica das Pernas.....	83
4.8.2. Cálculo da Dinâmica, 10 DOF.....	86
4.9. DINÂMICA INVERSA DAS PERNAS COM 12DOF.....	89
4.9.1. Formulação de Newton – Euler.....	89
4.9.2. Cálculo e Simulação da Dinâmica, 12 DOF.....	91
4.9.3. Comportamento do COG e do COP.....	94
4.9.4. Análise dos Binários Dinâmicos.....	96
4.10. COMPARAÇÃO DOS BINÁRIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS.....	99
4.11. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO.....	101
4.11.1. Fases do Passo.....	103
4.11.2. Variação do Centro de Massa (CM).....	109
5. CONCEPÇÃO DAS PERNAS DO ROBOT.....	111
5.1. PÉ.....	112
5.2. ELOS.....	112
5.3. TORNOZELO.....	114
5.4. JOELHO.....	118
5.5. ANCA.....	121
5.6. LIGAÇÃO PERNA – ANCA.....	123
5.7. PERNAS MODELADAS.....	124
6. SELECÇÃO DOS MATERIAIS.....	126
6.1. TERMOPLÁSTICOS ESTRUTURAIS.....	126
6.2. PLÁSTICOS FLUORADOS.....	127
6.3. LIGAS DE ALUMÍNIO.....	128
6.4. ANÁLISE ESTRUTURAL DOS ELOS.....	128
6.4.1. Análise ao Elo como Peça Única.....	129

6.4.2.	<i>Análise ao Elo Assemblado</i>	130
6.5.	MATERIAIS UTILIZADOS.....	132
6.5.1.	<i>Elos e Pés</i>	133
6.5.2.	<i>Casquilhos</i>	134
6.5.3.	<i>Restantes Componentes</i>	135
7.	CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DAS PERNAS	136
7.1.	CONSTRUÇÃO E MONTAGEM VIRTUAL.....	136
7.1.1.	<i>Descrição dos Componentes</i>	136
7.1.2.	<i>Perspectiva Explodida</i>	147
7.2.	CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	149
7.2.1.	<i>Componentes Maquinados e Processos de Fabrico</i>	149
8.	CONCLUSÃO	159
9.	BIBLIOGRAFIA	161

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – ROBOT APELIKE.	15
FIGURA 2 – ROBOT BARUKII2 DA EQUIPA FOOT-PRINTS.	16
FIGURA 3– ROBOT ERATO.	17
FIGURA 4– ROBOT SILF-H2.	18
FIGURA 5 – ROBOT TAO-PIE-PIE.	19
FIGURA 6 – ROBOT HUMANÓIDE ELVIRA, CLASSE H-80.	20
FIGURA 7 – ROBOT ELVIS.	21
FIGURA 8 – ROBOT HOAP-2, FUJITSU.	22
FIGURA 9 – ROBOT ISSAC.	24
FIGURA 10 – PINO	25
FIGURA 11 – ROBOT HUMANÓIDE DA SONY, QRIO.	27
FIGURA 12 – ROBOT ROBO ERECTUS.	28
FIGURA 13 – ROBOT SDR-3X.	29
FIGURA 14 – ROBOT ASIMO, CONSTRUTOR HONDA.	31
FIGURA 15 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ROBOT ASIMO.	32
FIGURA 16 – VISTA E DIMENSÕES DA FRENTE E LATERAL DO ASIMO.	32
FIGURA 17 – EVOLUÇÃO DOS ROBOTS HUMANÓIDES DESENVOLVIDOS PELA HONDA.	33
FIGURA 18 – DO LADO ESQUERDO O MODELO EM SOLIDWORKS, E À DIREITA O ARNE – 02 REAL.	34
FIGURA 19 – FIRSTSTEP NA ABERTURA DO ROBOCUP2003.	35
FIGURA 20 – ROBOT HUMANÓIDE GUROO.	36
FIGURA 21 – ROBOT HRP–1S NA TAREFA DE ESCAVAÇÃO.	38
FIGURA 22 – ROBOT HUMANÓIDE HRP–2P.	38
FIGURA 23 – ROBOT HUMANÓIDE H6.	39
FIGURA 24 – BÍPEDE LUCY.	41
FIGURA 25 – HUMANÓIDE MURPHY.	42
FIGURA 26 – ROBOT WAVIAN-RIV.	43
FIGURA 27 – PROPORÇÕES DO CORPO DO ROBOT HUMANÓIDE PARA PARTICIPAÇÃO NO ROBOCUP.	46
FIGURA 28 - ESQUEMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS PESOS E COMPRIMENTOS NAS PERNAS DO ROBOT.	50
FIGURA 29 – PROTÓTIPO 2D	52
FIGURA 30 – PROTÓTIPO 3D.	52
FIGURA 31 – ESQUEMA DE UMA PERNA E DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS.	54
FIGURA 32 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DESINTERESSANTE.	58
FIGURA 33 – DIMENSÕES MÁXIMAS DO PÉ DO ROBOT EM MILÍMETROS.	59
FIGURA 34 – GRÁFICO 3D DO CENTRO DE MASSA.	59
FIGURA 35 – GRÁFICO DO X_{CM} EM FUNÇÃO DE $Q2L$ E $Q3L$, PARA $Q4L$ NA VERTICAL.	61
FIGURA 36 – ESQUEMA DAS PERNAS NO PLANO ZY.	64
FIGURA 37 – ÁREA DOS PÉS NO PLANO XY.	66
FIGURA 38 – REFERENCIAL GLOBAL E REFERENCIAIS ASSOCIADOS A CADA ELO PARA AS PERNAS COM 10 DOF.	67
FIGURA 39 – CADEIA CINEMÁTICA DAS PERNAS COM 10 DOF SEM TRONCO.	70
FIGURA 40 – CADEIA CINEMÁTICA QUE INCLUÍ UMA PERNA E O TRONCO.	71
FIGURA 41 – FLUXOGRAMA COM O FUNCIONAMENTO GERAL DO PROGRAMA DE CINEMÁTICA DIRECTA.	72
FIGURA 42 – CINEMÁTICA DIRECTA DAS PERNAS DO ROBOT POSIÇÃO INICIAL.	73
FIGURA 43 – CINEMÁTICA DIRECTA DAS PERNAS NUMA DADA CONFIGURAÇÃO FINAL DE JUNTAS.	73
FIGURA 44 – MÉTODO DE PLANEAMENTO NAS JUNTAS COM PONTOS INTERMÉDIOS DE PASSAGEM. [5].	76
FIGURA 45 – PROCESSO HEURÍSTICO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE JUNTA NOS VIA POINTS. [5].	76
FIGURA 46 – DEFINIÇÃO DA POSIÇÃO CARTESIANA FINAL DESEJADA, DADOS DA MATRIZ RESULTANTE DA FUNÇÃO MOVETO.	80
FIGURA 47 – POSIÇÃO DE PARTIDA DO ROBOT, O ROBOT PERCORRE O RECTÂNGULO AZUL ATÉ À OUTRA EXTREMIDADE, RECOMEÇANDO SEMPRE QUE O UTILIZADOR DESEJAR.	81
FIGURA 48 – DESCRIÇÃO DAS TRAJECTÓRIAS DO CENTRO DE MASSA GLOBAL E DO PÉ.	81
FIGURA 49 – VISTA LATERAL DAS PERNAS DO ROBOT, DURANTE A SIMULAÇÃO. COM OS SEGUINTE DADOS DE ENTRADA: $SL = 0,12$; $V_F = 0,1$; $HH = 0,39$, $FC = 0,03$ E $COPY = 0,0$.	82
FIGURA 50 – ELOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DAS PSEUDO INÉRCIAS.	87
FIGURA 51 – DIAGRAMA QUE DESCREVE O FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA EM MATLAB DESENVOLVIDO PARA OBTENÇÃO DOS BINÁRIOS DINÁMICOS EM FUNÇÃO DO TEMPO.	88
FIGURA 52 – POSIÇÃO INICIAL DAS PERNAS, PASSO INICIAL PARA POSICIONAMENTO DO ROBOT.	93

FIGURA 53 – FIM DO PASSO NORMAL, AMBOS OS PÉS EM CONTACTO COM O SOLO.	93
FIGURA 54 – PONTOS QUE REPRESENTAM O COG E O COP À ESQUERDA E TRAJECTÓRIAS EFECTUADAS À DIREITA.	94
FIGURA 55 – COMPORTAMENTO DO COG E DO COP PARA UMA VELOCIDADE DE PROGRESSÃO DE 1m/s.	95
FIGURA 56 – GRÁFICOS COM O COG E O COP EM FUNÇÃO DO TEMPO E POSIÇÃO DESTES NO PLANO XY.	96
FIGURA 57 – GRÁFICO DOS BINÁRIOS NA PERNA DE SUPORTE E NA PERNA LIVRE AO LONGO DO TEMPO.	97
FIGURA 58 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA AO LONGO DO TEMPO DA PERNA DE SUPORTE.	98
FIGURA 59 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA AO LONGO DO TEMPO DA PERNA DE AVANÇO PARA O PASSO NORMAL RESULTANTE DA SIMULAÇÃO DINÂMICA.	99
FIGURA 60 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DOS BINÁRIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS PARA O PASSO NORMAL.	100
FIGURA 61 – EXEMPLO DE ANDAR ESTÁTICO. [21].....	101
FIGURA 62 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DO ANDAR DINÂMICO. [21].....	102
FIGURA 63 – PASSO NORMAL VISTO NO PLANO ZX (SAGITAL). [26].....	104
FIGURA 64 – PASSO NORMAL VISTO NO PLANO ZY (FRONTAL). [26].....	104
FIGURA 65 – FASES DO PASSO E TIPOS DE PASSO PARA LOCOMOÇÃO ESTÁTICA.	105
FIGURA 66 – FASES DO PASSO INICIAL, IMAGENS OBTIDAS DA SIMULAÇÃO.	106
FIGURA 67 – ESQUEMA COM AS DIFERENTES FASES DO PASSO NORMAL.	107
FIGURA 68 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA PARA REALIZAÇÃO DO PASSO INICIAL. PERNA DE SUPORTE À ESQUERDA E PERNA DE APOIO À DIREITA.	108
FIGURA 69 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA PARA REALIZAÇÃO DO PASSO NORMAL. PERNA DE SUPORTE À ESQUERDA E PERNA DE APOIO À DIREITA.	109
FIGURA 70 – VARIAÇÃO DO CENTRO DE MASSA PARA O PASSO INICIAL.	110
FIGURA 71 – VARIAÇÃO DO CENTRO DE MASSA PARA O PASSO NORMAL.	110
FIGURA 72 – PLANTA DO PÉ, COM OS FUROS NECESSÁRIOS PARA FIXAÇÃO DE COMPONENTES.	112
FIGURA 73 – ELO DE LIGAÇÃO DAS JUNTAS Q2 E Q3, ELO Q2_Q3.	113
FIGURA 74 – ELO PARA LIGAÇÃO DA JUNTA Q3 A JUNTA Q4, ELO Q3_Q4.	113
FIGURA 75 – VARIAÇÃO DE COMPRIMENTOS ENTRE OS ELOS Q2_Q3 E Q3_Q4.	114
FIGURA 76 – TORNOZELO DO ROBOT HUMANÓIDE, DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES.	115
FIGURA 77 – DIMENSÕES DA CHAVETA DE CUNHA COM CABEÇA.	119
FIGURA 78 – JUNTA ROTACIONAL DA PERNA ESQUERDA, VISTA DE TRÁS.	120
FIGURA 79 – JUNTA ESFÉRICA INICIALMENTE CONCEBIDA, COM MOTORES NO EXTERIOR DA ESTRUTURA.	121
FIGURA 80 – JUNTA ESFÉRICA DA ANCA, VISTA DE FRENTE E LATERALMENTE.	123
FIGURA 81 – LIGAÇÃO DAS PERNAS ATRAVÉS DO PERFIL LIGAÇÃO_ANCA.	124
FIGURA 82 – PERNAS COMPLETAS E COM LIGAÇÃO DA ANCA, VISTA DE FRENTE.	125
FIGURA 83 – PERNAS DO ROBOT HUMANÓIDE, VISTA DE TRÁS.	125
FIGURA 84 – FORÇAS APLICADAS.	129
FIGURA 85 – RESULTADO DA ANÁLISE ESTRUTURAL DO ELO COMO ELEMENTO ÚNICO.	130
FIGURA 86 – RESULTADO DA ANÁLISE ESTRUTURA, ELO COM VEIOS DE LIGAÇÃO ASSEMBLADOS.	131
FIGURA 87 – VEIO MANDANTE E LIGAÇÃO ENTRE VEIOS.	132
FIGURA 88 – PERSPECTIVA EXPLODIDA ONDE PODEMOS VER OS COMPONENTES USADOS NO PÉ E NAS JUNTAS Q1 E Q2.	147
FIGURA 89 – PERSPECTIVA EXPLODIDA DA JUNTA Q3 E Q4 ONDE SE PODE VER O MODO DE ENCAIXE DOS COMPONENTES.	148
FIGURA 90 – PERSPECTIVA EXPLODIDA, VISTA DE FRENTE DA JUNTA ESFÉRICA EXISTENTE NA ANCA.	148
FIGURA 91 – PERSPECTIVA EXPLODIDA DA JUNTA ESFÉRICA, VISTA DE TRÁS.	149
FIGURA 92 – COMPONENTES NÃO MONTADOS, JUNTAS Q5, Q6 E LIGAÇÃO DAS PERNAS.	156
FIGURA 93 – PERNA APENAS COM OS COMPONENTES MANDADOS.	156
FIGURA 94 – PERNA COM ACTUAÇÃO NA JUNTA Q2 E Q3.	157
FIGURA 95 – JUNTA Q1 COM O MOTOR GERADOR DE MOVIMENTO.	158
FIGURA 96 – PERNA ESQUERDA E DIREITA NÃO COMPLETAMENTE MONTADAS.	159

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO ROBOT APELIKE.	14
TABELA 2 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT APELIKE.	15
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO ROBOT BARUKII2.	16
TABELA 4 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT BARUKII2.	16
TABELA 5 – PESO E ALTURA DO ROBOT ERATO.	17
TABELA 6 – PESO E ALTURA DO ROBOT SILF-H2.	18
TABELA 7 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT SILF-H2.	18
TABELA 8 – PESO E ALTURA DO ROBOT TAO-PIE-PIE.	19
TABELA 9 – ESPECIFICAÇÕES DO ROBOT ELVIRA.	20
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO ROBOT ELVIS.	21
TABELA 11 – PESO E ALTURA DO ROBOT HOAP-2.	22
TABELA 12 – GRAUS DE LIBERDADE HOAP-2.	22
TABELA 13 – COMPRIMENTOS DOS ELOS DO ROBOT HOAP-2.	23
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ROBOT HUMANÓIDE PINO.	25
TABELA 15 – CARACTERÍSTICAS DOS VÁRIOS ROBOTS DO GRUPO DE ROBOTS: ROBO-ERECTUS.	28
TABELA 16 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ROBOT HUMANÓIDE SDR-3X.	30
TABELA 17 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT ARNE – 02.	34
TABELA 18 – PESO E ALTURA DO ROBOT FIRSTSTEP.	35
TABELA 19 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT HUMANÓIDE FIRSTSTEP.	36
TABELA 20 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT GUROO.	37
TABELA 21 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT HRP-2P.	39
TABELA 22 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT HUMANÓIDE H6.	40
TABELA 23 – ESPECIFICAÇÕES DE PESO E ALTURA DO ROBOT MURPHY.	42
TABELA 24 – ESPECIFICAÇÕES DE PESO E ALTURA DO ROBOT WAVIAN-RIV.	43
TABELA 25 – GRAUS DE LIBERDADE DO ROBOT MURPHY.	43
TABELA 26 – DISTRIBUIÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADES NAS PERNAS DO ROBOT HUMANÓIDE.	47
TABELA 27 – ESPECIFICAÇÕES DE PESO E ALTURA DAS PERNAS DO ROBOT HUMANÓIDE PARA 1ª ANÁLISE.	48
TABELA 28 – ESPECIFICAÇÕES DE PESO E ALTURA DAS PERNAS DO ROBOT PARA 2ª ANÁLISE.	49
TABELA 29 – ESPECIFICAÇÕES DE PESO E ALTURA DAS PERNAS DO ROBOT HUMANÓIDE PARA 2ª ANÁLISE.	50
TABELA 30 – DIMENSÕES E MASSAS DAS DIVERSAS JUNTAS DAS PERNAS DO ROBOT.	51
TABELA 31 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA PARA UMA 1ª ANÁLISE.	53
TABELA 32 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA PARA UMA 2ª ANÁLISE.	53
TABELA 33 – BINÁRIOS NAS JUNTAS Q2, Q3 E Q4 PARA OS DADOS DA 1ª ANÁLISE.	57
TABELA 34 – BINÁRIOS NAS JUNTAS Q2, Q3 E Q4 PARA OS DADOS DA 2ª ANÁLISE.	57
TABELA 35 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA PARA A PERNA APOIADA NO SOLO.	60
TABELA 36 – BINÁRIO T2L EM FUNÇÃO DE Q2L E Q3L.	61
TABELA 37 – BINÁRIO T3L EM FUNÇÃO DE Q2L E Q3L.	62
TABELA 38 – BINÁRIO T4L PARA Q2L PARA Q3L.	62
TABELA 39 – BINÁRIOS MÁXIMOS DAS JUNTAS Q2, Q3 E Q4.	62
TABELA 40 – VARIAÇÃO DOS ÂNGULOS DE JUNTA PARA O CASO DA PERNA ESTAR LIVRE.	63
TABELA 41 – BINÁRIOS MÁXIMOS EXERCIDOS NAS JUNTAS Q4 E Q5, SEM RESTRIÇÕES.	65
TABELA 42 – PROCEDIMENTO PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE DENAVIT – HARTENBERG. [5].	68
TABELA 43 – PARÂMETROS CINEMÁTICOS PARA AS PERNAS DO ROBOT COM APENAS 10 DOF.	70
TABELA 44 – VARIAÇÃO DE ÂNGULOS POSSÍVEL PARA O ROBOT HUMANÓIDE DAR UM PASSO.	77
TABELA 45 – VARIAÇÃO DOS BINÁRIOS NAS JUNTAS PARA AS CONFIGURAÇÕES DE UM PASSO.	77
TABELA 46 – VARIAÇÃO DO BINÁRIO EXERCIDOS NAS JUNTAS PARA AS CONFIGURAÇÕES DE UM PASSO NA PERNA DE SUPORTE.	98
TABELA 47 – VARIAÇÃO DO BINÁRIO EXERCIDOS NAS JUNTAS PARA AS CONFIGURAÇÕES DE UM PASSO NA PERNA DE SUPORTE.	101
TABELA 48 – VARIAÇÃO DO BINÁRIO EXERCIDOS NAS JUNTAS PARA AS CONFIGURAÇÕES DE UM PASSO NA PERNA DE AVANÇO.	101
TABELA 49 – ÂNGULOS DE JUNTA UTILIZADOS PARA O PASSO INICIAL.	108
TABELA 50 – ÂNGULOS DE JUNTA UTILIZADOS PARA O PASSO NORMAL.	108
TABELA 51 – DIMENSIONAMENTO GERAL DAS ENGRENAGENS MANDANTES E MANDADAS UTILIZADAS NA JUNTA Q1.	116
TABELA 52 – DIMENSIONAMENTO DAS ENGRENAGENS A USAR NA JUNTA Q2 E NAS RESTANTES JUNTAS REFERIDAS MAIS À FRENTE.	117

<i>TABELA 53 – COMPONENTES UTILIZADOS NOS PÉS DO ROBOT.</i>	137
<i>TABELA 54 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q1.</i>	138
<i>TABELA 55 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q2.</i>	139
<i>TABELA 56 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DO ELO DE LIGAÇÃO DAS JUNTAS Q2 E Q3.</i>	140
<i>TABELA 57 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA GERAR MOVIMENTO NA JUNTA Q3.</i>	141
<i>TABELA 58 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DO ELO DE LIGAÇÃO DAS JUNTAS Q3 E Q4.</i>	142
<i>TABELA 59 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA GERAR MOVIMENTO NA JUNTA Q4.</i>	143
<i>TABELA 60 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q5.</i>	145
<i>TABELA 61 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q6.</i>	146
<i>TABELA 62 – COMPONENTES UTILIZADOS NOS PÉS DO ROBOT.</i>	150
<i>TABELA 63 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q1.</i>	150
<i>TABELA 64 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q2.</i>	152
<i>TABELA 65 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONCEPÇÃO DO ELO DE LIGAÇÃO DAS JUNTAS Q2 E Q3.</i>	152
<i>TABELA 66 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA GERAR MOVIMENTO NA JUNTA Q3.</i>	153
<i>TABELA 67 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA GERAR MOVIMENTO NA JUNTA Q4.</i>	154
<i>TABELA 68 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q5.</i>	154
<i>TABELA 69 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA CONCEPÇÃO DA JUNTA Q6.</i>	155

1. INTRODUÇÃO

Os robots humanóides correspondem a um dos maiores desenvolvimentos até agora conseguidos na área da robótica. O sistema humanóide representa o sonho inato do engenho humano para a criação artificial de um ser antropomórfico para o servir e ajudar. Para além disto, o robot humanóide mostra-se, em primeira aparência, como a única via de algum dia se desenvolver um sistema com a versatilidade e capacidade física que um ser humano possui. E quem sabe se num futuro mais ou menos próximo, os robots humanóides consigam comunicar e reagir espontaneamente ao convívio com os seres humanos. Diversos robots que cumprissem alguns destes objectivos foram até agora desenvolvidos por diversas companhias de renome internacional e algumas universidades espalhadas por todo o mundo.

As principais motivações para a realização de um empreendimento desta envergadura recaem sobre:

- Razões filosóficas e utópicas;
- Procura de desafios constantes de complexidade elevada, visto este ser dos primeiros projectos deste tipo a serem desenvolvidos em Portugal;
- Criação de uma conjuntura de inegável valor pedagógico para alunos de Engenharia, devido à elevada multidisciplinaridade do projecto;
- Participação futura em conferências e exposições de modo a levar a bom porto o nome do Departamento de Engenharia Mecânica e da Universidade de Aveiro;
- Futura participação num evento mundial ligado à robótica, que este ano decorreu em Portugal, Robocup2004, onde existe uma liga Humanóide e à qual o Departamento de Engenharia Mecânica tem estreitas ligações de carácter organizacional.

Visto este trabalho ser iniciado de raiz, é necessário inicialmente realizar um trabalho de pesquisa das soluções já existentes e bem divulgadas por quase todo o mundo no que respeita aos robots humanóides. Após esta etapa foram também adquiridos alguns conhecimentos relativos as ferramentas e instrumentos de trabalho a utilizar. As frentes subsequentes de ataque foram inúmeras mas, numa primeira fase, foram facilmente divididas em duas grandes categorias, às quais correspondem aos dois projectos apresentados em Outubro pelo orientador da disciplina. Um dos projectos diz respeito ao *hardware* activo, tal como actuadores, sensores e controladores, e outro diz

respeito ao *hardware* passivo, como estruturas físicas, materiais e variadas questões de simulação para escolha de componentes como é o caso dos motores. O *hardware* passivo corresponde ao projecto que foi levado a cabo por nós.

Dado que a modelação dinâmica da estrutura se era muito complexa e fora dos propósitos definidos, a abordagem será a de fazer modelos geométricos e cinemáticos (aflorando também alguns estudos da estática) e, com base neles, definir a estrutura física de suporte e ir construindo sucessivos módulos da plataforma (uma perna, duas pernas, duas pernas mais anca, etc.). A modelização dinâmica seria muito importante para conceber o controlo do sistema global, mas numa primeira fase isto foi deixado como indefinido, apenas ressaltando através de estudos da estática algumas questões limiar relativamente a potência energética e forças e momentos dos actuadores para as massas envolvidas.

Desta forma, poder-se-á especificar os principais objectivos propostos pelo orientador no início deste projecto:

- Levantamento do estado da arte;
- Elaboração de uma proposta conceptual de solução;
- Definição de modelos geométricos e cinemáticos para fazer a simulação;
- Concepção, construção e montagem progressiva da estrutura mecânica da plataforma;
- Elaboração de alguns padrões cinemáticos (combinações / sequências de juntas) para certos comportamentos ou acções.

Sendo que os principais componentes a ter em conta no desenvolvimento destes objectivos são:

- Implementação dos modelos geométricos:
 - Simulação em ambiente MatLab da cinemática directa geral da plataforma, definindo de forma genérica o modelo geométrico e cinemático para toda a plataforma para estudar o movimento das juntas.
 - Desenvolver e testar modelos cinemáticos parcelares (uma perna livre em relação ao solo, uma perna livre em relação à anca, etc.).
- Mapa de solicitações estáticas nas juntas para uma configuração genérica:
 - Modificar o modelo geométrico anterior acrescentando-lhe propriedades adicionais, como será o caso de massa, comprimentos, etc., de modo a permitir

estudos de estática do sistema e calcular momentos de inércia em relação a determinados eixos.

- Implementar software para determinação em contínuo da posição no espaço do centro de massa em função das variáveis de junta num referencial apropriado.
- Projecto, fabrico e montagem da estrutura mecânica:
 - Com base nos constrangimentos impostos pelos actuadores e controladores seleccionados, definir a estrutura mecânica e os acoplamentos necessários, incluindo os materiais a utilizar.
 - Concepção de uma perna e de todos os componentes passivos para a sua implementação experimental.
 - Concepção e desenvolvimento do sistema de pernas-anca, etc.
- Estudos de padrões de movimentação das juntas para acções específicas:
 - Movimentações simétricas mantendo o equilíbrio estático.
 - Padrões empíricos de marcha, etc..

Estes foram considerados os objectivos e plano de trabalho a cumprir para concretizar o projecto idealizado inicialmente. Para atingirmos estes objectivos sentiu-se a necessidade de consultar e estudar matérias de variadíssimas cadeiras que foram leccionadas no decorrer do curso, entre elas poder-se-á dar particular relevância a Robótica Industrial, Mecânica das Estruturas, Concepção e Fabrico Assistido por Computador, Órgãos de Máquinas I e II, Materiais de Construção Mecânica, Mecânica Aplicada I e II, Desenho Técnico e Desenho de Construção Mecânica.

No decorrer deste relatório serão descritas o mais pormenorizadamente possível as diferentes fases desenvolvidas para se poder chegar a uma solução considerada óptima para o projecto proposto.

2. LEVANTAMENTO DE ROBOTS EXISTENTES

Uma das principais preocupações aquando da realização deste projecto foi a de encontrar as soluções já existentes na área dos robots humanóides. Verificou-se que a informação fornecida pelos diferentes fabricantes e universidades envolvidas em projectos deste tipo era bastante limitada. De qualquer forma foi realizado um levantamento que nos permite saber algumas características dos robots já existentes,

para desta forma, começarmos a definir aspectos essenciais do robot humanóide a desenvolver, entre estes aspectos poderemos salientar o número de graus de liberdade, altura, peso, motores, etc..

De seguida poderemos ver alguns dos diferentes robots existentes, bem como algumas das suas características. A pesquisa realizada encontra-se dividida por classes, que correspondem a três tipos de dimensões dos robots: H-40, H80 e H-120. Estas classes utilizadas para compartimentar a pesquisa efectuada são baseadas nas classes de participação no campeonato de robótica, Robocup (ver Capítulo 3). Poderão ser encontrados muitos mais robots humanóides, mas a pesquisa aqui apresentada recai sobre aqueles que tinham mais informação associada disponível.

2.1. CLASSE H-40

APELIKE

Este robot foi desenvolvido pela AIST, MITI, University of Tokyo, no Japão. É um robot bastante pequeno, tendo apenas 400mm de altura e pesando 2,3kg. Este robot tem 16 graus de liberdade distribuídos como indicado na tabela a seguir.

- Endereços: <http://home4.highway.ne.jp/nagasaka/ape.htm>
- Constructor: AIST, MITI, University of Tokyo, Japão
- Especificações:

Tabela 1 – Características principais do robot Apelike.

Peso (kg)	2,3
Altura (mm)	400
Actuadores	R/C Servo
Unidade de Controlo	Wireless Modem
Fornecimento	Baterias, Wire

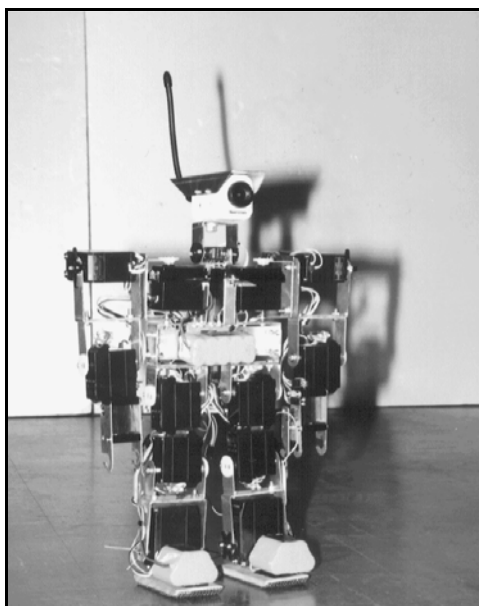


Figura 1 – Robot Apelike.

Tabela 2 – Graus de Liberdade do robot Apelike.

Graus de Liberdade	
Cabeça	2
Braços	4 (2x)
Pernas	2 (2x)
Pés	1 (2x)

BARUKII2

A equipa *Foot-Prints* desenvolveu um robot humanóide completamente autónomo, que tem como principal objectivo jogar futebol robótico no Robocup2004. De referir que, no Robocup2003 este robot jogou uma parte significativa de futebol robótico.

- Endereço: <http://homepage3.nifty.com/Chocopa/fp/>
- Construtor: Foot-Prints.

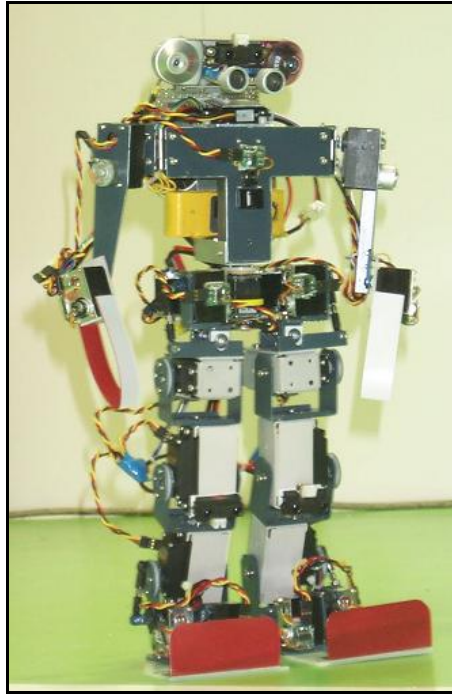


Figura 2 – Robot Barukii2 da equipa Foot-Prints.

- Especificações:

Tabela 3 – Características principais do robot Barukii2.

Peso (kg)	1,8
Altura (mm)	400
Actuadores	22 Motores
Sensores	3 Acelerómetros, 1 sensor geomagnético, 3 sensores de infravermelho e um sensor de ultra-som.

Tabela 4 – Graus de Liberdade do robot Barukii2.

Graus de Liberdade	
Cabeça	2
Braços	2 (2x)
Tronco	2 (2x)
Pernas	6 (2x)
Pés	1 (2x)

Nota: Ver ficheiro **004_Foot-Prints_Humanoid.pdf**, nome do artigo: “*Team Foot-Prints*” e vídeos do Robocup 2003.

ERATO

Em 1981 a JST começou uma inovadora pesquisa chamada “Pesquisa Exploradora para tecnologia avançada” que do inglês deu origem a sigla ERATO. Esta pesquisa foi efectuada para promover a criação de ciência e de tecnologias avançadas, dando origem após anos de pesquisa ao que em 2002 seria conhecido como o robot humanóide ERATO.

- Endereço: <http://www.symbio.jst.go.jp/>
- Construtor: ERATO Kitano Symbiotic Systems Project

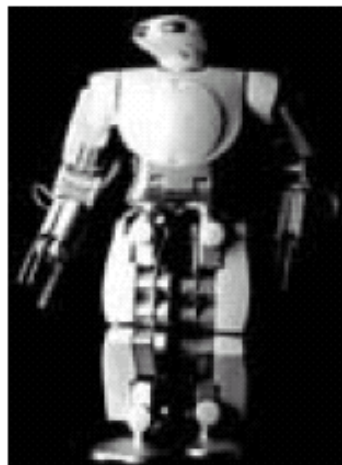


Figura 3– Robot ERATO.

- Especificações:

Tabela 5 – Peso e altura do robot ERATO.

Peso (kg)	2,4
Altura (mm)	380

Nota: Ver ficheiro **002_ERATO_Kitano_Project_Humanoid.pdf**, nome do artigo: “*ERATO Kitano Project*”.

SILF-H2

- Endereço: <http://www02.so-net.ne.jp/~itou/Silf-H2.html> (em japonês)
- Construtor: Katsuhisa Ito



Figura 4– Robot Silf-H2.

- Especificações: Apesar do site se encontrar em japonês existem alguns dados que se conseguem perceber visto estarem em inglês. Assim sendo faz-se uma pequena descrição de parâmetros do robot humanóide.

Tabela 6 – Peso e Altura do robot Silf-H2

Peso (kg)	7,3
Altura (mm)	248

Tabela 7 – Graus de Liberdade do robot Silf-H2

Graus de Liberdade	
Pescoço	2
Braços	6 (2x)
Mãos	1 (2x)
Cintura	1
Pernas	6 (2x)

TAO-PIE-PIE

Este robot é um dos mais pequenos humanóides existentes, mede apenas 280mm, utiliza 6 servomotores e a sua programação continua a ser desenvolvida.

- Endereço: <http://avocet.cs.umanitoba.ca/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=8>
- Constructor: University of Auckland

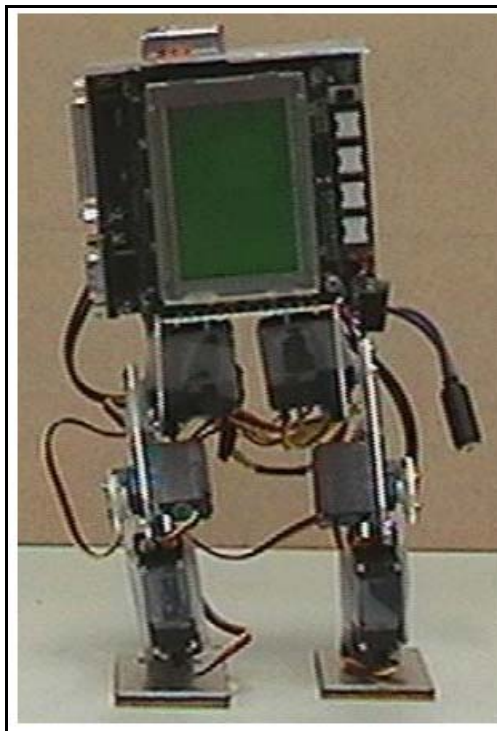


Figura 5 – Robot Tao-pie-pie.

- Especificações:

Tabela 8 – Peso e altura do robot Tao-pie-pie.

Peso (kg)	2
Altura (mm)	280

Nota: Ver ficheiro **012_Tao-Pie-Pie_Humanoid.pdf** e vídeos Robocup 2003.

2.2. CLASSE H-80

ELVIRA

O projecto Elvira é um dos projectos dominantes da Universidade de Halmstad. O principal objectivo deste projecto é desenvolver um robot humanóide capaz de equilibrar-se e de andar autonomamente. Este robot continua a ser desenvolvido tendo já 16 graus de liberdade sem ainda ter braços e cabeça.

Muito haveria para dizer acerca deste projecto relativamente à parte mecânica. É de salientar a utilização de transmissões por rodas dentadas feitas a partir de poliamidas e utilizando uma relação de transmissão de 3:1. Os motores utilizados são servomotores da Hitec HS805BB+, que tem um torque de 19,8kg.cm à 4.8volt.

- Endereço: <http://www.hh.se/stud/pt00elpr/>
- Construtor: Halmstad University.

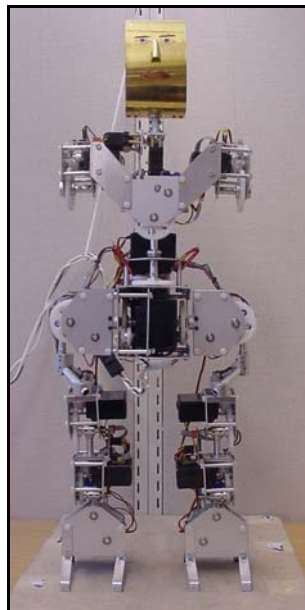


Figura 6 – Robot humanóide Elvira, classe H-80.

- Especificações:

Tabela 9 – Especificações do robot Elvira.

Peso (kg)	5,0
Altura (mm)	800

ELVIS

O primeiro protótipo foi assemblado no verão de 1998 e os projectos iniciais incluíram a evolução do equilíbrio e experiências extensivas no campo da visão e audição. Elvis deu os seus primeiros passos em Julho de 1998. Em Agosto de 1999 o robot foi equipado com uma nova cabeça, torso e pés novos. Deu o seu primeiro passo autonomamente em Abril de 2000 e participou na Expo 2000 em Hannover, na Alemanha.

- Endereços: <http://humanoid.fy.chalmers.se/>
- Constructor: Chalmers University of Thecnology, Sweden.

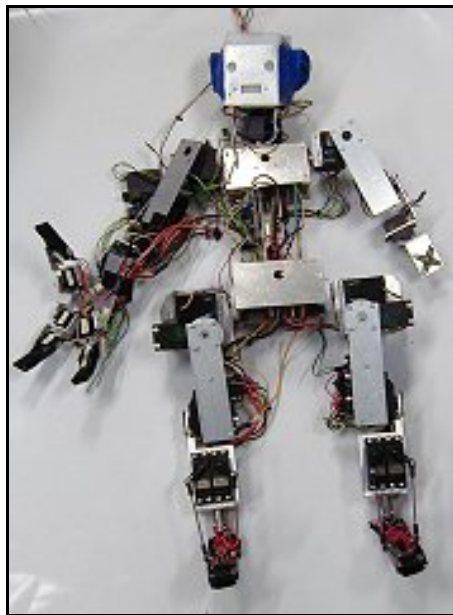


Figura 7 – Robot Elvis.

- Especificações:

Tabela 10 – Características principais do robot Elvis.

Altura (mm)	600
Actuadores	42 Servos
Guiado	Microfones, Câmaras e Sensores de Força.
Unidade de Controlo	Sete Micro – controladores.

Nota: Ver ficheiro *elvis.pdf*, nome do artigo: *An Evolutionary Architecture for a Humanoid Robot*.

HOAP-2

Este robot tem associado um robot mais pequeno designado por Hoap-1, este robot já é comercializado e é facilmente ligado a um computador através de um cabo USB. Assim pode-se utilizar este robot como uma ferramenta no estudo dos robots humanóides no que diz respeito ao controlo dos movimentos e na comunicação com humanos.

- Endereço: <http://www.automation.fujitsu.com/en/products/products09.html>
- Construtor: Fujitsu

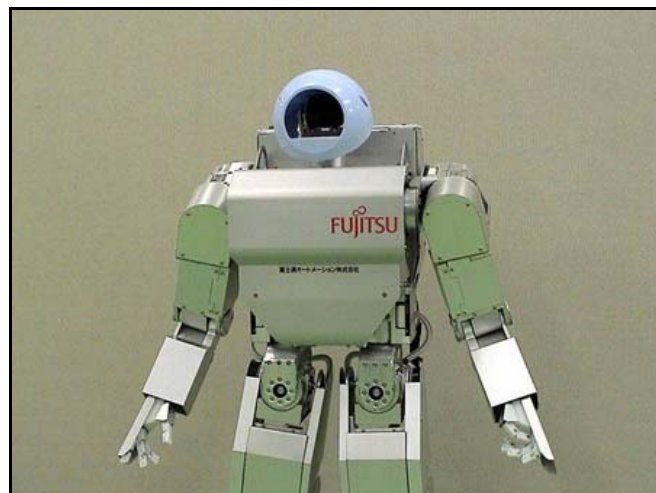


Figura 8 – Robot Hoap-2, Fujitsu.

- Especificações: Este robot tem um total de 25 graus de liberdade.

Tabela 11 – Peso e Altura do robot Hoap-2

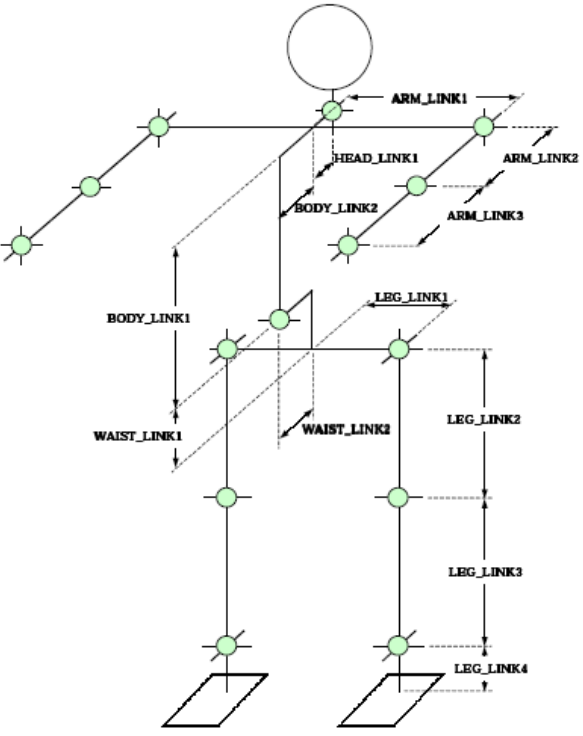
Peso (kg)	7
Altura (mm)	500

Tabela 12 – Graus de liberdade Hoap-2.

Graus de Liberdade	
Pescoço	2
Braços	4 (2x)
Mãos	1 (2x)
Cintura	1
Pernas	6 (2x)

Tabela 13 – Comprimentos dos elos do robot Hoap-2.

Comprimentos dos Elos	
ARM_LINK1	0.100m
ARM_LINK2	0.101m
ARM_LINK3	0.146m
LEG_LINK1	0.039m
LEG_LINK2	0.100m
LEG_LINK3	0.100m
LEG_LINK4	0.037m
BODY_LINK1	0.090m
BODY_LINK2	0.0315m
HEAD_LINK1	0.0025m
WAIST_LINK1	0.055m
WAIST_LINK2	0.034m



Nota: Ver ficheiro **hoap2designspec.pdf**. e **011_Senchans_Humanoid.pdf** (Esta equipa da universidade de Osaka usa a plataforma da Fujitsu).

ISAAC

A equipa Isaac é composta por um grupo de estudantes que desenvolveu um robot humanóide para participar em vários campeonatos, e exposições, em Itália e no resto do mundo. Um dos principais objectivos deste projecto é o de possuir uma plataforma que será utilizada no estudo do movimento humano.

- Endereço: <http://www.isaacrobot.org/>
- Construtor: Politécnico di Torino

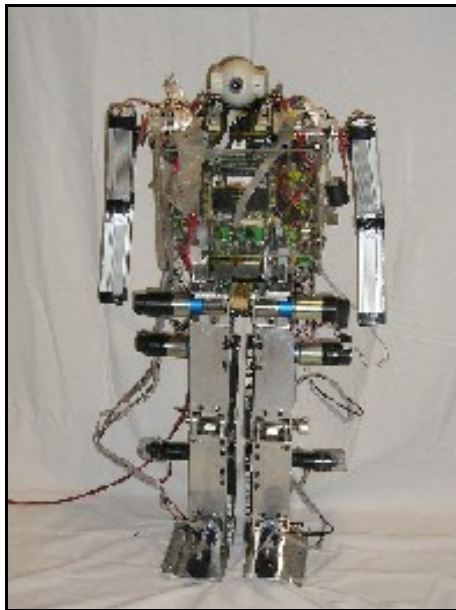


Figura 9 – Robot Issac.

- Especificações:

O robot Isaac tem 85cm de altura e pesa cerca de 15kg. Tem 6 graus de liberdade em cada perna, o pescoço movimenta-se com dois graus de liberdade, para poder rodar a câmara, os braços têm apenas um grau de liberdade.

Nota: Ver ficheiro **008_Isaac_Humanoid.pdf** e vídeos Robocup 2003.

PINO

- Endereço: <http://www.symbio.jst.go.jp/PINO/index.html>
- Construtor: ERATO Kitano Symbiotic Systems Project

Este projecto pretende que qualquer pessoa possa construir um robot em sua casa com componentes baratos e acessíveis. Para isso é disponibilizada toda a informação técnica necessária a sua construção no site. É por isto, este o robot do qual foi obtida maior informação, mas o peso deste robot deixa algumas dúvidas pois se somarmos o peso dos motores, o peso total estará muito próximo do valor referido no site. Outro

parâmetro que será importante referir, é que este robot nunca andou segundo informação encontrada na Internet.

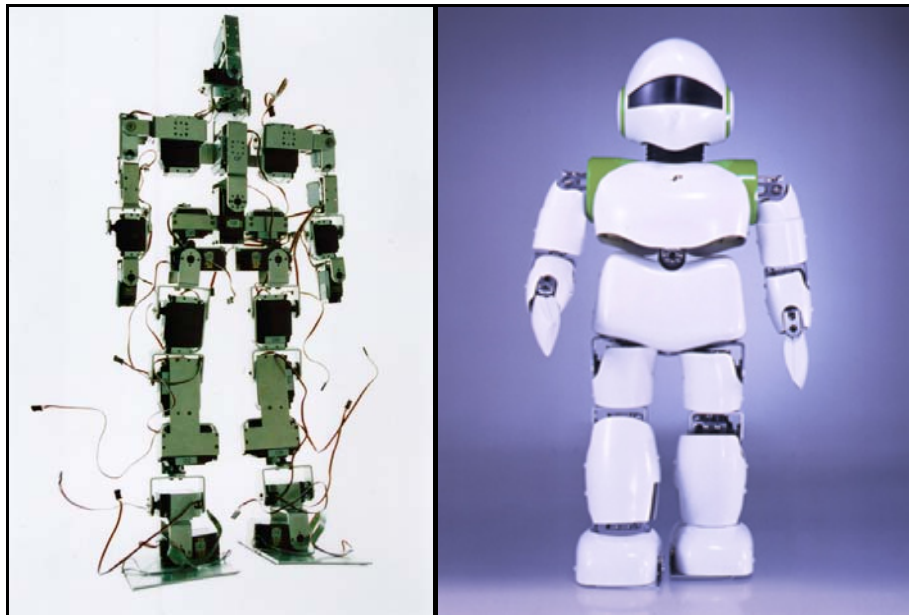


Figura 10 – PINO

- Especificações:

Tabela 14 – Características gerais do robot humanóide PINO.

Dimensão	Altura	700mm
	Distância entre Ombros	320mm
	Largura da Anca	200mm
	Comprimento da Perna	300mm
Peso	4.5kg	
Graus de Liberdade 26DOFs	Pescoço	2DOFs
	Tronco	2DOFs
	Braços	5DOFs em cada
	Pernas	6DOFs em cada
Actuadores	Servo module(Torque 20 kg.cm) Futaba S5301 14	

	Servo module(Torque 9 kg.cm) Futaba S9402	12
Sensor	Vision sensor(CMOS sensor)	1
	Force sensor(FSR)	8
	Joint angle sensor(Potentiometer)	26
Computador Principal	PC(Pentium III 733MHz) Memory 512MB	
Sistema Operativo	RedHat Linux6.2 Kernel 2.2.14-5.0. RT-Linux2.2	
Ferramenta Desenvolvida	ALTERA Max+PLUS II BASELINE YCSH	
Controlador	SH2(HD64F7050 20MHz) CPLD(EPF10K30ARC240-3)	
AD board	Contec AD12-64(PCI)	
Frame grabber	I/O DATA GV-VCP2/PCI	
Cabo	Small Gauge Coaxical Cable & CoaxcalCable x 50Power(7A)	
Fonte de Energia	EWS300-6 Input: AC100-120V 8A, AC200-240V 4A 50/60Hz, 410WATTS Output: DC6V 50A	
Exterior	Leaser beam lithography(30 parts)	
Material da Estrutura	Duraluminio e ABS regin	

Nota: Ver ficheiro **robocup2000_yamasaki.pdf** e **humanoids2000_yamasaki.pdf**.

QRIO

O robot QRIO foi desenvolvido pela Sony, e é considerado um robot verdadeiramente inovador. Este robot contém três processadores de 64bit, com 192Mb DRAM, 38 motores, aproximadamente 80 sensores, duas câmaras de 110000 pixel CCD de cor, sete microfones, um altifalante e 5 LED's. Actualmente, o preço deste robot está ao nível de um carro luxuoso.

- Endereço: <http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/top.html>
- Construtor: Sony



Figura 11 – Robot humanóide da Sony, QRIO.

- Especificações: Não existe informação disponível no site da Sony, mas após alguma pesquisa efectuada encontramos a informação referida acima. Visto o robot ter 38 motores acreditamos que tenha aproximadamente 38 graus de liberdade, não podendo especificar-se a distribuição destes.

Uma nova versão deste robot foi desenvolvida e apresentada este ano, onde este robot mostra uma grande mobilidade ao acompanhar uma música e ao ser o primeiro robot que consegue “saltar” ou manter-se no ar por alguns segundos.

Nota: Ver vídeos Robocup 2003 e outros vídeos na pasta do QRIO fornecida para verificar a mobilidade e capacidades do robot.

ROBO – ERECTUS

Para conseguir ter diferentes comportamentos a equipa que produziu o Robô-Erectus, teve o cuidado de desenvolver vários tipos de robots humanóides. Para

produzir os vários comportamentos é necessário diferentes tipos de sensores, por exemplo, sensores de visão para reconhecimento de objectos, sensores de equilíbrio, e sensores de força ou contacto para saber se o robot está a cair ou está a tocar noutro robot.

- Endereço: <http://www.robo-erectus.org/>
- Constructor: ARICC (Advanced Robotics and Intelligent Control Centre) in the School of Electrical and Electronic Engineering, Singapore Polytechnics.

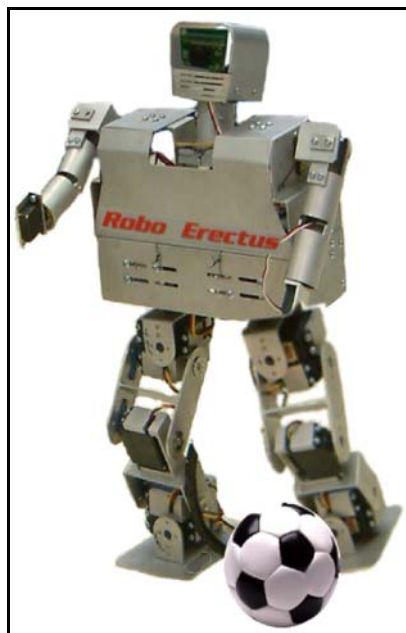


Figura 12 – Robot Robo Erectus.

- Especificações: Como foi referido existem algumas diferenças entre os diferentes robots humanóides desenvolvidos por esta equipa, assim sendo, utilizamos a tabela a seguir para explicitar as principais diferenças.

Tabela 15 – Características dos vários robots do grupo de robots: Robo-Erectus.

	RE40I	RE40II	RE50II	RE80II
Altura	400 mm	400 mm	500 mm	800 mm
Peso	2,5 kg	4,0 kg	5,0 kg	7,0 kg
N.º de Graus de Liberdade	10	22	22	22

Distribuição dos Graus de Liberdade	Pernas – 5 x 2	Pescoço – 2 Braços – 4 x 2 Pernas – 6 x 2	Pescoço – 2 Braços – 4 x 2 Pernas – 6 x 2	Pescoço – 2 Braços – 4 x 2 Pernas – 6 x 2
Sensores	Acelerómetros, Sensores de Força, Giroscópios, Sensores de Alcance, etc..			
Visão	Câmara Estéreo			
Controlador	Modo Multi-controlo: PC, Micro controlador, PDA, <i>Wireless</i>			
Potência	Baterias de NiMH			

Nota: Ver ficheiro **010_Robo-Erectus_Humanoid.pdf** (Robo-Erectus: A Soccer-Playing Humanoid Robot) e vídeos Robocup 2003.

SDR-3X

A Sony desenvolveu um robot conhecido como o robot parceiro. Trata-se de um robot humanoíde com 24 graus de liberdade com as capacidades de andar e “dançar”. O robot tem uma altura de 500mm e uma relação transversal de 220 × 140mm. Tem um peso de 5kg e uma velocidade de andar de 15m/min. Possui a capacidade de comunicar e um sistema monocular de visão capaz de reconhecer movimento.

- Endereço: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200011/00-057E2/>
- Construtor: Sony

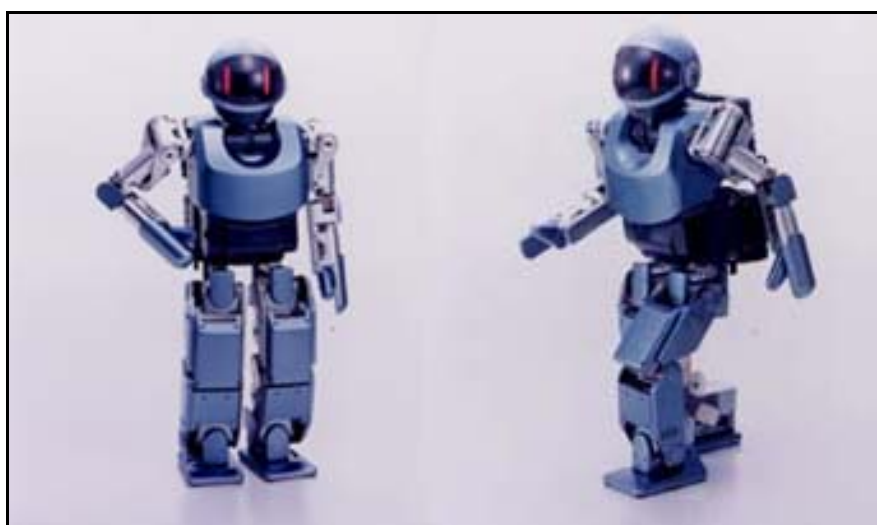


Figura 13 – Robot SDR-3X

- Especificações:

Tabela 16 – Características gerais do robot humanóide SDR-3X.

CPU	64 Bit RISC Processor (x2)	
Internal Memory	32MB DRAM (x2)	
Operating System	Aperios (Sony's original real time OS)	
Robot Control Architecture	OPEN-R	
Program Storage Media	16MB Memory Stick (x2)	
Joints/Degrees of Freedom	Head:2 degrees of freedom Body:2 degrees of freedom Arms:4 degrees of freedom (x2) Legs:6 degrees of freedom (x2) (Total of 24 degrees of freedom)	
Internal Sensors	Visual Input	180,000 1/5 inch CCD Color Camera
	Voice Input	Microphone (x2)
	Distance Detection	Infrared Distance Sensor
	Acceleration Detection	Dual axis accelerometer
	Angular Rate Detection	Dual axis angular rate sensor
	Touch Detection	Contact Sensor (x8)
Voice Output	Speaker	
Input/Output	PC Card Slot (Type II) Memory Stick Slot (x2)	
Walking Speed	Approx. 15m per minute	
Mass	Approx. 5.0 kg (with battery & memory stick included)	
Dimensions (height x width x depth)	Approx. 500 x 220 x 140 mm	

2.3. CLASSE H-120

ASIMO

Durante mais de 10 anos, a Honda pesquisou e trabalhou na área dos robots humanóides com o desafio de desenvolver um novo nível de mobilidade. Este projecto foi mostrado ao público em 2000, tendo a Honda como objectivo final a comercialização deste robot.

- Endereços: <http://world.honda.com/ASIMO/>
- Vídeos: <http://world.honda.com/ASIMO/movies/index.html>
<http://world.honda.com/robot/movies/>



Figura 14 – Robot ASIMO, construtor HONDA.

- Especificações:

Specifications		
Weight	52kg	
Walking Speed	0-1.6km/h	
Walking Cycle	Cycle Adjustable, Stride Adjustable	
Grasping Force	0.5kg/hand(5-finger hand)	
Actuator	Servomotor+Harmonic Speed Reducer +Drive Unit	
Control Unit	Walk/Operating Control Unit, Wireless Transmission Unit	
Sensors	Foot	6-Axis Foot Area Sensor
	Torso	Gyroscope & Acceleration Sensor
Power Section	38.4V/10AH(Ni-MH)	
Operating Section	Workstation and portable Controller	
Degrees of Freedom (For Human Joints)		
Head	Neck Joint(U/D,RT)*1	2DOF
Arm	Shoulder Joint(F/B,U/D,RT)	3DOF
	Elbow joint(F/B)	1DOF
	Wrist joint(RT)	1DOF
		5DOF X 2arms=10DOF
Hand	5fingers(Grasping)	1DOF
		1DOF X 2hands=2DOF
Leg	Hip joint(F/B,L/R,RT)	3DOF
	Knee joint:(F/B)	1DOF
	Ankle joint:(F/B,L/R)	2DOF
		6DOF X 2legs=12DOF
*1 F/B : Forward/Backward U/D : Up/Down L/R : Left/Right RT * Rotation DOF: Degrees of Freedom		

Figura 15 – Especificações técnicas do robot ASIMO.

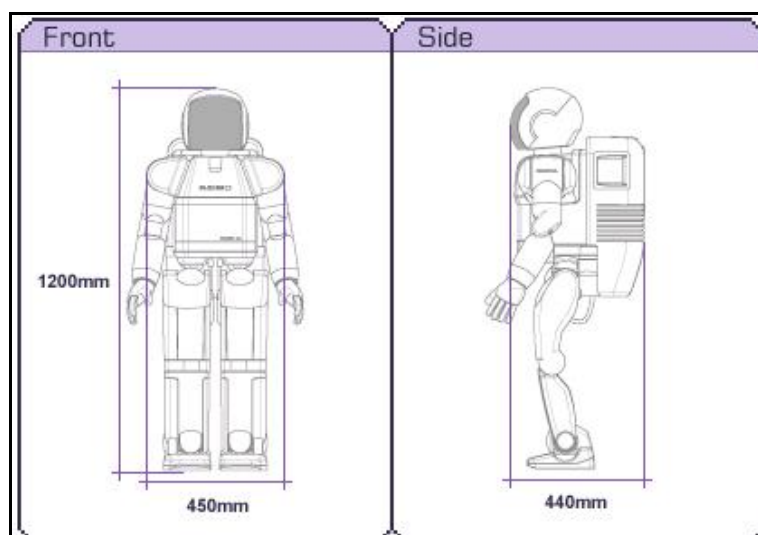


Figura 16 – Vista e dimensões da frente e lateral do ASIMO.

Das especificações apresentadas podemos salientar, o facto deste robot ter 26 graus de liberdade (12DOF nas pernas), o que lhe confere grande mobilidade. Por sua vez, é

importante notar que o robot tem 1200mm de altura e 52kg de peso, o que se pode considerar um peso considerável apesar da altura. Os actuadores utilizados foram fabricados pela própria Honda.

- Antecessores do Asimo:

O primeiro bípede humanóide fabricado pela Honda representa o fruto do esforço dos engenheiros em criar uma forma inovadora de mobilidade que traz um novo valor para a humanidade em perfeita coexistência e harmonia. De facto, o sonho do homem dá o primeiro passo firme em direcção ao futuro ao mesmo tempo que o robot avança, para chegarem a um robot cientificamente bastante desenvolvido como é o caso do ASIMO.

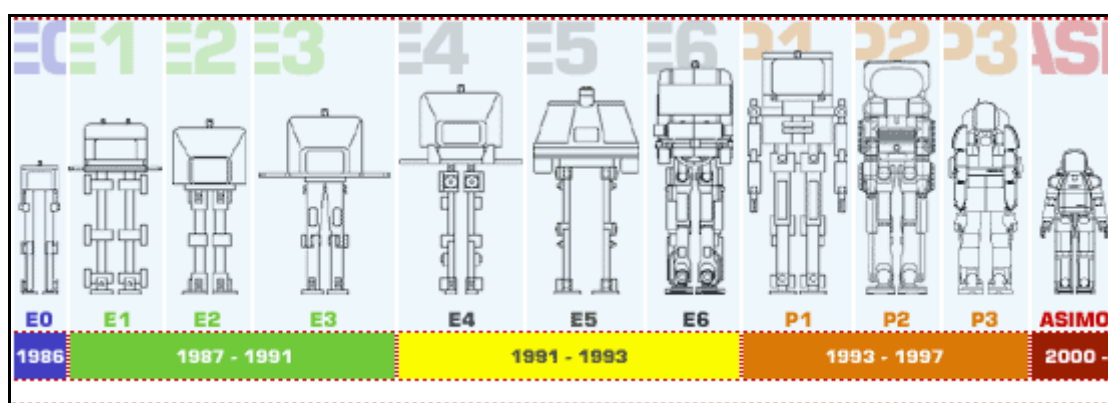


Figura 17 – Evolução dos robots humanóides desenvolvidos pela Honda.

ARNE

O robot humanóide ARNE-02 é um projecto que teve início em 2001, o nome ARNE vêm do inglês, de “Robot Antropométrico da Nova Era”. Foram necessários dois anos de pesquisa utilizando modelos de simulação e o protótipo ARNE – 01, para chegar-se ao resultado final que seria o ARNE – 02.

O robot é feito maioritariamente de poliamidas e alumínio. Os motores utilizados foram desenvolvidos pela própria companhia.

- Endereço: <http://www.hotbox.ru/start.php>
- Constructor: NE Company, St. Petersburg, Russia

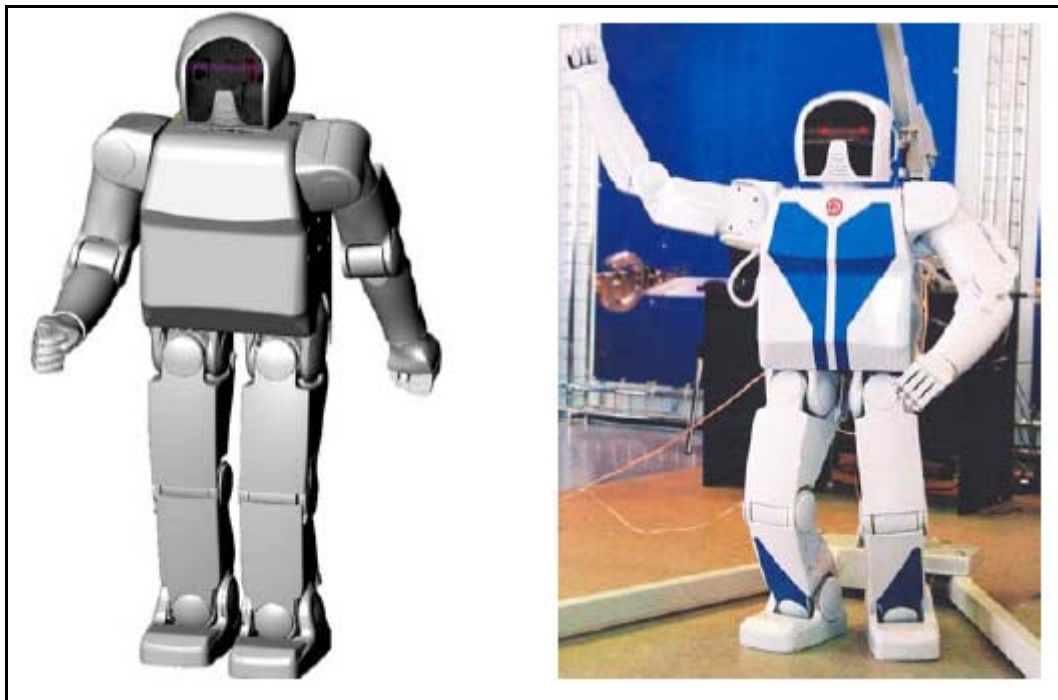


Figura 18 – Do lado esquerdo o modelo em SolidWorks, e à direita o ARNE – 02 real.

- Especificações:

O robot humanóide ARNE-02 é um robot com 1230 mm de altura e com aproximadamente 54kg de peso. Tem no total 28 graus de liberdade.

Tabela 17 – Graus de liberdade do robot ARNE – 02.

Graus de Liberdade	
Cabeça	2
Braços	5 (2x)
Mãos	2 (2x)
Pernas	6 (2x)

Nota: Ver ficheiro **arne_desc.pdf**, nome do artigo: *Team Description ARNE*.

FIRSTSTEP

O robot Firststep tem como base uma versão do protótipo ASIMO fabricado pela Honda.

- Endereço: <http://www.hondacollege.ac.jp/> (em japonês)
- Constructor: Honda International Technical School (HITS)

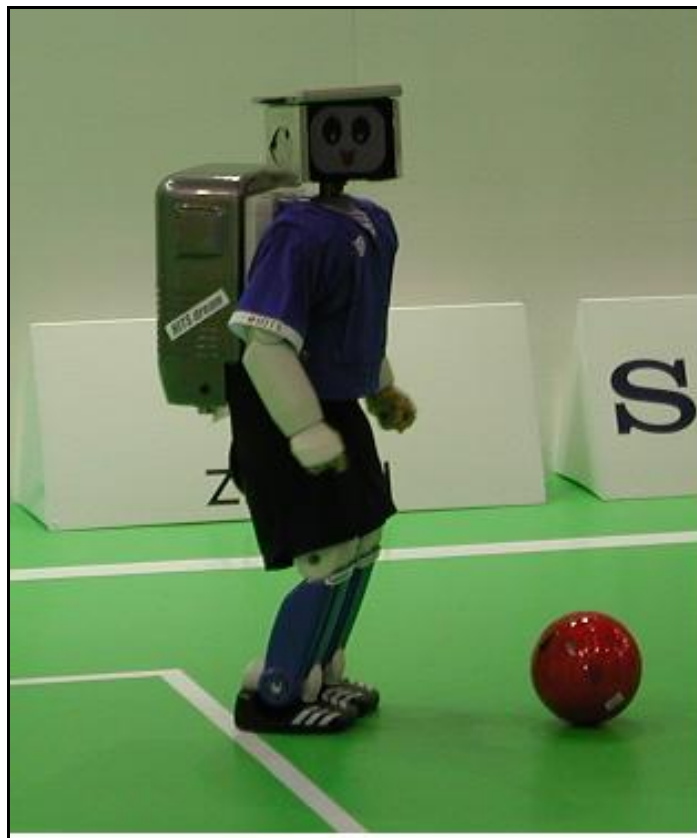


Figura 19 – Firststep na abertura do Robocup2003.

- Especificações:

Este robot é alimentado a 38V/10AH baterias de Ni-NH e precisa de 100V AC/15 para carregar as baterias. O robot pode andar a uma velocidade máxima aproximada de 1.5km/h. O actuador é um servomotor, com redutor harmónico de velocidade, e a sua cara é feita através de um monitor de computador que indica o que ele pensa através de expressões. Esta é a grande diferença do ASIMO na sua aparência. Actualmente, este robot consegue chutar uma bola enquanto caminha.

Tabela 18 – Peso e altura do robot FIRSTEP.

Peso (kg)	50
Altura (mm)	1250

Tabela 19 – Graus de liberdade do robot humanóide Firststep.

Graus de Liberdade	
Cabeça	2
Braços	6 (2x)
Pernas	6 (2x)

Nota: Ver ficheiro **007_HITSdream_Humanoid.pdf**, nome do artigo: “*Description of HITS dream Team "Firststep" by Honda International Technical School (HITS)*” e vídeos Robocup 2003.

GuRoo

O robot humanóide GuRoo foi desenvolvido na Universidade de Queensland, tendo sido utilizado para pesquisa em diferentes áreas das quais se destacam: estudos de estabilidade dinâmica, interação robot – humanos, e máquina que consegue aprender.

- Endereço: <http://www.itee.uq.edu.au/~damien/GuRoo/>
- Constructor: University of Queensland, Brisbane, Australia



Figura 20 – Robot Humanóide GuRoo.

- Especificações: O GuRoo é um robot autónomo, com 23 graus de liberdade, 1200mm de altura e 38kg de peso.

Tabela 20 – Graus de liberdade do robot GuRoo.

Localização	No. of DOF	Descrição
Cabeça	2	Pitch + Yaw
Ombro	2 (2 x)	Pitch + Roll
Cotovelo	1 (2 x)	Pitch
Pulso	3	Pitch + Roll + Yaw
Anca	3 (2 x)	Pitch + Roll + Yaw
Joelho	1 (2 x)	Pitch
Tornozelo	2 (2 x)	Roll + Pitch

Nota: Ver ficheiro **005_GuRoo_Humanoid.pdf**.

HRP-2P

A evolução da robótica tem sido extraordinária nos últimos tempos. Na área da robótica humanóide, na perspectiva de construir robots de aspecto humano, que possam substituir o homem em tarefas árduas e repetitivas. Um dos desenvolvimentos espectaculares é o do projecto HRP (*Humanoid Robotics Project*) do instituto japonês *AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Thecnology)* com o seu robot HRP-1S. Esse robot é capaz de muitas tarefas humanas de forma autónoma, mas também foi o primeiro a ser usado em tarefas no exterior em terreno aberto. A experiência realizada utilizou uma escavadora Kawasaki, um robot HRP-1S equipado com controlo remoto e fato de trabalho com protecção para a chuva, numa tarefa simples de escavação. É sem dúvida um excelente avanço no desenvolvimento deste tipo de robots, visto que o robot não só conduz a escavadora como comanda as operações de escavação.

Actualmente o laboratório em causa, liderado por *Shuuji Kajita* e *Kazuhito Yokoi*, está agora a aperfeiçoar tecnologias que permitam a comunicação sem fios com o robot, o que o tornará uma ferramenta fundamental para muitas tarefas dos nossos dias, que pelo seu risco não recomendam humanos. Para além disso, pretendem ainda que o

robot, pelos seus próprios meios, seja capaz de subir para a escavadora e instalar-se para iniciar um dia de trabalho.



Figura 21 – Robot HRP–1S na tarefa de escavação.

- Endereço: http://www.kawada.co.jp/ams/hrp-2/index_e.html
- Constructor: *AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)*



Figura 22 – Robot Humanóide HRP–2P.

- Especificações:

O peso do robot humanóide HRP–2P é de 58kg, o robot tem uma altura de 1540mm e uma largura de 600mm. O robot tem um total de 30 graus de liberdade. Prevê-se que a versão final deste robot seja comercializável a partir de 2008, pela quantia de 320 000 €.

Tabela 21 – Graus de liberdade do robot HRP-2P.

Graus de Liberdade	
Cabeça	2
Braços	6 (2x)
Mãos	1 (2x)
Cintura	2
Pernas	6 (2x)

H6

O ser humano deu forma aos robots humanóides H6 e H7, que foram elaborados para operar em ambientes desenhados para os seres humanos. Os protótipos H6 e H7 continuam a ser desenvolvidos para chegar às melhores soluções possíveis no que diz respeito, à integração total dos elementos, sensores e controladores.

O primeiro protótipo do robot H6 foi terminado em Junho de 2000.

- Endereço: http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/h6/H6_H7.html
- Constructor: Universidade de Tokyo



Figura 23 – Robot humanóide H6.

- Especificações:

O peso do robot humanóide H6 é de 55kg incluindo 4kg de baterias, o robot tem uma altura de 1370mm e uma largura de 590mm. O robot tem um total de 35 graus de liberdade distribuídos como especificado na tabela a seguir.

Tabela 22 – Graus de liberdade do robot humanóide H6.

Graus de Liberdade		
Olhos	3	(2x)
Pescoço	2	
Braços	7	(2x)
Mãos	1	(2x)
Cintura	1	
Pernas	6	(2x)
Pé	1	(2x)

LUCY

O objectivo deste projecto é o de desenvolver um bípede leve capaz de caminhar de uma forma dinâmica estável. Este robot pode mover-se apenas no plano sagital e é activado através de músculos pneumáticos artificiais.

- Endereço: <http://lucy.vub.ac.be/>
- Constructor: Multibody Mechanics Group of the Department of Mechanical Engineering at the Vrije Universiteit Brussel

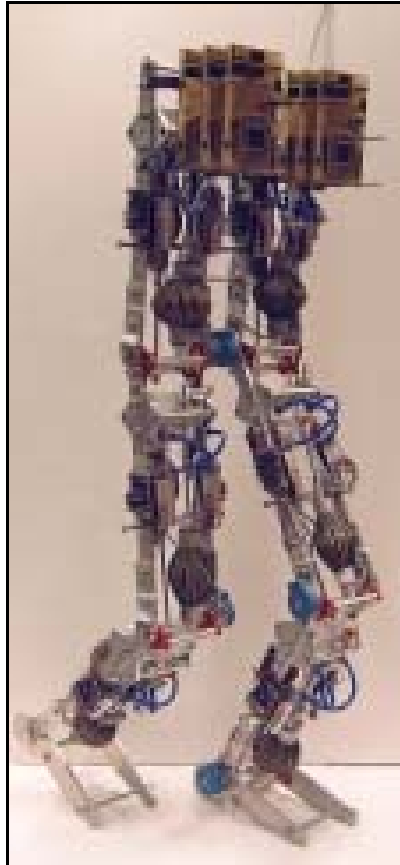


Figura 24 – Bípede Lucy.

- Especificações: A altura do robot bípede é de 1500mm e o peso é de 30kg.

MURPHY

O robot Murphy é um robot com 21 graus de liberdade activados por cilindros hidráulicos com um potenciómetro para precisar os movimentos do esqueleto em alumínio. A cabeça do robot Murphy é chamada de Murray e para movimentar-se são utilizados três motores DC. Os músculos artificiais do Murphy podem efectuar forças de aproximadamente 4000N.

- Endereço: <http://www.docs.uu.se/robocup/DVP2001/>
- Constructor: Uppsala University, Sweden.

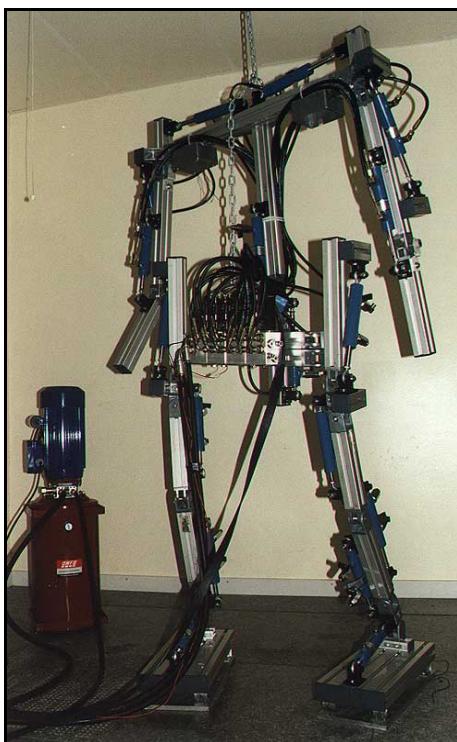


Figura 25 – Humanóide Murphy.

- Especificações:

Tabela 23 – Especificações de peso e altura do robot Murphy.

Peso (kg)	130
Altura (mm)	1800

Nota: Ver ficheiro **009_Murphy_Humanoid.pdf** e vídeos Robocup 2003.

WAVIAN RIV

Este robot utiliza servomotores DC e AC, e é sem dúvida um dos maiores ou senão mesmo, o maior robot humanóide até agora desenvolvido. Este robot têm vários antecessores, igualmente grandes mas com menores dimensões e menos graus de liberdade.

- Endereço: <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/>
- Construtor: Waseda University

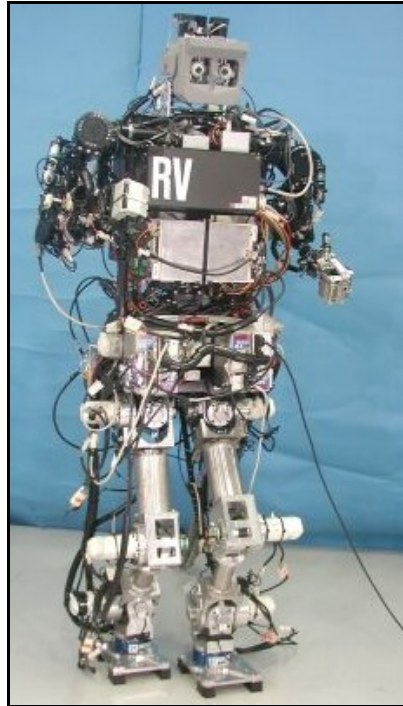


Figura 26 – Robot Wavian-Riv.

- Especificações: Este robot é bastante pesado e apresenta dos maiores números de graus de liberdade dos robots humanóides existentes, tendo um total de 43 graus de liberdade.

Tabela 24 – Especificações de peso e altura do robot Wavian-Riv.

Peso (kg)	131,4
Altura (mm)	1890

Tabela 25 – Graus de Liberdade do robot Murphy.

Graus de Liberdade		
Olhos	2	(2x)
Pescoço	4	
Braços	7	(2x)
Mãos	3	(2x)
Tronco	3	
Pernas	4	(2x)
Pé	2	(2x)

Assim, e com os robots humanóides aqui apresentados, podemos considerar que estamos em condições de tirar diversas conclusões relativamente às características principais a definir para a realização do nosso robot. Entre as principais características podemos verificar a existência de vários tipos de actuadores entre os quais temos, actuadores pneumáticos, hidráulicos e motores e servomotores AC e/ou DC. Podemos ainda verificar qual seria aproximadamente o número de graus de liberdade para o movimento do robot se assemelhar ao movimento humano.

Após esta pesquisa poderemos tomar algumas decisões consideradas essenciais para a execução do protótipo, podendo fundamentá-las nas soluções já existentes. De referir, que no Anexo I poderão ser encontrados alguns sites com informação interessante relativamente aos robots humanóides existentes e às competições em que estes participam.

3. PROPOSTA CONCEPTUAL DA SOLUÇÃO

No início deste projecto os principais objectivos a serem atingidos seriam a pesquisa e estudo dos diferentes robots existentes pelo mundo inteiro de modo a poder escolher características essenciais para a realização de uma plataforma humanóide. De entre as características mais importantes destacam-se os graus de liberdade, a altura e o peso que o robot irá ter. Assim, com todos estes dados devidamente definidos poderemos realizar modelos cinemáticos para simulação e estudos de estática, conseguindo desta forma saber quais os binários que os actuadores deverão exercer para o robot se mover.

As decisões que serão apresentadas no decorrer deste capítulo foram tomadas com base nos robots humanóides já existentes e especificados no capítulo 2, nas regras de participação do campeonato mundial de robótica Robocup, na observação dos movimentos do corpo humano e algum bom senso.

3.1. REGRAS DE PARTICIPAÇÃO DO ROBOCUP

Como referimos as decisões tomadas foram também baseadas nas regras de participação do campeonato mundial de robótica, Robocup, por isso será de alguma relevância dar uma breve explicação do funcionamento do campeonato e das regras de participação para a liga humanóide.

As regras para esta liga foram actualizadas para o campeonato que decorreu em Lisboa, este ano. Assim, começemos por definir humanóide segundo as regras disponíveis. Um robot humanóide está em condições de participar na liga Humanóide no Robocup, se completar os seguintes requisitos:

- O robot humanóide é capaz de andar utilizando apenas duas pernas. Não sendo permitida a utilização de qualquer mecanismo para facilitar a sua caminhada.
- O robot humanóide deverá ter aproximadamente as proporções do corpo descritas na figura a seguir:

Proporções do corpo do robot humanóide:

H_{max} – é a altura máxima permitida ao robot humanóide.

H – é a actual altura do robot;

L – É o comprimento da perna do robot humanóide;

AS – É a máxima largura medida do centro do robot até à extremidade do braço;

HD – É o comprimento da cabeça incluindo o pescoço.

Limites a respeitar para aprovação na liga:

$$\begin{array}{l} 0,4 * H < L < 0,6 * H \\ 2 * AC < H \\ 0,1 * H < HD \\ S < \frac{(H / 3 * H / 3)}{2} \end{array} \quad (3.1)$$

Uma tolerância de 10% é aplicada às proporções relativas como é o caso do H_{max}, excepto para a liga H-120 em que o H_{max} é 180cm. O pé do robot deverá ter dimensões máximas que não ultrapassem um rectângulo de área S, calculada através da seguinte equação:

$$S = \frac{\left(\frac{H}{3} * \frac{H}{3}\right)}{2} \quad (3.2)$$

O robot humanóide deverá conseguir manter-se em equilíbrio numa só perna durante um minuto, de modo a forçar o número de graus de liberdade das pernas do robot.

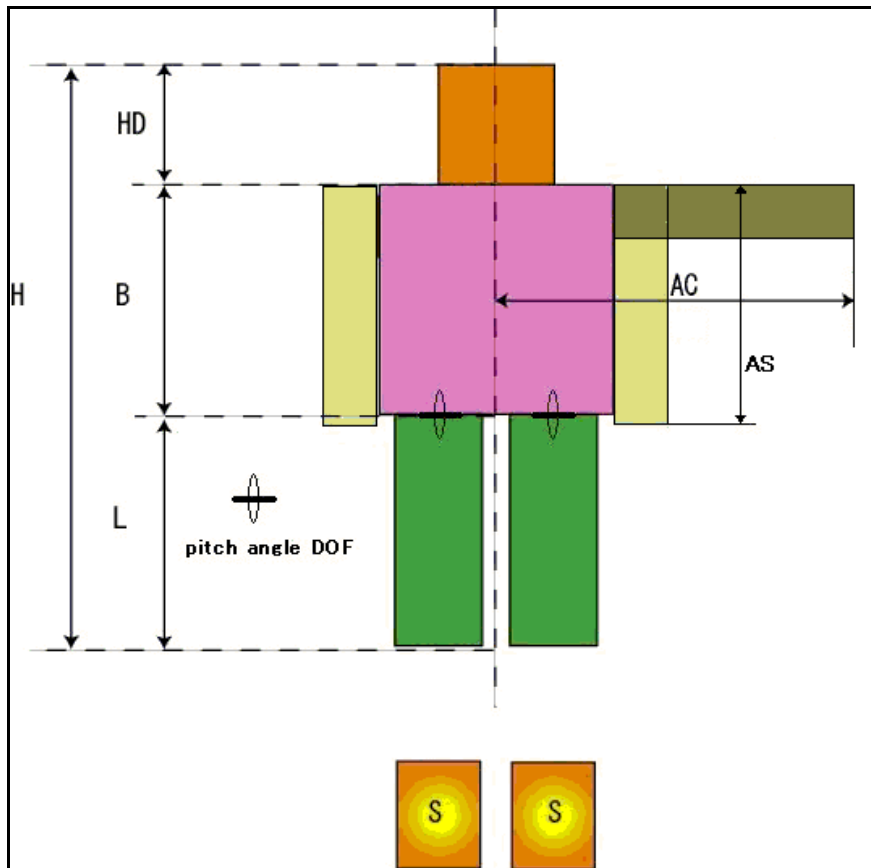


Figura 27 – Proporções do corpo do robot humanóide para participação no Robocup.

- O robot humanóide deverá consistir numa plataforma com duas pernas, dois braços, um tronco e uma cabeça.

Para concluir a apresentação das regras de participação no concurso de robótica, teremos de referir as diferentes classes de robots existentes na liga e as especificações gerais de cada uma destas classes:

- **Classe H-40**

- $H_{\max} = 44\text{cm}$ (em concordância com os 10% de tolerância);
 $H = 40\text{ cm}$;
- $16\text{ cm} < L < 24\text{ cm}$;
- $16\text{ cm} < AC < 24\text{ cm}$;
- $16\text{ cm} < AS < 24\text{ cm}$;
- $HD > 4\text{ cm}$;
- O robot humanóide deve caber dentro de um cilindro de 24 cm de diâmetro;
- $S < 89\text{ cm}^2$.

- **Classe H-80**

- $H_{\max} = 88$ cm (em concordância com os 10% de tolerância);
 $H = 80$ cm;
- $32 \text{ cm} < L < 48 \text{ cm}$;
- $32 \text{ cm} < AC < 48 \text{ cm}$;
- $32 \text{ cm} < AS < 48 \text{ cm}$;
- $HD > 8$ cm;
- O robot humanóide deve caber dentro de um cilindro de 48 cm de diâmetro;
- $S < 356 \text{ cm}^2$.

- **Classe H-120**

- $H_{\max} = 180$ cm;
- $H = 120$ cm;
- $48 \text{ cm} < L < 72 \text{ cm}$;
- $48 \text{ cm} < AC < 72 \text{ cm}$;
- $48 \text{ cm} < AS < 72 \text{ cm}$;
- $HD > 4$ cm;
- O robot humanóide deve caber dentro de um cilindro de 72 cm de diâmetro;
- $S < 800 \text{ cm}^2$.

3.2. DECISÕES TOMADAS

Após, a fase de análise e pesquisa e no decorrer de reuniões e discussões com os orientadores e colegas de trabalho do outro projecto existente, concluí-se numa primeira fase que só se iria elaborar o trabalho correspondente as pernas do robot e que estas teriam as seguintes características relativamente à mobilidade.

Tabela 26 – Distribuição dos graus de liberdades nas pernas do robot humanóide.

Graus de Liberdade das Pernas	
<i>Tornozelo</i>	2 DOF
<i>Joelho</i>	1 DOF
<i>Anca</i>	3 DOF

Os graus de liberdade aqui apresentados foram escolhidos desta forma por dois grandes motivos:

- Todos os robots que mostram um melhor desempenho têm pelo menos este número e distribuição de graus de liberdade;
- Para que o robot humanóide tenha uma maior mobilidade comparando-se assim da melhor forma possível a sua locomoção aos movimentos humanos.

Estes dados aqui apresentados relativamente aos graus de liberdade do robot é algo que é dado como certo e que não irá sofrer nenhum tipo de alteração do início ao fim do projecto.

Relativamente as especificações de peso e altura do robot decidiu-se por unanimidade que tomariam os valores apresentados na tabela a seguir, mas teremos que ter o cuidado de após a realização dos modelos, simulações e estudos da estática, os valores aqui especificados poderão se necessário, sofrer algumas alterações.

Tabela 27 – Especificações de peso e altura das pernas do robot humanóide para 1ª análise.

Especificações de Peso e Altura	
Peso	14,0 kg
Distribuição do Peso	
Elo 1	1,5 kg
Elo 2	1,5 kg
Elo 3	8,0 kg
Altura	
	0,8 m
Distribuição dos Comprimentos	
Elo 1	0,175 m
Elo 2	0,175 m
Elo 3	0,4 m

Estes valores aqui apresentados foram utilizados numa primeira análise na qual chegamos à conclusão que estes seriam demasiado elevados, pelo que deveríamos estabelecer um segundo conjunto de valores que foram utilizados numa segunda análise.

Tabela 28 – Especificações de peso e altura das pernas do robot para 2ª análise.

Especificações de Peso e Altura	
Peso	7,0 kg
Distribuição do Peso	
Elo 1	0,75 kg
Elo 2	0,75 kg
Elo 3	5,5 kg
Altura	
	0,8 m
Distribuição dos Comprimentos	
Elo 1	0,16 m
Elo 2	0,16 m
Elo 3	0,4 m

Com ambos os valores aqui apresentados foram feitas simulações e estudos de estática progressivos em que inicialmente preocupamo-nos apenas só com uma perna e de seguida com as duas pernas e anca.

Procedeu-se também nesta fase à definição de uma nomenclatura considerada simples e que conseguisse ser o mais universal possível, para mais facilmente identificarmos as diferentes juntas das pernas do robot humanóide. Logo, para os momentos utilizamos a letra *t*, do inglês *torque*, e para os ângulos de rotação das juntas a letra *q*. A perna esquerda ou direita são diferenciadas através das letras *L* e *R*, do inglês, *left* e *right*. A numeração das juntas foi feita gradualmente começando na junta do tornozelo no seu primeiro movimento e terminando no último movimento da junta da anca.

Os resultados dos cálculos efectuados, que serão apresentados nos próximos capítulo, foram relativamente elevados para os motores disponíveis, e reparamos que realmente existem pouquíssimos robots de 80cm, tentando encontrar um motivo para isto chegamos a conclusão que, sendo que na classe H80 do campeonato mundial de robótica, Robocup, a maioria dos robots que participam têm 60cm, verificamos que possivelmente o problema estará em encontrar motores com binários suficientemente elevados e que vão de encontro aos resultados obtidos nas simulações.

Assim sendo, verificamos a necessidade de realizar uma terceira distribuição dos pesos e comprimentos dos entreeixos dos robots e nesta fase verificamos após a realização da modelação das pernas em CATIA (Capítulo 5), que existem pequenos elos que deverão ser levados em conta e que estão especificados na figura e tabelas a seguir:

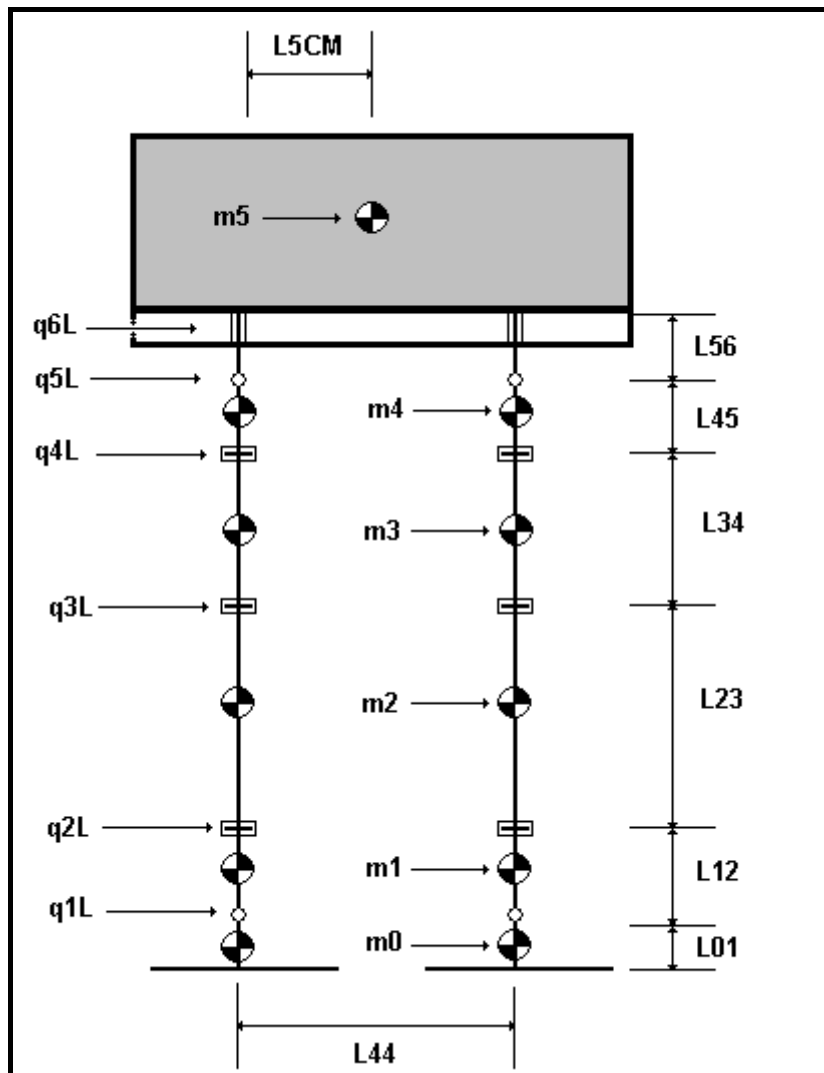


Figura 28 - Esquema da distribuição dos pesos e comprimentos nas pernas do robot.

Tabela 29 – Especificações de peso e altura das pernas do robot humanóide para 2ª análise.

Especificações de Peso e Altura	
Peso	8,48 kg

Altura	0,606 m
---------------	---------

Tabela 30 – Dimensões e massas das diversas juntas das pernas do robot.

JUNTAS	ENTREEIXOS	MASSAS
Pé – q1L	L01 = 25 mm	m0 = 0,28 kg
q1L - q2L	L12 = 19 mm	m1 = 0,20 kg
q2L - q3L	L23 = 110 mm	m2 = 0,60 kg
q3L - q4L	L34 = 80 mm	m3 = 0,20 kg
q4L - q5L	L45 = 53 mm	m4 = 0,21 kg
q5L - q6L	L56 = 19 mm	
Distância entre Pernas	L44 = 136 mm	
Distância ao tronco	L5CM = 68mm	m5 = 5,5 kg
TOTAL DAS PERNAS:	LTotal = 306 mm	m_total_perna = 1,49 kg
DISTÂNCIA DA ANCA A CABEÇA DO ROBOT	LA_C = 300 mm	

Após esta fase efectuaram-se modelos cinemáticos para simulação em ambiente MatLab e estudos de estática e dinâmica que serão devidamente explicitados no decorrer deste documento.

Apenas de referir, que com os resultados obtidos para estes novos parâmetros os motores e as relações de transmissão utilizadas dão-nos uma margem de movimento das pernas que não era nem de perto possível com os dados da 1ª e 2ª análise.

Foi necessário também nesta fase do projecto definir um curso máximo para as diferentes juntas, assim e para melhor podermos definir os limites dos ângulos de junta, elaboramos dois protótipos com três graus de liberdade em cada perna (q2, q3 e q4), um desses em cartolina e no plano 2D e outro 3D feito em cartão.

O protótipo 2D tem como propósito facilitar a medição dos ângulos de acordo com a posição em que se encontram as pernas do robot.

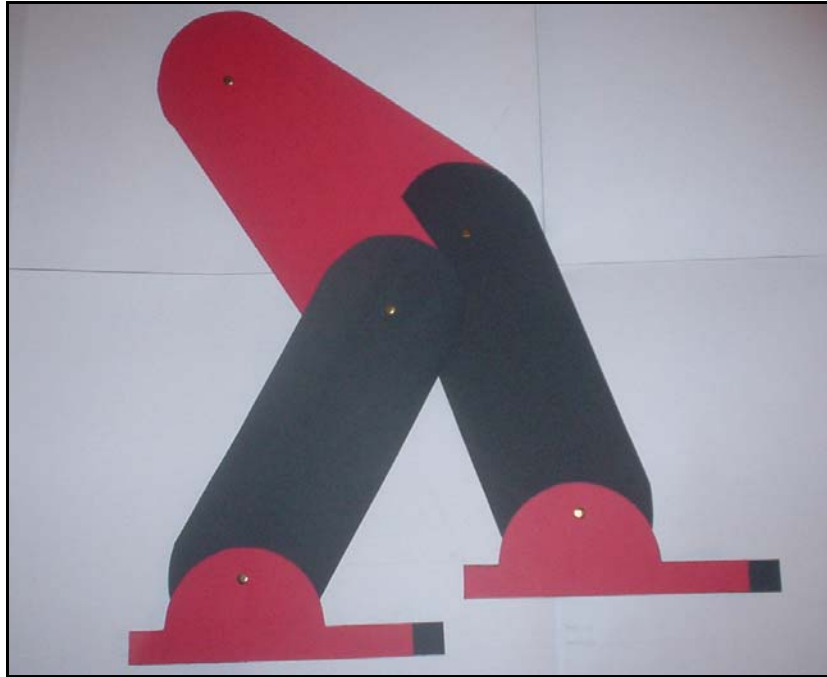


Figura 29 – Protótipo 2D

O protótipo 3D permite simular e observar os movimentos das juntas que são necessários para dar um passo, usando as três juntas rotacionais definidas.



Figura 30 – Protótipo 3D.

A observação de outros robots humanóides e análise dos movimentos das juntas dos protótipos desenvolvidos levou-nos a usar para uma primeira análise, os seguintes ângulos máximos de junta:

Tabela 31 – Variação dos ângulos de junta para uma 1ª análise.

Variação dos ângulos de junta	
q1L	[70° ; 120°]
q2L	[45° ; 110°]
q3L	[0° ; 90°]
q4L	$q4L = 90^\circ - (q2L + q3L)$
q5L	[-30° ; 30°]

Como podemos verificar, a variação da junta q4L foi inicialmente estudada para conter uma restrição cinemática que obriga a este ângulo de junta variar o necessário em função dos ângulos q2 e q3, mantendo o tronco sempre na vertical.

Após a realização de algumas simulações verificamos que esta variação de ângulos de junta seria exagerada pelo que decidimos limitar ligeiramente mais, os diferentes ângulos de junta, mantendo ainda a restrição cinemática para a junta q4L.

Tabela 32 – Variação dos ângulos de junta para uma 2ª análise.

Variação dos ângulos de junta	
q1L	[70° ; 120°]
q2L	[60° ; 110°]
q3L	[0° ; 50°]
q4L	$q4L = 90^\circ - (q2L + q3L)$
q5L	[-30° ; 30°]

4. SIMULAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA

Após definição dos parâmetro iniciais foram desenvolvidas diversas simulações para cálculo dos momentos exercidos nas diversas juntas e com base nestas análises procedeu-se a escolha dos binários que os motores deverão ter.

Assim sendo, começamos por apenas analisar uma perna com os três graus de liberdade paralelos existentes nas juntas do tornozelo, joelho e anca, correspondendo estes aos graus de liberdade q_2 , q_3 , e q_4 .

Para a realização do estudo estrutural de uma só perna, efectuou-se um desenho esquemático e foi definida a localização de alguns parâmetros.

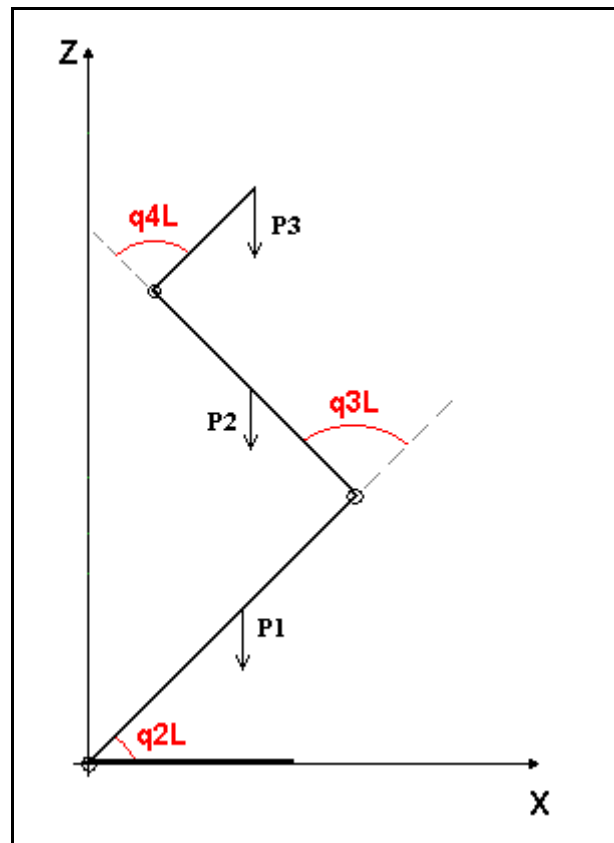


Figura 31 – Esquema de uma perna e distribuição de forças.

Assim e como poderemos verificar na imagem, os centros de massa dos diferentes elos correspondem ao centro geométrico destes. Por sua vez, isto poderia ser considerado como falso e seria extremamente fácil mudar nos parâmetros iniciais dos programas desenvolvidos em MatLab a expressão desejada para indicar a posição espacial do centro de massa.

Distâncias da junta ao centro de massa:

$$\text{Elo 1} \rightarrow r_1 = \frac{L_{12}}{2} \quad (4.1)$$

$$\text{Elo 2} \rightarrow r_2 = \frac{L_{23}}{2} \quad (4.2)$$

$$\text{Tronco} \rightarrow r_3 = \frac{L_{34}}{2} \quad (4.3)$$

4.1. CINEMÁTICA DIRECTA DE UMA PERNA NO PLANO ZX

Inicialmente o cálculo da cinemática directa de uma perna apenas com os três graus de liberdade especificados na figura anterior, verificou-se uma tarefa difícil visto que os nossos conhecimentos acerca desta matéria eram muito reduzidos, e baseamo-nos na matemática e na análise de mecânica das estruturas para chegarmos a um resultado. Posteriormente, aprendemos melhor esta matéria devido à cadeira de Robótica Industrial, através da qual nos foi possível efectuar o total cálculo das expressões de cinemática directa para os 12 graus de liberdade existentes nas pernas.

As expressões obtidas para o caso de uma só perna e para cada uma das juntas em relação as diferentes massas associadas, foram as seguintes:

Junta q2L

Elo 1 – Centro de massa, P₁ em relação à junta 1:

$$b_{11} = r_1 * \cos(q_{2L}) \quad (4.4)$$

Elo 2 – Centro de massa, P₂ em relação à junta 1:

$$b_{12} = L_{12} * \cos(q_{2L}) + r_2 * \cos(q_{3L} + q_{2L}) \quad (4.5)$$

Tronco – Centro de massa, P₃ em relação à junta 1:

$$b_{13} = L_{12} * \cos(q_{2L}) + L_{23} * \cos(q_{3L} + q_{2L}) + r_3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L}) \quad (4.6)$$

Junta q3L

Elo 2 – Centro de massa, P₂ em relação à junta 2:

$$b_{22} = r_2 * \cos(q_{2L} + q_{3L}) \quad (4.7)$$

Tronco – Centro de massa, P₃ em relação à junta 2:

$$b_{23} = L_{23} * \cos(q_{2L} + q_{3L}) + r_3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L}) \quad (4.8)$$

Junta q4L

Tronco – Centro de massa, P₃ em relação à junta 3:

$$b_{33} = r_3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L}) \quad (4.9)$$

Após definição das forças aplicadas na perna e das expressões dos braços da força estamos em condições de definir as equações para o cálculo dos momentos nas três juntas. Assim sendo, temos as seguintes expressões para os diferentes binários da perna:

Binário na Junta q2L

$$t_{2L} = P1 * b_{11} + P2 * b_{12} + P3 * b_{13} \quad (4.10)$$

Substituindo:

$$t_{2L} = P1 * r1 * \cos(q_{2L}) + P2 * (L_{12} * \cos(q_{2L}) + r2 * \cos(q_{3L} + q_{2L})) + P3 * (L_{12} * \cos(q_{2L}) + L_{23} * \cos(q_{3L} + q_{2L}) + r3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L})) \quad (4.11)$$

Binário na Junta q3L

$$t_{3L} = P2 * b_{22} + P3 * b_{23} \quad (4.12)$$

Substituindo:

$$t_{3L} = P2 * r2 * \cos(q_{2L} + q_{3L}) + P3 * (L_{23} * \cos(q_{2L} + q_{3L}) + r3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L})) \quad (4.13)$$

Binário na Junta q4L

$$t_{4L} = P3 * b_{33} \quad (4.14)$$

Substituindo:

$$t_{4L} = P3 * r3 * \cos(q_{2L} + q_{3L} + q_{4L}) \quad (4.15)$$

Com os dados aqui apresentados, a variação de ângulos de junta imposta e com as restrições cinemáticas impostas anteriormente no capítulo 3, estamos em condições de efectuar os primeiros cálculos dos binários exercidos nas juntas.

4.2. ANÁLISE ESTÁTICA DE UMA PERNA NO PLANO ZX

Para a obtenção de resultados numéricos para análise dos binários máximos exigidos para combinações de juntas válidas, foi efectuado um pequeno programa em MatLab, que tinha os seguintes dados de entrada:

- Comprimentos dos elos;

- Peso dos elos;
- Distância dos centros de massa;
- Equações dos momentos;
- Relação entre q_4 , q_3 e q_2 .

Através deste programa, consegue-se obter os gráficos dos momentos em relação aos ângulos de junta q_2 e q_3 .

Nas tabelas a seguir apresentadas podemos verificar qual os binários máximos obtidos para a 1ª análise e para a 2ª análise, de referir que, os cálculos dos binários foram efectuados para toda a variação dos ângulos anteriormente definidas no capítulo 2, e o que nós leva a concluir que esta variação poderá ser demasiado elevada e onde poderão existir configurações desinteressantes e impraticáveis pelo robot humanóide.

Tabela 33 – Binários nas Juntas q_2 , q_3 e q_4 para os dados da 1ª análise.

Binários das Juntas q_2, q_3 e q_4	
t2 (N.m)	[- 50 ; 50]
t3 (N.m)	[- 45 ; 30]
t4 (N.m)	[- 22 ; 15]

Tal como anteriormente se referiu, aqui podemos constatar que os momentos são realmente demasiado elevados para os motores que se pretendia utilizar (motores utilizados normalmente em aplicações de aerodelismo), por isso foi utilizada uma restrição que relacionava o centro de massa total da perna e a variação dos ângulos de junta. Mas mesmo assim, não se conseguiu um resultado óptimo, capaz de diminuir significativamente os binários nas juntas. Perante isto, tomou-se a decisão já referida, de diminuir o peso e os comprimentos dos elos das pernas. Assim sendo, para a segunda análise a diminuição dos binários demonstrou-se nos seguintes valores:

Tabela 34 – Binários nas Juntas q_2 , q_3 e q_4 para os dados da 2ª análise.

Binários das Juntas q_2, q_3 e q_4	
t2 (N.m)	[- 25 ; 25]
t3 (N.m)	[- 20 ; 15]
t4 (N.m)	[- 12 ; 7,5]

Nem todas as configurações de ângulos são lógicas, de acordo com o fim a que se destina, ou seja posições da perna, que não são de todo utilizadas e que por isso não interessam ao estudo efectuado. Para eliminar configurações de ângulos impossíveis, foi realizado um estudo do centro de massa que nos permite visualizar onde “cai” o centro de massa total da perna. A partir deste ponto todos os resultados apresentados são relativos à segunda análise, já que se concluiu que a primeira seria impraticável, por isso não se mostram os estudos que foram efectuados relativos à mesma, de qualquer forma foram entregues os ficheiros de MatLab que foram realizados para o estudo.

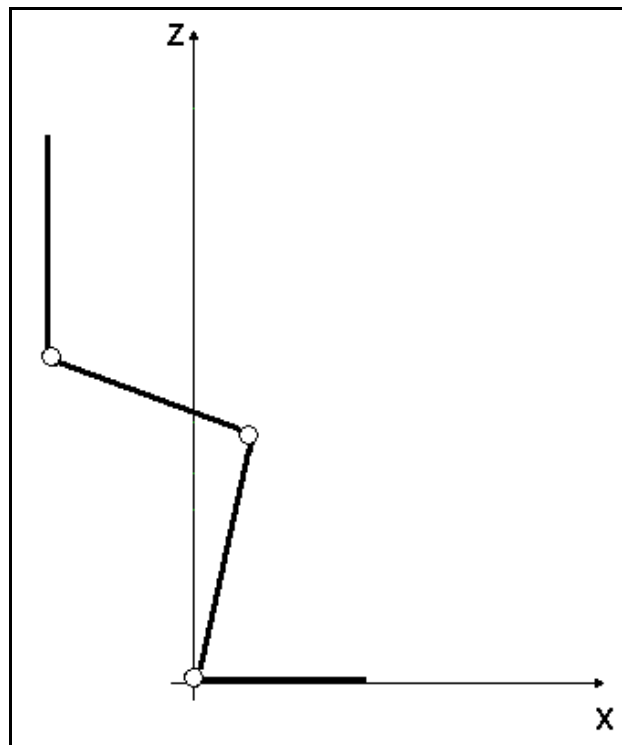


Figura 32 – Exemplo de configuração desinteressante.

4.2.1. Restrição do Centro de Massa

Para melhor se interpretar os resultados obtidos para o estudo dos momentos, efectuou-se um programa em MatLab que indica se para uma dada configuração de ângulos de junta o centro de massa do robot está dentro da área do pé. Ou seja, se o robot “se aguenta em pé” para uma dada configuração de ângulos de junta. Projectando o centro de massa sobre o eixo dos xx , deverá “cair” dentro da área do pé, definida.

Considerando-se que as dimensões máximas do pé são as apresentadas na figura a seguir, e utilizando-se a seguinte expressão:

$$X_{cm} = \frac{m_1 \cdot b_{11} + m_2 \cdot b_{12} + m_3 \cdot b_{13}}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (4.16)$$

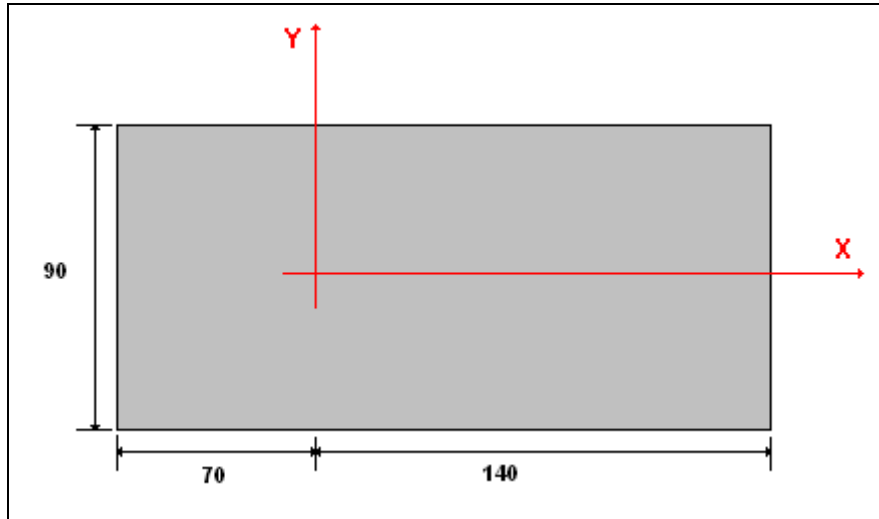


Figura 33 – Dimensões máximas do pé do robot em milímetros.

Variou-se então o ângulo de junta q_2 e q_3 entre os valores máximos definidos no capítulo 2 e foi utilizada a restrição cinemática para a junta q_4 . Obteve-se assim, o gráfico a seguir apresentado que ilustra a variação máxima do centro de massa em função dos ângulos de junta q_2 e q_3 .

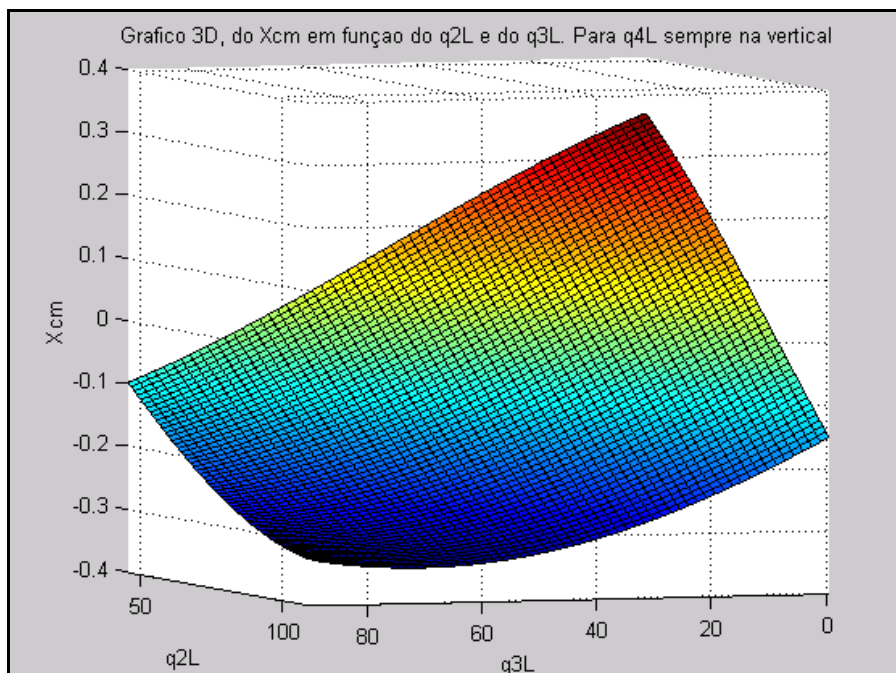


Figura 34 – Gráfico 3D do centro de massa.

Do gráfico concluí-se que o centro de massa, para a variação máxima dos ângulos, está entre:

$$X_{cm} = [-0,4 ; 0,4] \text{ m}$$

Concluindo-se assim, que a variação do centro de massa é muito elevada para as dimensões definidas para o pé.

Logo, restringiu-se o estudo a duas posições da perna. Uma em que a perna se encontra apoiada no chão (suportando todo o peso do robot) e outra em que a perna se encontra no ar, ou seja, o peso do tronco esta localizado sobre a perna que está apoiada e não influencia a perna em estudo.

4.2.2. Caso 1: Perna Apoiada no Solo

Para se definir devidamente, quais os momentos sofridos nas juntas q2, q3 e q4, optou-se pela verificação da variação possível dos ângulos de rotação das juntas do tornozelo e do joelho, mantendo a restrição cinemática para a junta q4, de modo ao centro de massa total manter-se dentro da área do pé. Para isto, fez-se variar uma das juntas e fixar a outra num valor máximo, médio e um mínimo.

Realizou-se, um gráfico 3D com a nova variação de ângulos para esta posição, e gráficos 2D que explicitam como foi restringida a variação dos ângulos, todos estes gráficos poderão ser observados nos ficheiros de MatLab correspondentes a análise 2D.

Para o primeiro caso, quando a perna esta apoiada no chão, definiu-se a seguinte variação extrema dos ângulos de junta:

Tabela 35 – Variação dos ângulos de junta para a perna apoiada no solo.

Variação dos ângulos de junta	
q2L	[60° ; 90°]
q3L	[0° ; 40°]
q4L	$q4L = 90^\circ - (q2L + q3L)$

O gráfico 3D obtido para a variação do centro de massa, foi o seguinte:

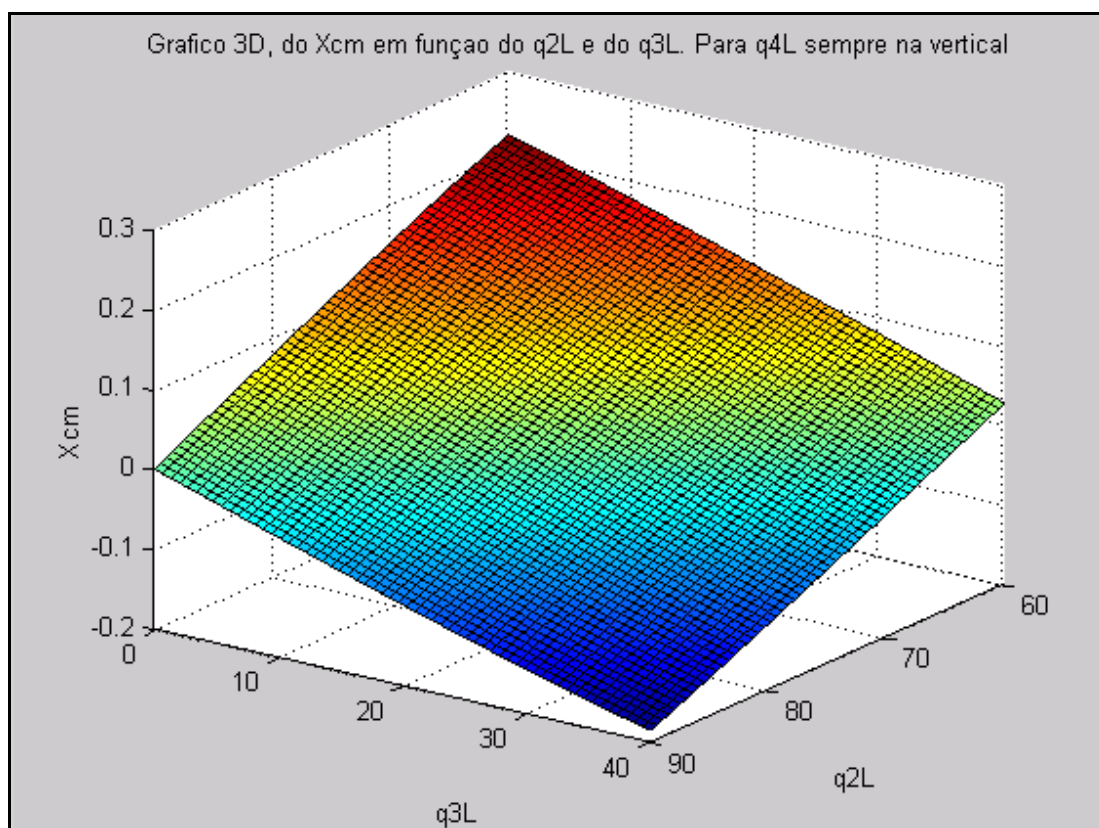


Figura 35 – Gráfico do X_{CM} em função de q_{2L} e q_{3L} , para q_{4L} na vertical.

De seguida, foi elaborada uma análise dos diversos gráficos obtidos para a posição do centro de massa em função dos ângulos de junta. Analisando-se a variação máxima possível de dois ângulos de junta e fixando o outro em valores máximos, médios e mínimos. Os gráficos obtidos e posteriormente analisados estão disponíveis no programa desenvolvido em MatLab, relativo às análises de 3DOF. Os valores resultantes para os binários e para a variação máxima possível com a restrição do centro de massa estão tabelados de seguida:

Tabela 36 – Binário t_{2L} em função de q_{2L} e q_{3L} .

Máximos t_{2L} (N.m)	Mínimos t_{2L} (N.m)	q_{2L}	q_{3L}	Binário máximo em módulo (N.m)
10,3	0	[70° ; 90°]	0°	10,3
8,3	-5,5	[60° ; 87,5°]	20°	8,3
1,8	-5,5	[60° ; 74,5°]	40°	5,5
10,5	1,8	60°	[15° ; 40°]	10,5

7,85	-5,5	75°	[0° ; 39,5°]	7,85
0	-5,5	90°	[0° ; 16,1°]	5,5

Tabela 37 – Binário t3L em função de q2L e q3L.

Máximos t3L (N.m)	Mínimos t3L (N.m)	q2L	q3L	Momento máximo em módulo (N.m)
6,3	0	[70° ; 90°]	0°	6,3
3,5	-6,0	[60° ; 87,5°]	20°	6,0
-3,5	-8,3	[60° ; 74,5°]	40°	8,3
5,1	-3,3	60°	[15° ; 40°]	5,1
4,5	-8,2	75°	[0° ; 39,5°]	8,2
0	-5,5	90°	[0° ; 16,1°]	5,5

Tabela 38 – Binário t4L para q2L para q3L.

Máximos t4L (N.m)	Mínimos t4L (N.m)	q2L	q3L	Momento máximo em módulo (N.m)
3,6	0	[70° ; 90°]	0°	3,6
1,9	-3,3	[60° ; 87,5°]	20°	3,3
-1,8	-4,3	[60° ; 74,5°]	40°	4,3
2,7	-1,8	60°	[15° ; 40°]	2,7
2,8	-4,5	75°	[0° ; 39,5°]	4,5
0	-2,8	90°	[0° ; 16,1°]	2,8

Concluiu-se assim, que os momentos máximos suportados pelas juntas, quando a perna está apoiada no solo, são:

Tabela 39 – Binários máximos das Juntas q2, q3 e q4.

Binários das Juntas q2, q3 e q4	
t2 (N.m)	10,5
t3 (N.m)	8,3
t4 (N.m)	4,5

4.2.3. Caso 2: Perna Livre

Efectuou-se um estudo para os momentos nas juntas quando a perna não se encontra apoiada no chão, mas os resultados obtidos não foram conclusivos, por isso, não será nesta fase apresentado os resultados deste estudo. Contudo os programas de MatLab que foram desenvolvidos para se efectuar este estudo, foram denominados como: M1_2D_ar.m; M2_2D_ar.m; M3_2D_ar.m.

A variação dos ângulos de junta possível para o caso da perna livre, foi definida nos seguintes valores:

Tabela 40 – Variação dos ângulos de junta para o caso da perna estar livre.

Variação dos ângulos de junta	
q2L	[60° ; 110°]
q3L	[0° ; 90°]
q4L	$q4L = 90^\circ - (q2L + q3L)$

4.3. CINEMÁTICA DIRECTA DE UMA PERNA NO PLANO ZY

Tal como executado anteriormente para as juntas q2, q3 e q4, a análise estrutural foi também efectuada para as juntas q4 e q5 separadamente. Os movimentos destas juntas dão-se em torno do eixo dos xx.

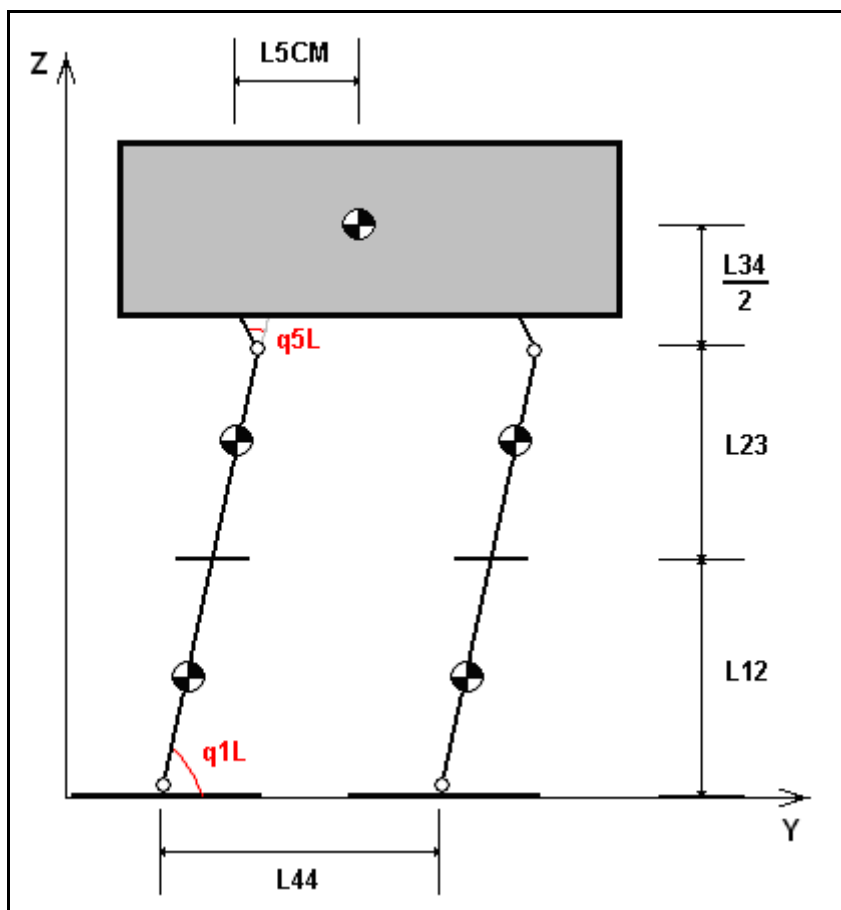


Figura 36 – Esquema das pernas no plano ZY.

Existiam dois parâmetros que nesta fase tiveram de ser arbitrados para a realização do cálculo dos binários, estes parâmetros correspondem à distância entre os pontos centrais de ambos os pés e à distância da anca ao centro de massa. Assim sendo, estes valores foram definidos como tendo as seguintes dimensões:

$$L44 = 0,15\text{m};$$

$$L5CM = 0,75\text{m};$$

Assim foram deduzidas as expressões para os binários exercidos nas juntas q4 e q5. Considerando-se apenas que só existe a contribuição das cargas em Z e dos braços em X.

Para a junta q4, obteve-se assim a seguinte expressão:

$$t1L = P1 * (b41 + L44) + P2 * (b42 + L44) + P3 * (b43 * L5CM) \quad (4.17)$$

onde os braços de força foram calculados através da cinemática directa e são aqui apresentados,

$$b41 = r1 * \cos(q1L) \quad (4.18)$$

$$b42 = (L12 + r2) * \cos(q1L) \quad (4.19)$$

$$b43 = (L12 + L23) * \cos(q1L) + r3 * \cos(q1L + q5L) \quad (4.20)$$

Para a junta q5 situada na anca, a expressão do binário obtida foi:

$$t5L = P3 * (b53 + L5CM) \quad (4.21)$$

onde o braço da força existente corresponde a b53:

$$b53 = r3 * \cos(q1L + q5L) \quad (4.22)$$

Para se simular e obter os gráficos dos binários das juntas em função da variação máxima dos ângulos foi também efectuado um programa em MatLab, do qual esta informação poderia ser retirada.

Desta forma, aconselhamos a visualização dos gráficos através do programa, e a variação dos resultados obtidos varia entre os intervalos a seguir definidos:

Tabela 41 – Binários máximos exercidos nas juntas q4 e q5, sem restrições.

Binários nas Juntas q4 e q5	
q4	[-7,5 ; 12,5]
q5	[-3,0 ; 7,0]

Também nesta análise foi necessário devido aos elevados valores obtidos, realizar uma restrição dos valores com o centro de massa das pernas. Esta restrição dos dados é de seguida apresentada.

4.3.1. Restrição do Centro de Massa

Para a coordenada do centro de massa, Y_{CM} , foi deduzida a expressão a utilizar para posteriormente poder-se realizar as restrições necessárias.

$$Y_{cm} = \frac{m1 \cdot b41 + m1 \cdot L44 + m2 \cdot b42 + m2 \cdot L44 + m3 \cdot b43 + m3 \cdot L5CM}{2m1 + 2m2 + 2m3} \quad (4.23)$$

Sendo que o objectivo base corresponde a que esta variação do centro de massa se encontre dentro da área dos pés.

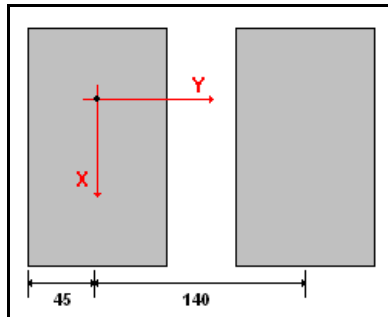


Figura 37 – Área dos pés no plano XY.

Concluí-se assim, que se pode variar o centro de massa no seguinte intervalo, para que a restrição seja cumprida:

$$Y_{CM} = [-0,05 ; 0,125]m$$

Da análise dos gráficos 3D obtidos através do programa desenvolvido em MatLab, pode-se concluir que a variação do Y_{CM} será:

$$Y_{CM} = [0,17 ; 0,25]m$$

Tal como foi efectuado para as juntas q2, q3 e q4, foram elaborados gráficos 2D da variação do centro de massa para se conseguir restringir a variação dos ângulos de junta.

Esta análise foi inconclusiva, porque estes binários não podem ser calculados independentemente dos ângulos q1 e q5, tal como era efectuado no cálculo dos momentos das juntas q2, q3 e q4 onde poderia ser utilizada a dependência de q4 em função dos outros ângulos de junta. Portanto decidiu-se realizar a cinemática directa das pernas com 10 graus de liberdade, para se poder verificar quais as variações realistas das juntas e dos binários exercidos nestas.

4.4. CINEMÁTICA DIRECTA DAS DUAS PERNAS, 10DOF

A cinemática das pernas do robot corresponde ao estudo do conjunto de relações entre as posições, velocidades e acelerações dos seus diferentes elos.

Nesta fase do trabalho foi desenvolvida e estudada a cinemática directa das pernas apenas com 10 DOF, faltando neste estudo os dois graus de liberdade relativos aos movimentos $q6L$ e $q6R$ das pernas. Estes movimentos não foram considerados nas condições de entrada da cinemática porque acrescentavam complexidade desnecessária às condições iniciais do problema, e como facilmente se pode analisar esta será a junta que provavelmente terá menos utilização para o passo do robot e menos exigências a níveis de energia.

Foi assim necessário inicialmente, definir o sistema de coordenadas global das pernas para posteriormente definir o referencial associado a cada elo e por sua vez indicar os parâmetros cinemáticos usando a metodologia de *Denavit – Hartenberg*.

Assim sendo, pode ver-se na figura a seguir, o referencial global e os referenciais associados a cada elo.

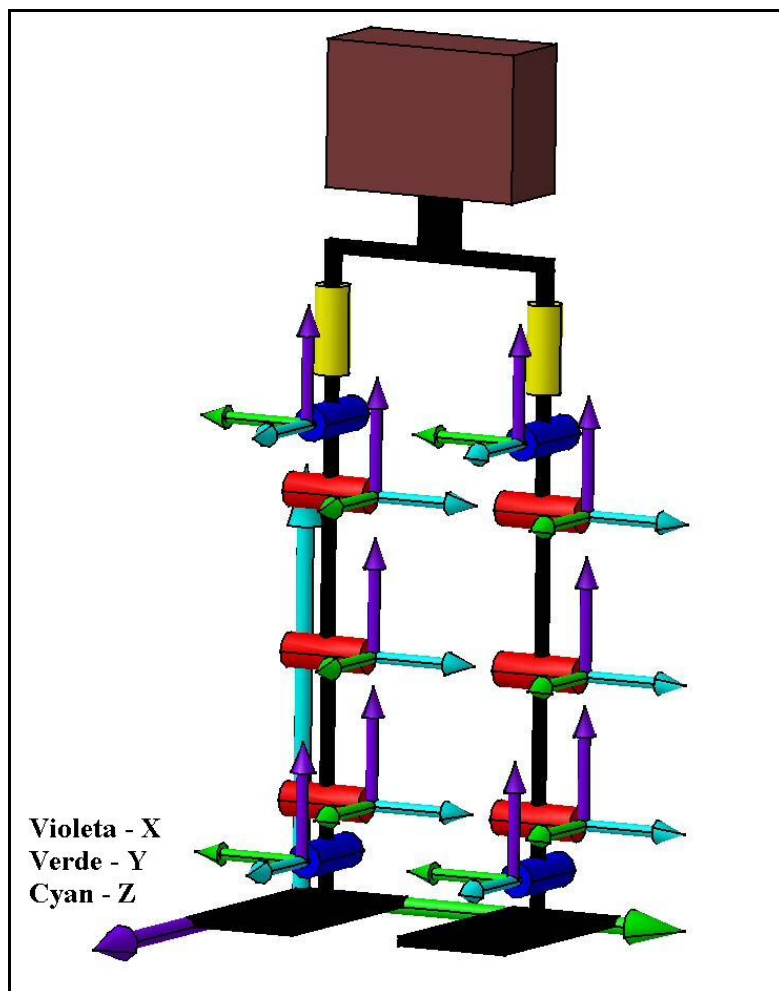


Figura 38 – Referencial global e referenciais associados a cada elo para as pernas com 10 DOF.

Posteriormente a definição dos referenciais associados a cada elo, verificou-se a necessidade de relembrar a metodologia de *Denavit – Hartenberg* utilizada para definir os parâmetros cinemáticos associados às juntas.

Assim sendo, procede-se aqui a uma sucinta explicação do método referido, para melhor se poder compreender os parâmetros obtidos com base na figura onde são apresentados os diversos referenciais.

4.4.1. Metodologia de *Denavit – Hartenberg*

Devido à complexidade da cadeia cinemática das pernas do robot foi necessário definir com muito cuidado todas as características da metodologia utilizada, para assim garantir o correcto funcionamento dos parâmetros na simulação. Desta forma procedemos a seguir à explicitação dos diferentes passos do algoritmo de *Denavit – Hartenberg* que é sem dúvida uma metodologia muito bem estruturada para, no algoritmo da cinemática directa, obter os sistemas de coordenadas e as transformações associadas a cada elo das pernas do robot. [5]

Este algoritmo para ser aplicado às diferentes juntas, deve-se ter o cuidado de realizar a numeração por ordem crescente das juntas, começando num pé e terminando no outro. O algoritmo pode ser dividido em 4 etapas fundamentais que se subdividem em vários passos elementares repetidos parcialmente em ciclos, consoante o número de elos em estudo das pernas. Na tabela a seguir, descreveu-se o algoritmo, admitindo-se que as pernas do robot humanóide têm n juntas e para ele se definirão $n+1$ sistemas de coordenadas, sendo que o último corresponde a um dos pés. [5]

Tabela 42 – Procedimento para aplicação do algoritmo de *Denavit – Hartenberg*. [5]

1	Estabelecer o sistema de coordenadas (x_0, y_0, z_0) na base de suporte, com z_0 ao longo do eixo da junta 1. Convencionar x_0 e y_0 de forma conveniente.
	For $i = 1$ to $n-1$
2	2.1 Definir eixo junta i e alinhar z_i com eixo da junta $i+1$
	2.2 Definir O_i (origem do sistema de coordenadas) de um dos seguintes modos:

	2.3	Intersecção de z_i com z_{i-1} Intersecção da normal comum entre z_i e z_{i-1} com z_i
	2.4	Definir $x_i = \pm(z_{i-1} \times z_i)$, ou ao longo da normal comum a z_{i-1} e z_i quando são paralelos
	2.5	Definir $y_i = z_i \times x_i$
		Next i
3		Estabelecer o sistema de coordenadas da última junta, O_n . Normalmente, a junta n é rotacional: z_n é colinear com z_{n-1} e a apontar para fora x_n normal a z_n e z_{n-1} y_n de acordo com o sistema directo usual.
		Determinar parâmetros de elos e juntas For i = 1 to n
4	4.1	$d_i = \overline{O_{i-1}, (z_{i-1} \cap x_i)}_{z_{i-1}}$; é a variável de junta se for prismática
	4.2	$l_i = \overline{O_i, (z_{i-1} \cap x_i)}_{x_i}$
	4.3	$\theta_i = \angle(x_{i-1}, x_i)_{z_{i-1}}$; é a variável de junta se for rotacional
	4.4	$\alpha_i = \angle(z_{i-1}, z_i)_{x_i}$
		Next i

Para a representação da cinemática das pernas do robot humanóide foi necessário seguir os passos indicados acima, tendo ainda em atenção que para além dos parâmetros de junta principais foi acrescentado ao programa desenvolvido um outro parâmetro que corresponde ao tipo de junta utilizada que poderá ser rotacional (“I”) ou prismática (“0”). Esta consideração foi tomada apesar de se saber que para as pernas do robot apenas existem juntas rotacionais, mas que seria um aspecto que tornaria o programa desenvolvido em MatLab mais robusto e completo.

4.4.2. Parâmetros Cinemáticos para as Pernas com 10 DOF

Após esta breve apresentação do algoritmo mais apropriado para determinar os parâmetros de junta, estamos em condições de aplicar a estrutura cinemática as considerações que o algoritmo leva em conta.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela seguinte, estes resultados caracterizam as pernas do robot humanóide para o caso em estudo de 10 DOF.

Tabela 43 – Parâmetros cinemáticos para as pernas do robot com apenas 10 DOF

Junta i	θ_i	α_i	d_i	l_i
1	0°	90°	L1	0
2	0°	0	L2	0
3	0°	0	L3	0
4	0°	-90°	L4	0
5	-90°	0	L5	0
6	90°	90°	-L4	0
7	0°	0	-L3	0
8	0°	0	-L2	0
9	0°	-90°	-L1+L0	0
10	0°	0	-L0	0

Um problema associado à correcta definição dos parâmetros de junta corresponde ao facto de que com esta cadeia cinemática não levamos em conta a existência de um tronco, cuja existência na simulação é bastante importante, ver figura a seguir.

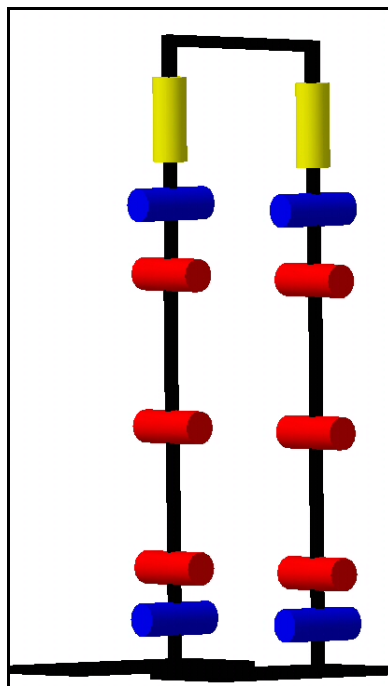


Figura 39 – Cadeia cinemática das pernas com 10 DOF sem tronco.

Para solucionar-se este problema, tivemos que utilizar uma segunda cadeia cinemática que começa no pé de apoio e acaba no tronco e finalmente sobrepondo ambas as cadeias cinemáticas. Assim, determinou-se os parâmetros de junta para a segunda cadeia cinemática que é apresentada na figura a seguir.

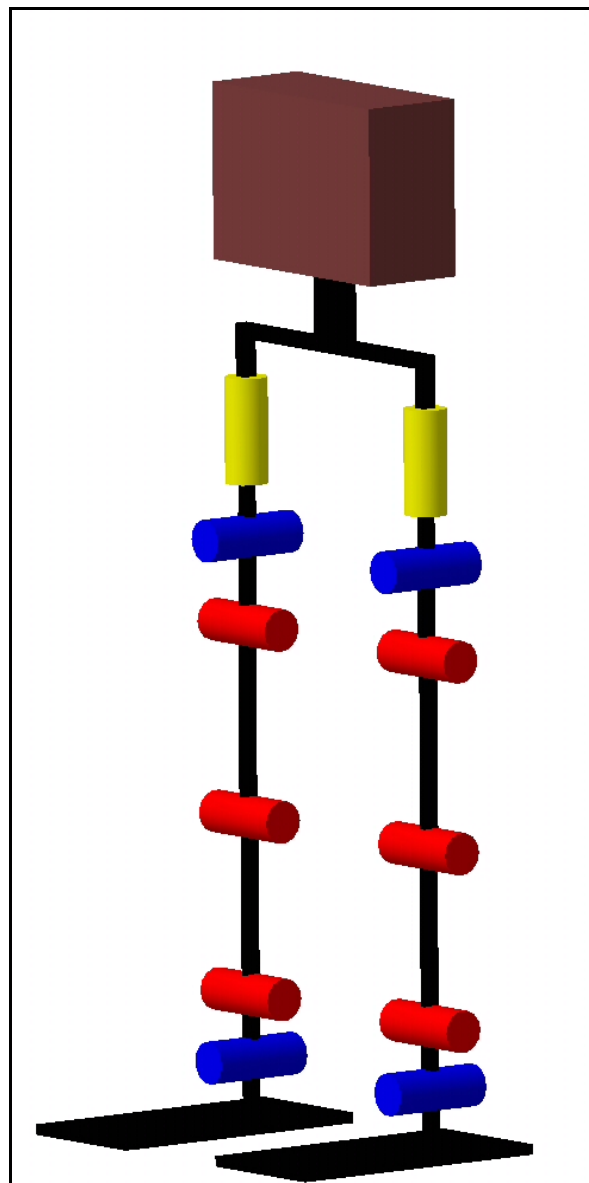


Figura 40 – Cadeia cinemática que inclui uma perna e o tronco.

De seguida, para podermos realizar a simulação das pernas do robot humanóide foi desenvolvido um conjunto de *scripts* e funções que permitem descrever a estrutura cinemática de um manipulador a partir dos parâmetros cinemáticos de *Denavit – Hartenberg*. Assim a simulação do robot poderá ser desenvolvida em ambiente MatLab.

4.4.3. Funções e *Scripts* para Cinemática Directa das Pernas

Nesta fase apresentamos alguns resultados do ambiente obtido para a simulação, com o cuidado de explicar sucintamente através de um fluxograma o funcionamento do conjunto de funções e *scripts* desenvolvidos.

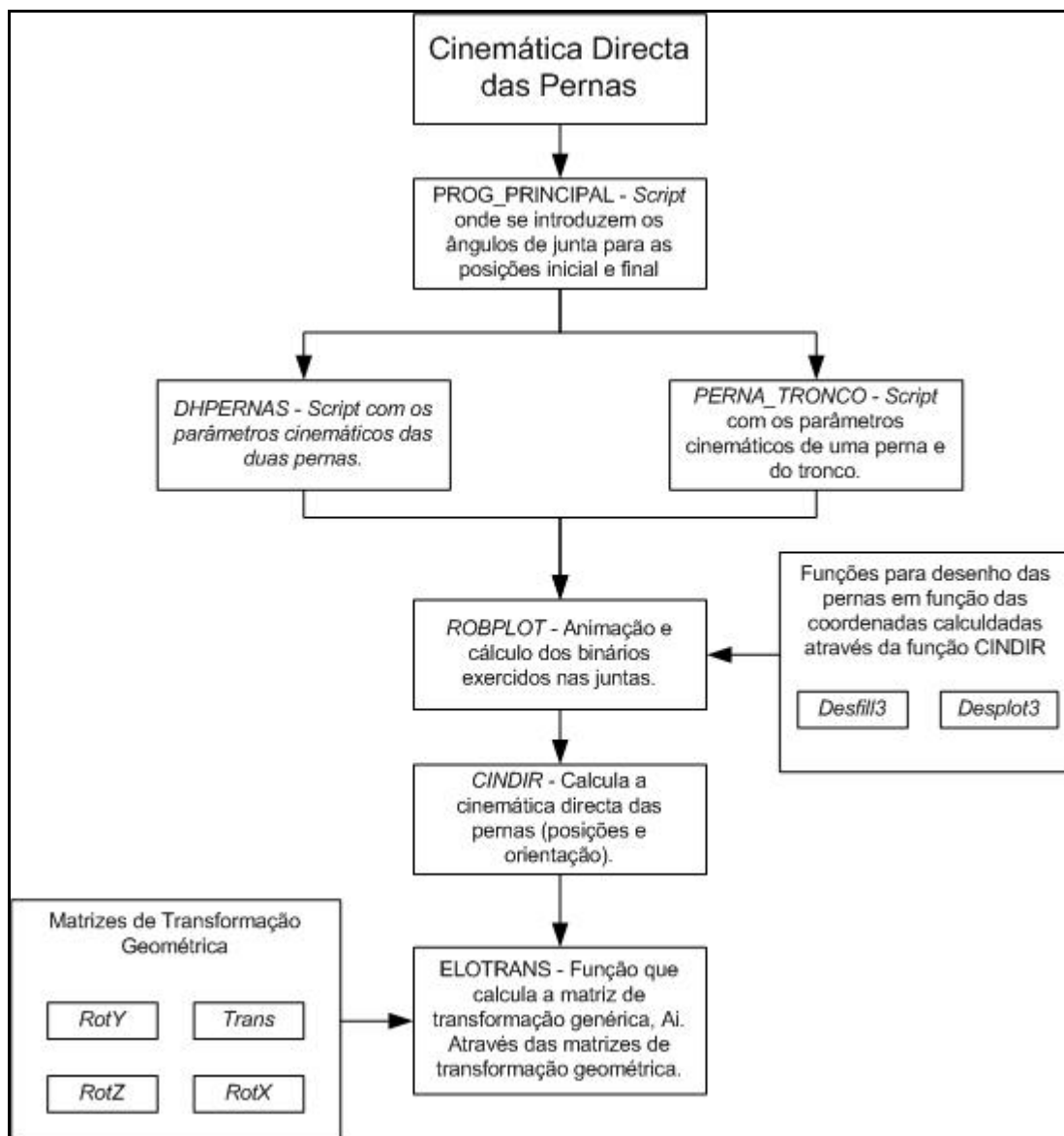


Figura 41 – Fluxograma com o funcionamento geral do programa de cinemática directa.

Algumas imagens das simulações obtidas podem ser apresentadas, a seguir, tendo em consideração que através do programa desenvolvido é possível a visualização da

animação que permite a melhor compreensão do movimento das pernas do robot humanoíde.

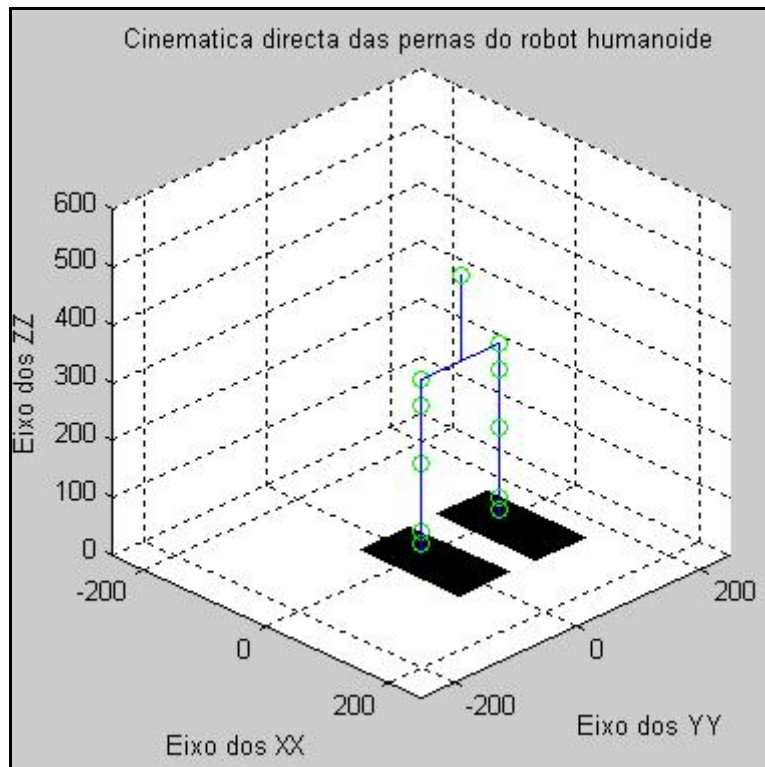


Figura 42 – Cinemática directa das pernas do robot posição inicial.

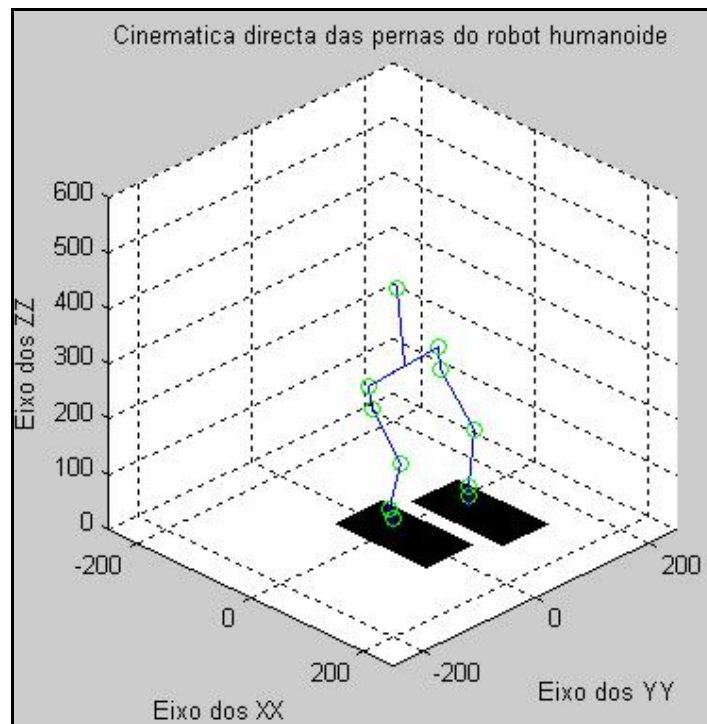


Figura 43 – Cinemática directa das pernas numa dada configuração final de juntas.

4.5. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS

Para a realização da dinâmica é necessário descrever a trajectória que as juntas devem efectuar para o correcto movimento das pernas. E, para desta forma, se obter as velocidades e acelerações ideais para descrever um dado movimento.

Assim podemos dizer que, num sistema robótico, o planeamento de trajectórias é responsável pela geração (em cada intervalo de amostragem) de referências de posição, de velocidade e de aceleração para cada junta. Considera-se a existência de duas abordagens distintas ao planeamento de trajectórias. A primeira dá prioridade ao caminho a executar pelo elemento terminal no espaço operacional, que pode ser ditado pelo conhecimento prévio de obstáculos no espaço de trabalho, ou pela necessidade de percursos obrigatórios pela natureza do processo subjacente. Na segunda abordagem dá-se mais importância à dinâmica do movimento do manipulador, em particular na continuidade e suavidade nas velocidades e acelerações nas diversas juntas para desta forma evitar-se solicitações desmesuradas e irregulares nos respectivos actuadores. Esta abordagem implica definir o planeamento de trajectória das juntas do sistema robótico em causa. [5]

No caso do planeamento de trajectórias das juntas, existem pelo três vantagens que devem ser referidas:

- A trajectória é planeada nas variáveis directamente controladas (variáveis associadas às juntas);
- O planeamento é feito com custos computacionais inferiores;
- As trajectórias de juntas são normalmente fáceis de planificar. [5]

4.5.1. Planeamento de Trajectórias nas Juntas

Planear uma trajectória no espaço das juntas significa determinar a evolução de cada junta ao longo do tempo de tal forma que são verificadas determinadas condições cinemáticas da junta: posição, velocidade e aceleração, no ponto inicial e no ponto final. Ou seja, um movimento deve decorrer desde o instante t_0 até ao instante t_f partindo do valor inicial de junta θ_0 até ao valor final θ_f , com uma velocidade inicial $\dot{\theta}(t_0) = \dot{\theta}_0$ e

uma velocidade final $\dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f$. Podendo ainda desejar-se uma aceleração inicial $\ddot{\theta}(t_0) = \ddot{\theta}_0$ e uma aceleração final $\ddot{\theta}(t_f) = \ddot{\theta}_f$. [5]

Para o cálculo da dinâmica das pernas do robot humanóide foi utilizada a expressão mais geral do planeamento de trajectórias das juntas. Em que, esta expressão é função da continuidade da velocidade, ou seja, no caso mais simples têm-se uma posição de partida e outra de chegada, e as velocidades final e inicial são iguais a zero. Pretende-se assim que, a velocidade angular seja contínua para evitar acelerações teoricamente infinitas e portanto esforços gravosos para os equipamentos físicos. [5]

A expressão utilizada para o planeamento de trajectórias na dinâmica inversa com 10 DOF foi:

$$\theta(t) = \theta_0 + \dot{\theta}_0 t + \left[\frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f} \dot{\theta}_0 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_f \right] t^2 + \left[-\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2} (\dot{\theta}_f - \dot{\theta}_0) \right] t^3 \quad (4.24)$$

As expressões gerais para obtenção das velocidades e acelerações ao longo do tempo, correspondem à primeira e segunda derivada da expressão anterior em ordem ao tempo. [5]

4.5.2. Planeamento nas Juntas com Pontos Intermédios de Passagem

Na simulação cinemática e dinâmica das pernas com 12 DOF, foi utilizado o planeamento nas juntas com pontos intermédios de passagem, visto verificar-se alguns problemas relativamente à trajectória descrita pelo elemento terminal, o pé, que ao mover-se tinha tendência a ir contra o solo. [5]

Por vezes, é necessário especificar uma trajectória onde haja pontos intermédios de passagem da junta (*via points*) onde a sua velocidade não tem necessariamente de ser zero. Um troço completo entre um ponto de partida e um ponto de chegada constituir-se-á, pois, pela concatenação de sucessivas funções individuais, mas agora a velocidade final e inicial nesses diversos troços não é necessariamente nula. Em termos práticos, as posições no espaço das juntas obtém-se por cinemática inversa sobre as configurações dos pontos de passagem no espaço operacional. [5]

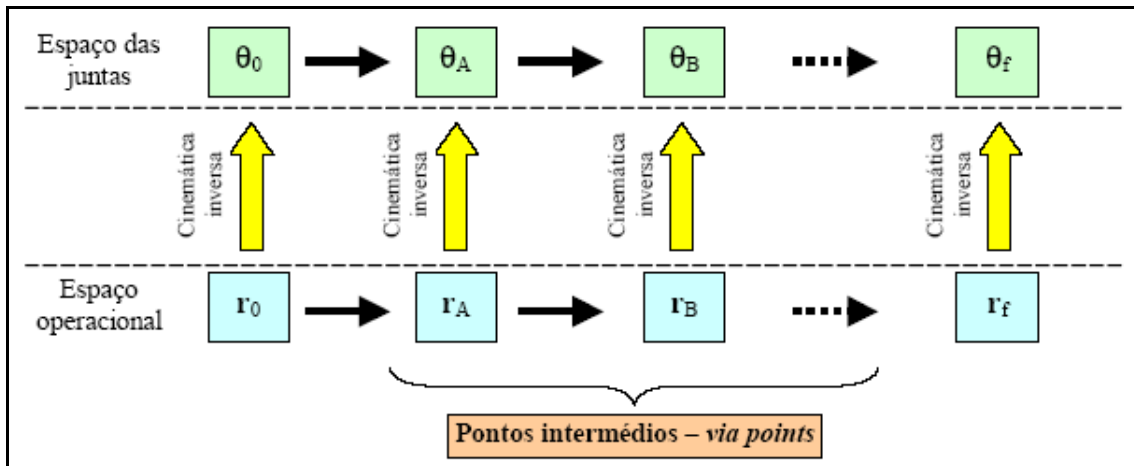


Figura 44 – Método de planeamento nas juntas com pontos intermédios de passagem.[5]

A velocidade das juntas no ponto intermédio será definida aqui, através de uma heurística, cujo princípio é o de fazer uma espécie de interpolação das velocidades médias entre dois troços adjacentes. Por exemplo, se as velocidades médias em dois troços consecutivos (separados pelo *via point*) tiverem sinais diferentes, então o ponto de passagem é tido como o ponto de viragem isto é, velocidade nula. Caso contrário, a velocidade no ponto de passagem é dada pela média das velocidades médias em cada troço de cada lado do *via point*. [5]

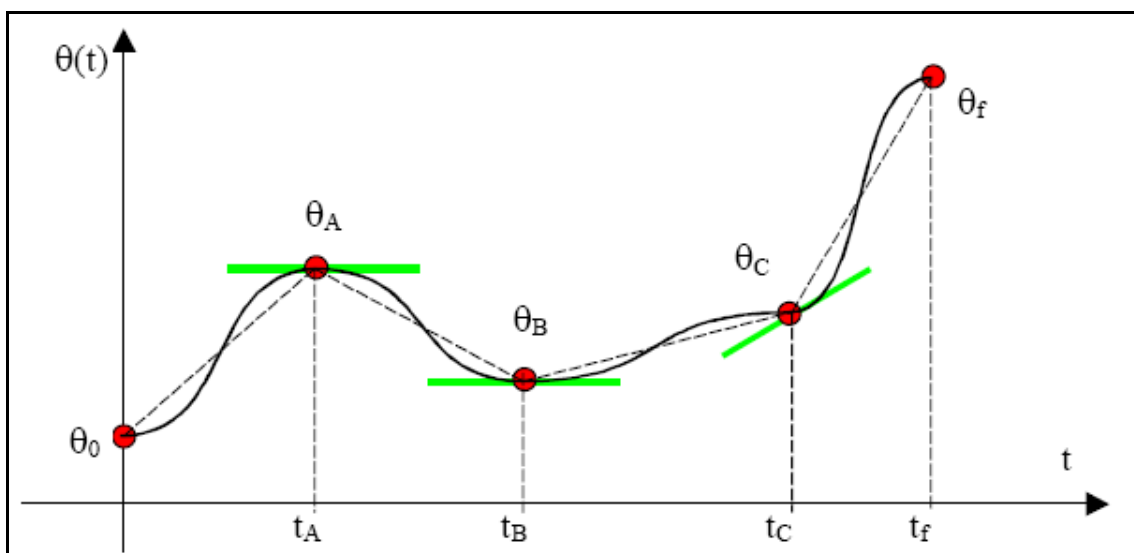


Figura 45 – Processo heurístico de determinação da velocidade de junta nos *via points*. [5]

4.6. BINÁRIOS ESTÁTICOS, 10 DOF

Após obtenção da cinemática directa das pernas para os 10 graus de liberdade, foi acrescentado ao programa o cálculo dos binários nas diferentes juntas.

Os momentos foram calculados através da posição do centro de massa, definida para os diferentes elos, e do somatório das massas distribuídas nos elos que sucedem a junta em estudo.

Para o cálculo do centro de massa, foi calculado inicialmente o centro geométrico consoante a posição dos elos, ao longo da simulação. Estas coordenadas foram obtidas a partir das posições cartesianas das juntas obtidas da cinemática directa.

Finalmente, para efectuar o cálculo dos binários pode-se utilizar a seguinte expressão:

$$\tau_j = \sum_{i=j}^{10} m_i \cdot CM_j \quad (4.25)$$

Calculam-se assim os momentos nas diferentes juntas para uma dada variação de ângulos. Assim por exemplo, para o robot conseguir dar um passo, necessitará da variação de ângulos apresentada na tabela a seguir.

Tabela 44 – Variação de ângulos possível para o robot humanóide dar um passo.

θ	q1L	q2L	q3L	q4L	q5L	q5R	q4R	q3R	q2R	q1R
$\theta_{\text{inicial}} (^{\circ})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\theta_{\text{final}} (^{\circ})$	6	20	-40	20	-5	5	-20	40	-20	-6

Para esta variação de ângulos de junta, obteve-se a seguinte variação inicial e final dos binários exercidos nas juntas.

Tabela 45 – Variação dos binários nas juntas para as configurações de um passo.

τ	τ_{1L}	τ_{2L}	τ_{3L}	τ_{4L}	τ_{5L}	τ_{5R}	τ_{4R}	τ_{3R}	τ_{2R}	τ_{1R}
$\tau_{\text{inicial}} (N.m)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\tau_{\text{final}} (N.m)$	2,82	0,77	0,64	0,59	3,10	1,51	0,19	0,13	0,0	0,27

Estes valores indicam binários elevados nas juntas q1L e q5L pelo que será necessário utilizar de entre as opções disponíveis, os servomotores da Hitec com maior binário possível. Sendo que, o valor do binário deste motor é de 1,9g.cm, o que corresponde em unidades SI a aproximadamente 2N.m.

4.7. CINEMÁTICA DIRECTA DAS PERNAS COM 12 DOF

Durante a elaboração deste projecto obtivemos a prestável colaboração do Professor Doutor Filipe Silva do Departamento de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro. A colaboração deste Professor teve particular ênfase em tudo o que dizia respeito a simulações e modelizações estáticas e dinâmicas.

Ao longo do ano, o Professor desenvolveu variados *softwares* que simulavam a cinemática das pernas do robot humanóide, modelos estes que foram evoluindo com o passar do tempo até se obter dois modelos, um cinemático e um dinâmico com 12 DOF.

Estes modelos foram-nos fornecidos para serem estudados e assim conseguir analisar da melhor forma possível a variação dos binários do robot e movimento do robot durante o passo.

Mas cingindo-nos à cinemática é de referir que o modelo desenvolvido, tem particular relevância para efeitos de visualização dos movimentos das juntas. Dando-se aqui, particular atenção às trajectórias descritas pelo centro de massa total do robot e pelo pé de avanço.

Esta simulação permite ainda visualizar o acto de caminhar completo, algo que não era possível com a cinemática directa das pernas com 10 DOF.

O código desenvolvido para efectuar a simulação cinemática inclui os algoritmos de cinemática inversa e o planeamento de trajectórias nas juntas, movimento ponto a ponto (só simulando o movimento em linha recta).

- **Dados de Entrada**

Os dados de entrada do programa de cinemática com 12 DOF são de seguida especificados:

1) Parâmetros cinemáticos:

- Comprimento do passo, Sl – Avanço do tronco num passo;
- Velocidade de progressão, Vf – Velocidade média na direcção do movimento;
- Altura da anca, Hh – Medida desde o solo até metade da secção da anca;

- Elevação do pé, Fc – Máxima elevação do pé da perna livre;
- Projecção lateral do centro de massa, $COPY$ – Medida em relação ao pé de suporte.

2) Pressupostos/constrangimentos na especificação do movimento:

- Associada à cinemática inversa, restringem-se os movimentos das juntas para que a secção do tronco permaneça na vertical ($q_1+q_5 = 0$ e $q_2+q_3+q_4 = 0$). Estas restrições poderão ser alteradas consoante as tarefas pretendidas, subir escadas, rodar sobre si próprio, etc., sendo que estas duas restrições são exclusivamente utilizadas para execução do passo e no acto de caminhar.
- Para o robot caminhar, na simulação restringe-se a secção do tronco que permanece alinhada $\Rightarrow q_{6L} = q_{6R} = 0$ (todos os pontos com a mesma coordenada XX). Esta restrição para o robot rodar sobre si próprio não seria de todo válida.
- Na fase de suporte singular (SS), a perna livre move-se num plano vertical $\Rightarrow q_5 = 0$ (pelo que é necessário ter cuidado com as dimensões do pé, pois senão estes irão chocar numa fase posterior do passo) e o pé livre permanece paralelo ao solo
- Na fase de duplo suporte a projecção do centro de massa passa para a outra perna (a secção do tronco não progride na direcção do movimento XX)
- O movimento é simétrico ... só se calcula a fase de arranque, o movimento SS e o DS e depois com estes dados forma-se o ciclo completo e todo o movimento seguinte (animacao.m) ...

3) Definição do movimento (matriz MOVETO):

- Cada linha de 8 elementos define a posição Cartesiana final desejada,

MOVETO = [X_{anca} Y_{anca} Z_{anca} $X_{pelivre}$ $Y_{pelivre}$ $Z_{pelivre}$ $Z'_{pelivre}$ SS]

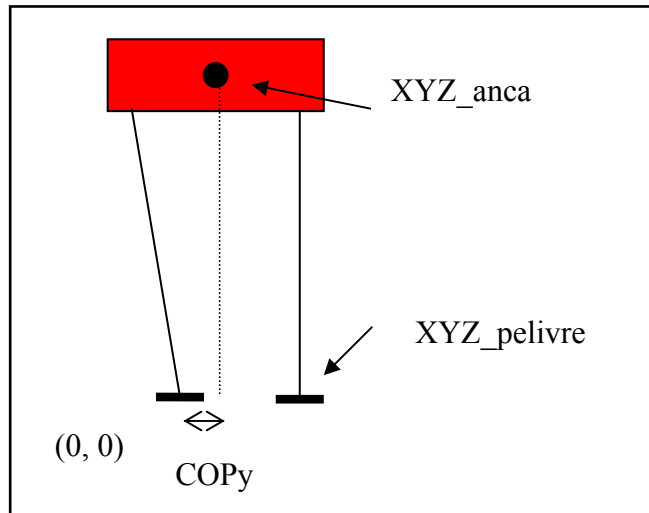


Figura 46 – Definição da posição cartesiana final desejada, dados da matriz resultante da função MOVETO.

- As coordenadas Z_{pelivre} e Z'_{pelivre} são, respectivamente, a posição final para o pé livre e o ponto intermédio de passagem que assegura a sua elevação.
- A última coluna indica se o movimento corresponde a uma fase de suporte singular (SS) ou suporte duplo (DS).
- A coordenada Y_{pelivre} não é usada (já está definida pelas restrições impostas).

Na simulação o robot percorre todo o comprimento do rectângulo azul, representado na figura a seguir. E quando terminado um primeiro percurso existe a possibilidade de continuar a simulação reposicionando-se no ponto de partida. Antes de reiniciar um novo ciclo o utilizador pode rodar a interface de visualização para ver o movimento do robot noutra perspectiva.

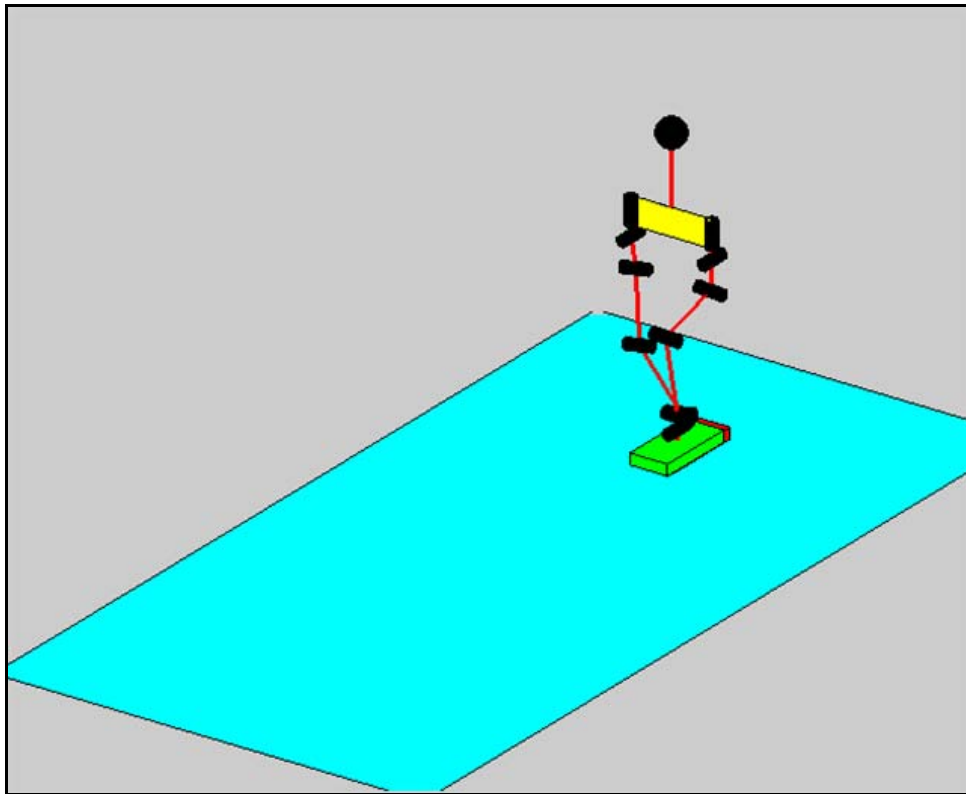


Figura 47 – Posição de partida do robot, o robot percorre o rectângulo azul até à outra extremidade, recomeçando sempre que o utilizador desejar.

Nas imagens da simulação apresentadas a seguir, podem ser vistas as trajetórias descritas pelo pé e pelo centro de massa global.

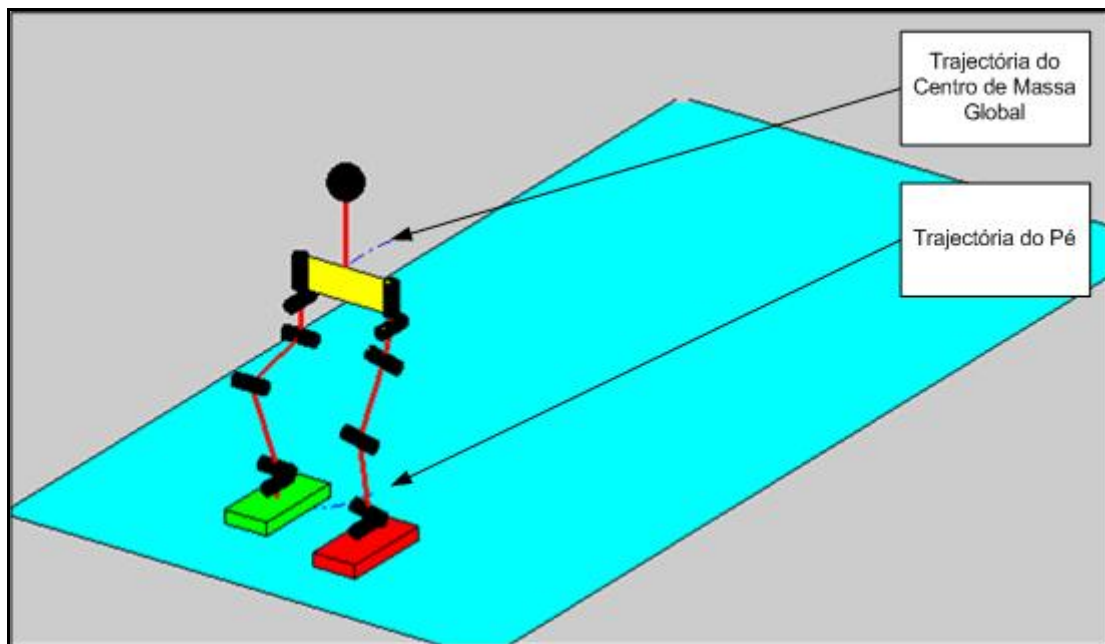


Figura 48 – Descrição das trajetórias do centro de massa global e do pé.

Finalmente, mostramos uma imagem da simulação de outra perspectiva, onde podem também ser vistas as trajectórias do pé de avanço e do centro de massa global do robot.

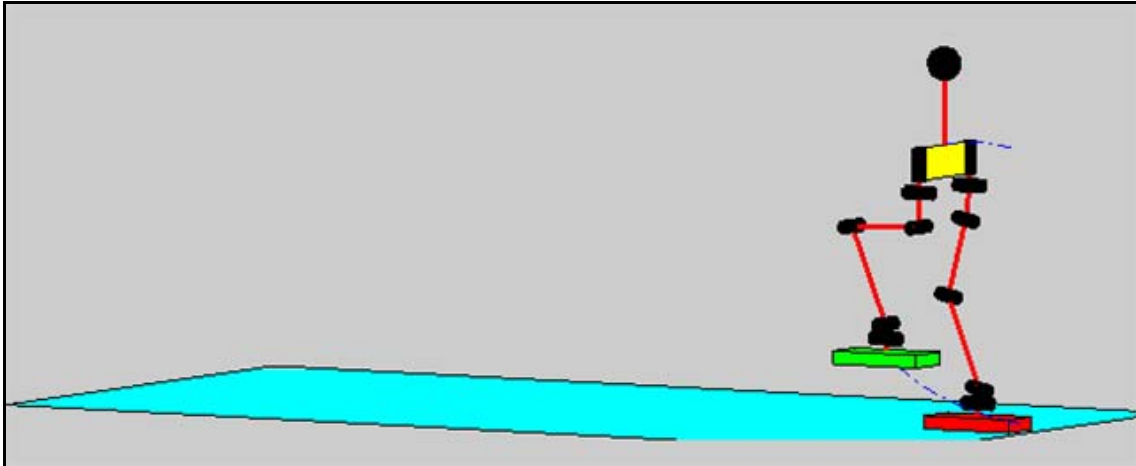


Figura 49 – Vista lateral das pernas do robot, durante a simulação. Com os seguintes dados de entrada: $Sl = 0,12$; $Vf = 0,1$; $Hh = 0,39$, $Fc = 0,03$ e $COPy = 0.0$.

4.8. DINÂMICA INVERSA, 10DOF

A dinâmica de manipuladores robóticos é sem dúvida uma matéria bastante complexa na área da robótica. Existe bastante bibliografia inglesa sobre este tema, a qual permitiria que se passassem anos a estudar todas as formulações da dinâmica existentes.

Ao longo do projecto foram efectuados estudos cinemáticos, análise de forças e momentos estáticos, mas nunca se teve em consideração as forças requeridas para causar movimento. Nesta fase do projecto ter-se-ão em consideração as equações de movimento das pernas do robot e a forma como o movimento das pernas é susceptível aos binários exercidos pelos motores, ou por forças externas aplicadas ao manipulador.

Assim, poder-se-á dizer que, o comportamento dinâmico das pernas do robot é descrito em termos da taxa de tempo de mudança da configuração do braço relativamente aos binários exercidos pelos seus actuadores.

A dinâmica pode ser dividida em dois tipos, dinâmica directa e dinâmica inversa. Na dinâmica directa, a partir de um dado vector de binários aplicados nas juntas, calcula-se

os movimentos resultantes do manipulador. Na dinâmica inversa, dado um vector com as posições das juntas, velocidades e acelerações, calcula-se o vector dos binários das juntas. [1] [3]

Existem três tipos de binários dinâmicos que resultam do movimento de um manipulador:

- **Binários Inerciais** – São proporcionais às acelerações das juntas em concordância com a 2ª lei de Newton; [1] [3]

- **Binários Centrífetos** – Derivam das forças centrífetas que conferem a um corpo o movimento de rotação à volta de um ponto. Os binários centrífetos são proporcionais à raiz da velocidade das juntas; [1] [3]

- **Binários de Coriolis** – Advém das forças dos vórtices que derivam da interacção de duas ligações rotacionais. [1] [3]

As leis básicas da dinâmica podem ser formuladas a partir de princípios base de maneiras diferentes, que incluem as leis de Newton juntamente com o conceito dos trabalhos virtuais, princípio de *D'Alembert's*, as equações de *Lagrange*, equações de *Hamilton's* e princípio de *Hamilton's*. Todas estas formulações são equivalentes, e elas podem ser todas derivadas a partir das leis de Newton e do princípio dos trabalhos virtuais. Em robótica, as duas formulações mais comuns da dinâmica derivam das equações de *Newton-Euler* e de *Lagrange*. [1] [3]

4.8.1. Formulação Lagrangeana para Dinâmica das Pernas

Para se obter a dinâmica das pernas do robot com dez graus de liberdade foi utilizada a formulação Lagrangeana. Descreve-se de seguida sucintamente esta formulação, que se baseia nas energias dissipadas. [1] [3]

- **Energia Cinética** – Começando por desenvolver a expressão da energia cinética de um manipulador. A energia cinética de uma partícula de massa dm localizada no elo i , na posição ${}^i r$ é dada por: [1] [3]

$$dK_i = \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} ({}^i r \cdot dm \cdot {}^i r^T) \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (4.26)$$

A energia cinética do elo i é dada por:

$$K_i = \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \left(\int_{\text{eloi}} {}^i r \cdot {}^i r^T dm \right) \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (4.27)$$

O integral existente na equação anterior corresponde a pseudo matriz de inércias J_i e esta é calculada a partir da seguinte matriz: [1] [3]

$$J_i = \int_{\text{eloi}} {}^i r \cdot {}^i r^T dm = \begin{bmatrix} \int_{\text{eloi}} x^2 dm & \int_{\text{eloi}} x^i y dm & \int_{\text{eloi}} x^i z dm & \int_{\text{eloi}} x dm \\ \int_{\text{eloi}} x^i y dm & \int_{\text{eloi}} y^2 dm & \int_{\text{eloi}} y^i z dm & \int_{\text{eloi}} y dm \\ \int_{\text{eloi}} x^i z dm & \int_{\text{eloi}} y^i z dm & \int_{\text{eloi}} z^2 dm & \int_{\text{eloi}} z dm \\ \int_{\text{eloi}} x dm & \int_{\text{eloi}} y dm & \int_{\text{eloi}} z dm & \int_{\text{eloi}} dm \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

A energia cinética total de um manipulador genérico com n graus de liberdade é: [1] [3]

$$K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial q_j} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k \right] \quad (4.29)$$

- **Energia Potencial** – A energia potencial de um objecto de massa m e com altura h em relação a um referencial inicial é: [1] [3]

$$P = mgh \quad (4.30)$$

Assim, a energia potencial de um elo cujo centro de massa se encontra definido pelo vector posição r_i em relação ao sistema de referência T_i do elo i é dada por: [1] [3]

$$P_i = -m_i g^T T_i^i \bar{r}_i \quad (4.31)$$

onde,

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

e a energia potencial total do manipulador é dada por: [1] [3]

$$P = - \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T T_i^i \bar{r}_i \quad (4.33)$$

- **Lagrangiano** – Através do Lagrangeano $L = K - P$, obtém-se das equações gerais o seguinte resultado: [1] [3]

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial T_i}{\partial q_j} J_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_k} \right) \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k + \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{g}^T T_i^i \bar{r}_i \quad (4.34)$$

Aplicando a equação de Euler Lagrange obtém-se as equações da dinâmica: [1] [3]

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (4.35)$$

- **Equações da Dinâmica** – Após as diferenciações necessárias para solucionar a equação da dinâmica referida anteriormente, e alterando os índices p e i para i e j necessários obteve-se a equação da dinâmica simplificada para um manipulador com n graus de liberdade: [1] [3]

$$\Gamma_i = \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial T_j}{\partial q_k} J_j \frac{\partial T_j^T}{\partial q_i} \right) \ddot{q}_k + \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial q_k \partial q_m} J_j \frac{\partial T_j^T}{\partial q_i} \right) \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k - \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \frac{\partial T_j^j}{\partial q_i} \bar{r}_j \quad (4.36)$$

4.8.2. Cálculo da Dinâmica, 10 DOF

Para efectuar o cálculo da dinâmica através das equações provenientes da formulação de Lagrange, realizou-se um programa em MatLab que, recorrendo a linguagem simbólica disponível neste programa permitiria o cálculo dos momentos exercidos nas juntas a partir dos ângulos de junta e do planeamento de trajectórias especificado.

Assim optou-se pela utilização do planeamento de trajectórias explicado no capítulo 4.6., para descrever o movimento das juntas. E, com o cálculo das matrizes de transformação dos elos, na forma simbólica, obter-se-ia separadamente as expressões finais de cada uma das energias provenientes do cálculo das equações da dinâmica.

Numa fase posterior à obtenção das expressões, estas seriam armazenadas numa *m-file*, na qual iríamos substituir os ângulos de juntas e o intervalo de tempo de execução do movimento, para desta forma obter gráficos da variação dos binários nas diferentes juntas em ordem ao tempo.

Apenas de referir, que foi levado em consideração o cálculo da matriz das pseudo inércias, tendo como princípio que os elos seriam rectângulos, à excepção da junta q5, onde teríamos um elo em forma de T, para incluir o tronco e por sua vez a localização da carga correspondente ao resto do corpo. O elo em forma de T não é a solução mais correcta, mas verificou-se que seria a forma mais simples de efectuar o cálculo das pseudo inércias, devido às duas cadeias cinemáticas abertas existentes para compor a estrutura das pernas e do tronco. As dimensões exteriores foram definidas numa matriz 3×10 , a qual é preenchida na forma simbólica pelas letras w_i , d_i , e h_i onde o índice corresponde às dimensões do elo em causa.

A matriz das pseudo inércias para os elos em causa, terá os seguintes elementos de cálculo:

$$J_i = \begin{bmatrix} m_i \left(\frac{7}{12} l_i^2 + \frac{1}{3} h_i^2 \right) & -m_i \left(\frac{1}{2} w_i l_i \right) & -m_i \left(\frac{1}{4} w_i h_i \right) & m_i x_{CM_i} \\ -m_i \left(\frac{1}{2} w_i l_i \right) & m_i \left(\frac{7}{12} w_i^2 + \frac{1}{3} h_i^2 \right) & -m_i \left(\frac{1}{4} l_i h_i \right) & m_i y_{CM_i} \\ -m_i \left(\frac{1}{4} w_i h_i \right) & -m_i \left(\frac{1}{4} l_i h_i \right) & m_i \left(\frac{7}{12} (w_i^2 + l_i^2) \right) & m_i z_{CM_i} \\ m_i x_{CM_i} & m_i y_{CM_i} & m_i z_{CM_i} & m_i \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

A matriz das pseudo inércias para o elo em forma de T, será dada por:

$$J_i = \begin{bmatrix} m_i \left(\frac{51}{16} l_i^2 + \frac{1}{3} h_i^2 \right) & -m_i \left(\frac{3}{8} w_i l_i \right) & -m_i \left(\frac{1}{4} w_i h_i \right) & m_i x_{CM_i} \\ -m_i \left(\frac{3}{8} w_i l_i \right) & m_i \left(\frac{7}{12} w_i^2 + \frac{1}{3} h_i^2 \right) & -m_i \left(\frac{1}{4} l_i h_i \right) & m_i y_{CM_i} \\ -m_i \left(\frac{1}{4} w_i h_i \right) & -m_i \left(\frac{1}{4} l_i h_i \right) & m_i \left(\frac{51}{12} w_i^2 + \frac{7}{12} l_i^2 \right) & m_i z_{CM_i} \\ m_i x_{CM_i} & m_i y_{CM_i} & m_i z_{CM_i} & m_i \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

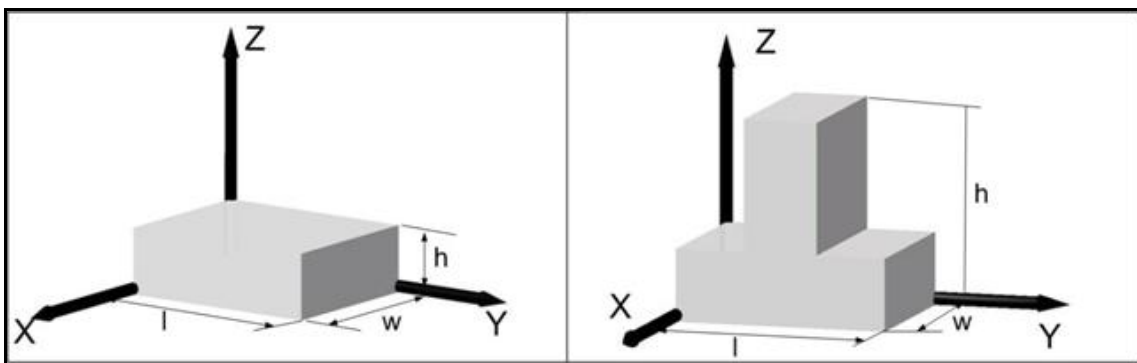


Figura 50 – Elos utilizados para o cálculo da matriz das pseudo inércias.

No diagrama a seguir explica-se sucintamente o funcionamento do programa desenvolvido em MatLab para obtenção das expressões de energias e assim poder-se obter o Lagrangeano para cálculo dos binários exercidos nas juntas.

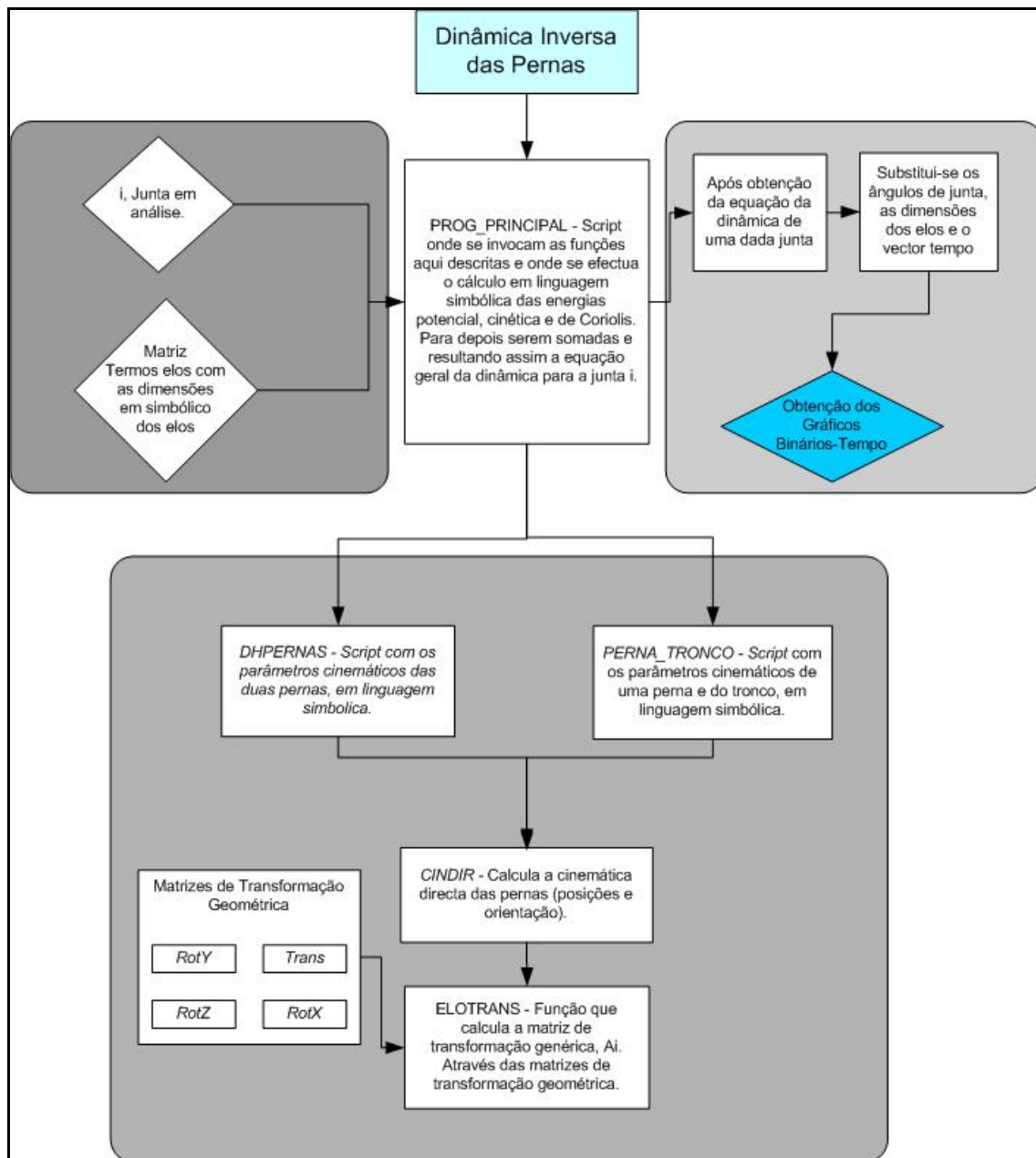


Figura 51 – Diagrama que descreve o funcionamento do programa em MatLab desenvolvido para obtenção dos binários dinâmicos em função do tempo.

Devido à complexidade das duas cadeias cinemáticas abertas, e das formulações da dinâmica, esta tarefa não foi concluída com êxito. Isto deve-se ao facto de o custo computacional requerido para a obtenção das equações ser bastante elevado, implicando que os cálculos das expressões matemáticas da dinâmica não tenham sido bem sucedidos, apesar de o MatLab ser uma ferramenta matemática bastante desenvolvida.

Foram calculadas algumas expressões que se encontravam incompletas, sendo o tempo de cálculo destas expressões aproximadamente 9 horas. É de salientar que

algumas das expressões tinham um tamanho de 20 Megabytes, o que facilmente justifica a não possibilidade de cálculo das expressões da dinâmica, através do método de Lagrange sem utilização de restrições.

4.9. DINÂMICA INVERSA DAS PERNAS COM 12DOF

Aqui pretende-se explicar o funcionamento e os resultados obtidos para a dinâmica inversa das pernas do robot humanóide com 12 graus de liberdade.

Desta forma, o software utilizado permite o estudo e análise da cinemática e dinâmica do robot implementando basicamente, dois algoritmos: 1) Dinâmica inversa através da formulação de Newton – Euler; e 2) Determinação do COG, centro de massa total, e do COP, centro de pressão. De referir que, este estudo permite apenas estudar fases de suporte singular, em que a perna direita será a perna de suporte.

Mas, antes de se referir as diferentes informações relevantes associadas ao software e aos resultados obtidos, é necessário introduzir uma breve explicação da formulação de Newton – Euler. [1] [3]

4.9.1. Formulação de Newton – Euler

Para mover o elemento terminal de um sistema robótico afim de executar uma dada tarefa, o programa de controlo planeia a trajectória convertendo o movimento desejado do elemento terminal numa sequência temporal de configurações das juntas. Para o planeamento desta trajectória, este calcula as forças e os binários aplicados em cada elo utilizando a formulação de Newton – Euler. [1] [3]

As equações de Newton – Euler relacionam as forças e binários com as acelerações e velocidades dos elos levando em conta, as massas, os comprimentos, posições e inércias dos elos. [1] [3]

Considerando um elo isolado n , com forças e binários que actuam sobre este. O referencial do centroíde está localizado no centro de massa, um referencial que está fixo ao elo e move-se em relação a um eixo de referência estacionário (inercial). [1] [3]

As forças e *torques* que actuam no elo fazem com que este se mova, de acordo com as seguintes relações. [1] [3]

$$f_n = \frac{dP_n}{dt} \quad (4.39)$$

$$\tau_n = \frac{dL_n}{dt} \quad (4.40)$$

em que o momento do elo é função da velocidade do centroíde:

$$\text{Momento linear do elo } n: P_n = m_n {}^R v_n \quad (4.41)$$

$$\text{Momento angular do elo } n: L_n = {}^C I_n {}^R \omega_n \quad (4.42)$$

onde,

${}^R v_n$ corresponde à velocidade linear do centroíde em relação ao sistema de referência R;

m_n é a massa do elo n ;

${}^R \omega_n$

${}^C I_n$ é o tensor de inércias no centroíde do elo n em relação ao referencial do centroíde

C. [1] [3]

Para se efectuar o cálculo do binário inercial em qualquer instante, o movimento angular é diferenciado em relação ao tempo: [1] [3]

$$\tau = \frac{dL_n}{dt} = \frac{d}{dt} ({}^C I_n {}^R \omega_n) = {}^C I_n {}^R \alpha_n + {}^R \omega_n \times ({}^C I_n {}^R \omega_n) \quad (4.43)$$

aqui, ${}^R \alpha_n$ é a aceleração angular do elo n , em relação a R.

No caso de elo simétrico, o eixo do referencial do centro de massa é paralelo ao eixo de rotação do elo. E aqui as equações de Euler para o binário no eixo do centro de massa são: [1] [3]

$$\tau_x = {}^C I_x {}^R \alpha_x + ({}^C I_z - {}^C I_y) {}^R \omega_y {}^R \omega_z \quad (4.44)$$

$$\tau_y = {}^C I_y {}^R \alpha_y + ({}^C I_x - {}^C I_z) {}^R \omega_x {}^R \omega_z \quad (4.45)$$

$$\tau_x = {}^C I_z {}^R \alpha_z + ({}^C I_y - {}^C I_x) {}^R \omega_y {}^R \omega_x \quad (4.46)$$

As equações de Newton mostradas a seguir, relacionam a aceleração linear do centro de massa do corpo com a força de d'Alembert que actua no corpo, e as equações de Euler relacionam a velocidade e aceleração angular com o binário que actua no elo. Assim, pode-se dizer que a força actua no centro de massa e o binário actua em volta do eixo que atravessa o centro de massa. [1] [3]

$${}^R f_n = m_n {}^R a_n \quad (4.47)$$

$${}^R \tau_n = {}^C I_n {}^R \alpha_n + {}^R \omega_n \times {}^C I_n {}^R \omega_n \quad (4.48)$$

Finalmente e com as expressões até agora apresentadas para esta formulação, pode-se obter as equações para a situação em que o binário e a força do motor balançam todos os binários e forças aplicados ao elo. A seguinte equação descreve a força na junta em relação ao sistema de referencia. [1] [3]

$${}^R f_{n-1,n} = m_n {}^R a_n + {}^R f_{n,n+1} - m_n {}^R g \quad (4.49)$$

$${}^R T_{n-1,n} = {}^R T_{n,n+1} + {}^R c_{n-1,n} \times {}^R f_{n-1,n} - {}^R c_{n,n} \times {}^R f_{n,n+1} + I_n {}^R \alpha_n + {}^R \omega_n \times I_n {}^R \omega_n \quad (4.50)$$

Substituindo a equação 4.49 na equação 4.50, obtém-se a equação para o binário na junta em relação ao sistema de referência, em termos das acelerações e velocidades do centroíde. [1] [3]

$${}^R T_{n-1,n} = {}^R T_{n,n+1} + {}^R c_{n-1,n} \times m_n {}^R a_n + {}^R p_{n-1,n} \times {}^R f_{n,n+1} - {}^R c_{n-1,n} \times m_n {}^R g + I_n {}^R \alpha_n + {}^R \omega_n \times I_n {}^R \omega_n \quad (4.51)$$

4.9.2. Cálculo e Simulação da Dinâmica, 12 DOF

A simulação e o posterior cálculo da dinâmica, podem ser visualizados através de software desenvolvido em ambiente MatLab. Os parâmetros de entrada desta simulação tal como na cinemática directa das pernas com 12 DOF são:

1) Parâmetros cinemáticos:

- Comprimento do passo, Sl – avanço do tronco num passo;
- Velocidade de progressão, Vf – velocidade média na direcção do movimento;
- Altura da anca, Hh – medida desde o solo até metade da secção da anca;
- Elevação do pé, Fc – máxima elevação do pé da perna livre;
- Projecção lateral do centro de massa, $COPY$ – medida em relação ao pé de suporte.

Os pressupostos e constrangimentos na especificação do movimento também se mantêm, mas agora deixa de ser possível a análise da fase de duplo suporte. O que implica que, mesmo quando o pé de avanço se encontra em contacto com o solo, este não está a suportar o robot. Tal como foi referido anteriormente na secção 4.8., dentro dos constrangimentos especificados as restrições cinemáticas dos ângulos aqui presentes são exclusivamente utilizadas para o acto de caminhar em ambiente não acidentado.

O programa vai guardando os resultados das simulações em ficheiros com o nome *step(n).mat*. A aquisição e consulta destes ficheiros devido, a elevada dimensão e custos computacionais associados à dinâmica é um pouco demorada.

Ainda é importante referir que, é graças aos constrangimentos e pressupostos implementados, que é possível o cálculo dos binários dinâmicos. Sendo que, se estes constrangimentos fossem utilizados no programa de cálculo da dinâmica, para os 10 DOF, seria possível obter as expressões desejadas.

Existe ainda uma consideração a ser tomada em conta, inicialmente os pés encontram-se lado a lado, e o primeiro passo da simulação não deverá ser levado em conta, porque o que se fez foi, recuar a perna de avanço de uma distância igual a metade do passo pretendido, posicionando assim a perna de avanço para posteriormente efectuar um passo completo.

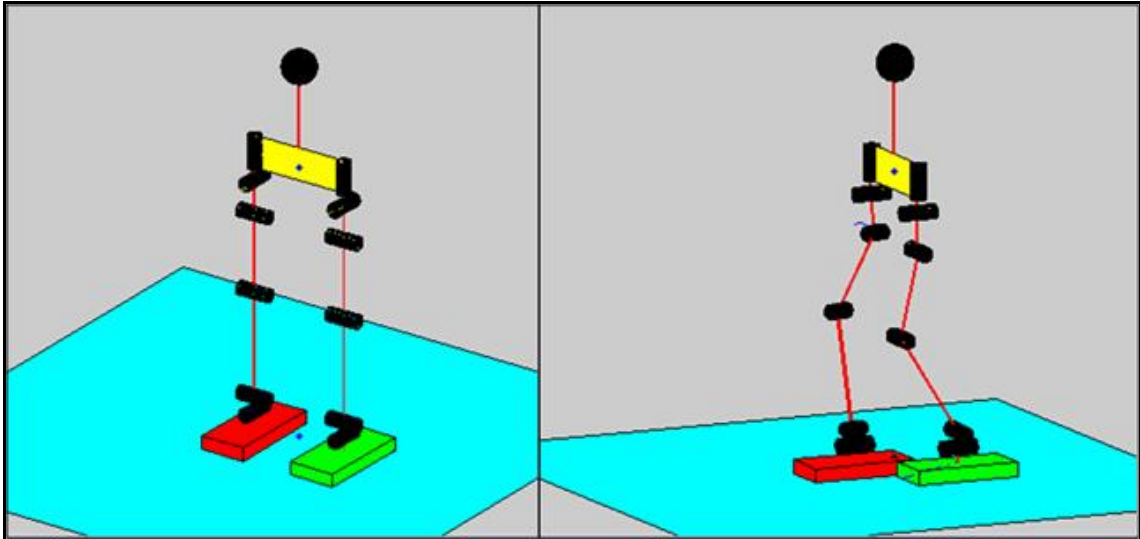


Figura 52 – Posição inicial das pernas, passo inicial para posicionamento do robot.

Mas quando as pernas partem de uma posição em que estas se encontram afastadas, o resultado é óptimo e conseguimos analisar um passo completo do robot.

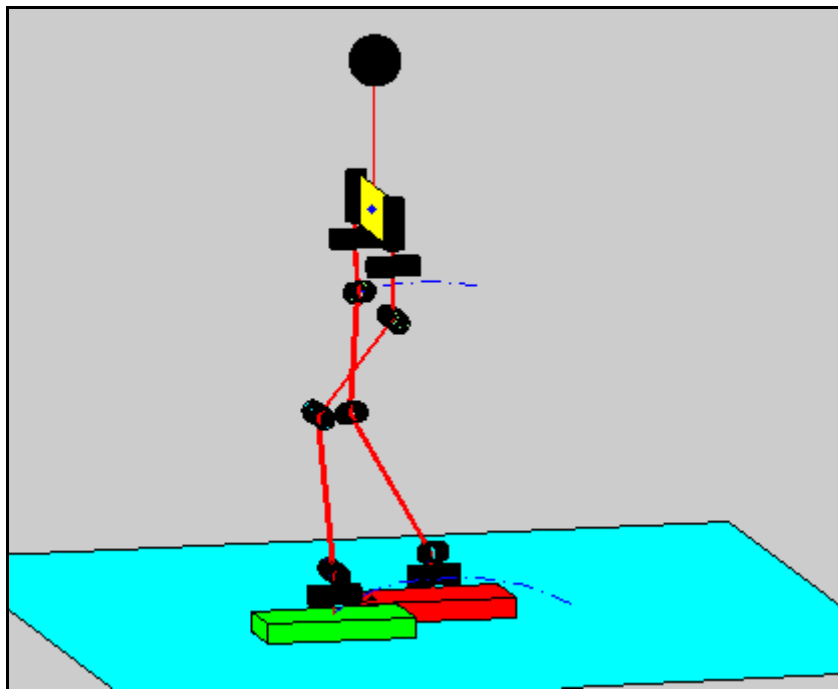


Figura 53 – Fim do passo normal, ambos os pés em contacto com o solo.

Na figura a seguir, podemos ver ainda os pontos, correspondentes ao centro de pressão e centro de massa, e os percursos descritos pelo pé e pela junta q5 da anca da perna de avanço.

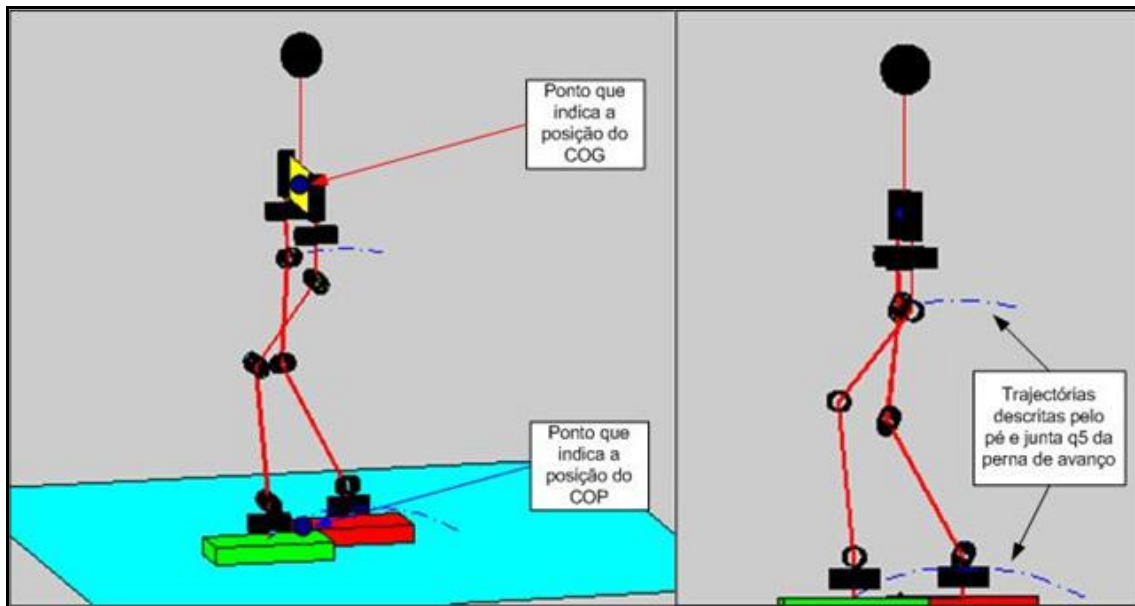


Figura 54 – Pontos que representam o COG e o COP à esquerda e trajetórias efectuadas à direita.

4.9.3. Comportamento do COG e do COP

O equilíbrio é a base de todas as atitudes que o robot tem de tomar: postura e/ou locomoção. O equilíbrio do robot durante a locomoção é garantido quando o centro de projecção da gravidade (COG) na terra é mantido sobre a base de sustentação do robot.

A base de sustentação é limitada pelos limites do pé que se encontra em contacto com o solo, logo o centro de projecção da gravidade deve durante todo o percurso percorrido pelo robot encontrar-se dentro destes limites, para garantir o equilíbrio.

O centro de pressão corresponde ao ponto onde está aplicada a reacção normal ao solo. Este ponto tem de se manter obrigatoriamente na área do pé, pois caso contrário o robot irá inevitavelmente cair. A existência de uma semelhança constante ao longo do tempo entre o centro de massa e o centro de pressão do robot está relacionada com a velocidade de movimento do robot, ou seja, se a velocidade do robot tender para zero as coordenadas do COG e do COP serão as mesmas. Para o caso de velocidades de progressão das pernas muito elevadas, existe um desfasamento bastante superior entre estes dois parâmetros.

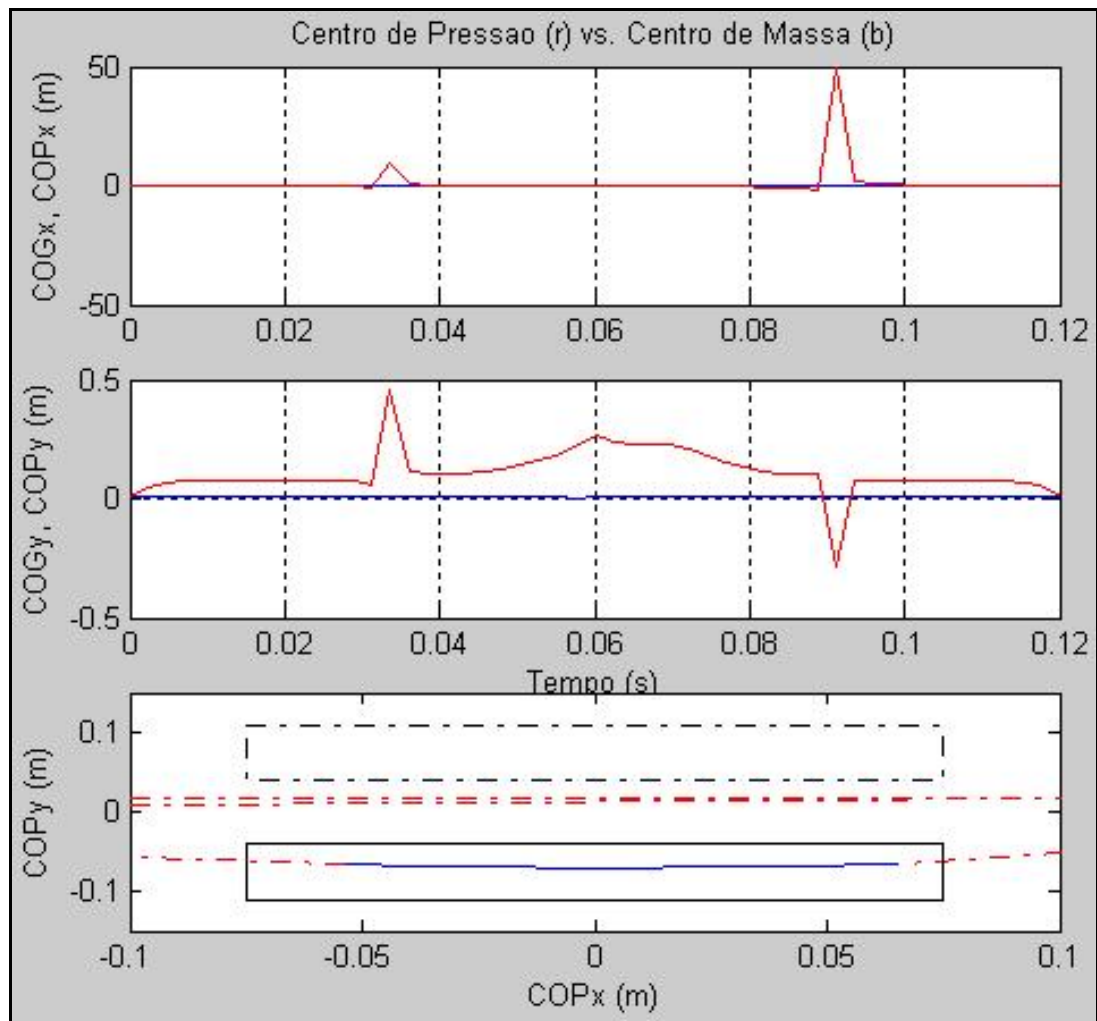


Figura 55 – Comportamento do COG e do COP para uma velocidade de progressão de 1m/s.

Para que o robot possua um movimento mais estável, o centro de massa e o centro de pressão têm que manter continuamente as mesmas coordenadas ou apresentarem um desfasamento entre estas muito reduzido.

Na figura a seguir poder-se-á ver o comportamento do centro de massa e do centro de pressão ao longo do tempo para um passo normal de comprimento 0,12m, sendo que é importante verificar que no terceiro gráfico da figura, o rectângulo a traço contínuo corresponde ao pé de suporte e que o rectângulo a traço interrompido corresponde ao pé de avanço.

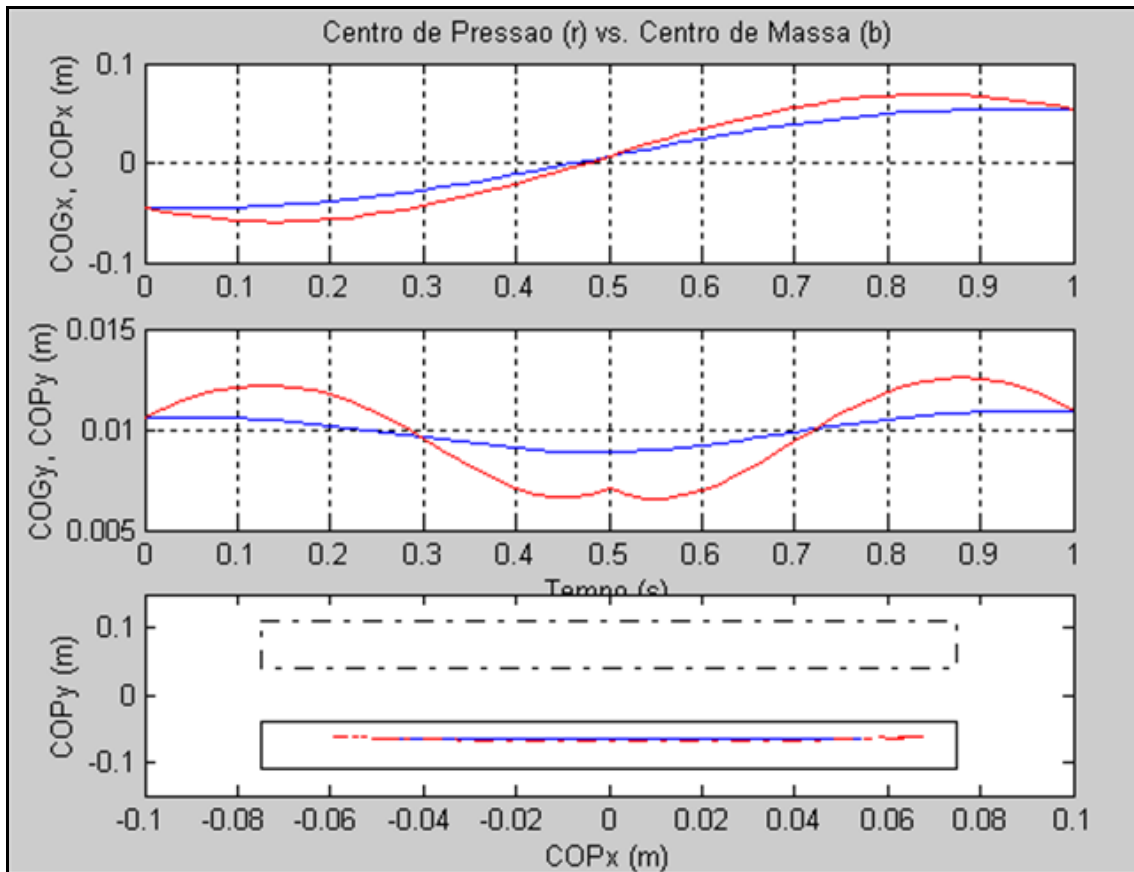


Figura 56 – Gráficos com o COG e o COP em função do tempo e posição destes no plano xy .

Como era desejado o passo dado na simulação, apresenta uma pequena variação entre as coordenadas do centro de gravidade. Esta pequena variação revela-se numa estável movimentação do robot.

4.9.4. Análise dos Binários Dinâmicos

Na secção 4.7. deste documento foi especificado o cálculo e os valores dos binários obtidos para as diferentes juntas, para o robot dar um passo. Uma vez que, os valores obtidos eram em algumas juntas bastante elevados, decidiu-se realizar o cálculo dos binários através da dinâmica.

A realização da dinâmica prevê que os momentos nas juntas para executar um mesmo passo, sejam inferiores. Sendo que, desta forma poder-se-á garantir que os motores escolhidos juntamente com as relações de transmissão utilizadas têm um binário suficientemente elevado para efectuar o movimento das pernas.

Para a simulação utilizou-se então a formulação de Newton – Euler e os seguintes parâmetros de entrada:

- Comprimento do Passo: 0,12m;
- Velocidade de Progressão: 0,1m/s;
- Altura da Anca: 0,39m;
- Elevação do Pé: 0,1m;
- Dimensão do vector tempo: 50 unidades.

Os resultados obtidos para o passo normal, podem ser representados através do seguinte gráfico:

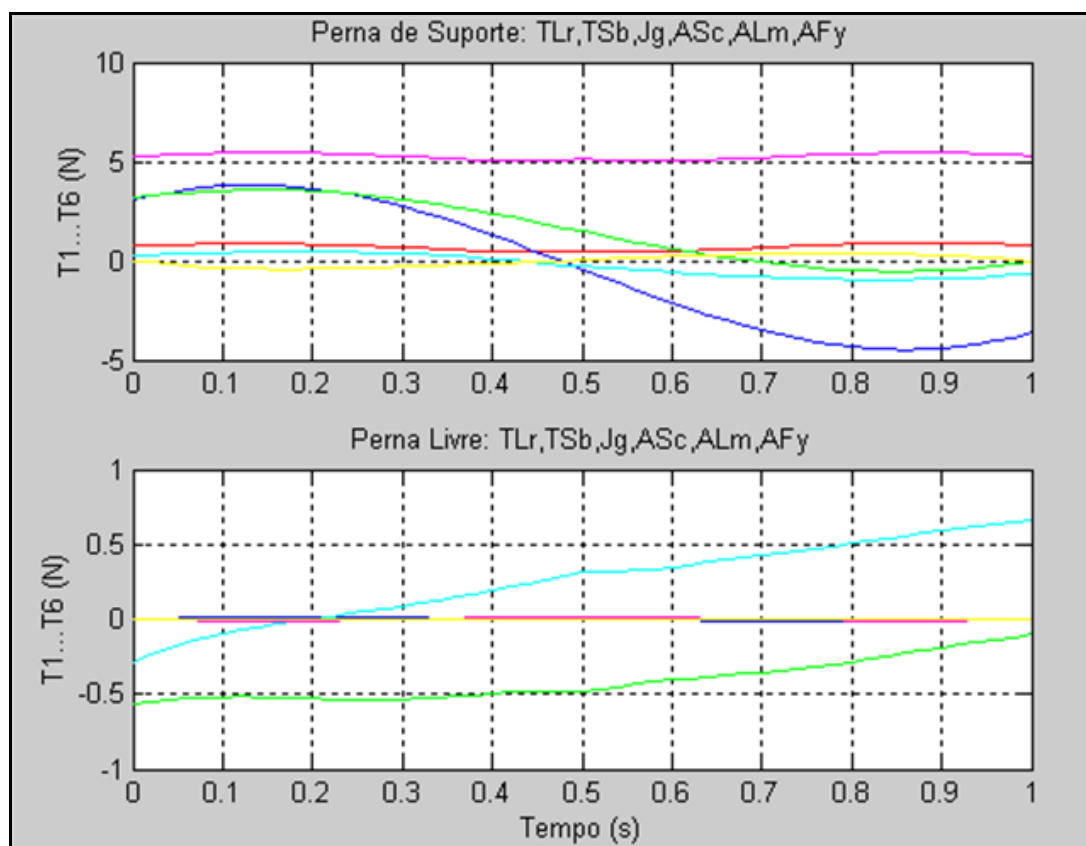


Figura 57 – Gráfico dos binários na perna de suporte e na perna livre ao longo do tempo.

Os valores máximos dos momentos obtidos durante a simulação, foram assim os apresentados na tabela a seguir.

Tabela 46 – Variação do binário exercidos nas juntas para as configurações de um passo na perna de suporte.

τ_{\max} (N.m)	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6
Perna Suporte	0,8932	3,8128	3,5709	0,4513	5,4398	0,3841
Perna Avanço	0,0002	0,0137	-0,0987	-0,6628	0,0134	0,0023

A variação dos ângulos de junta para a perna de suporte e para a perna livre podem ser visualizados nos gráficos a seguir apresentados. Podendo assim observar-se que existem algumas juntas cuja contribuição para o passo normal efectuado é nula, e outras juntas que depois de posicionadas no passo inicial não se movem, sendo que a sua contribuição para manter a estabilidade existe mas, não se altera ao longo de todo o passo.

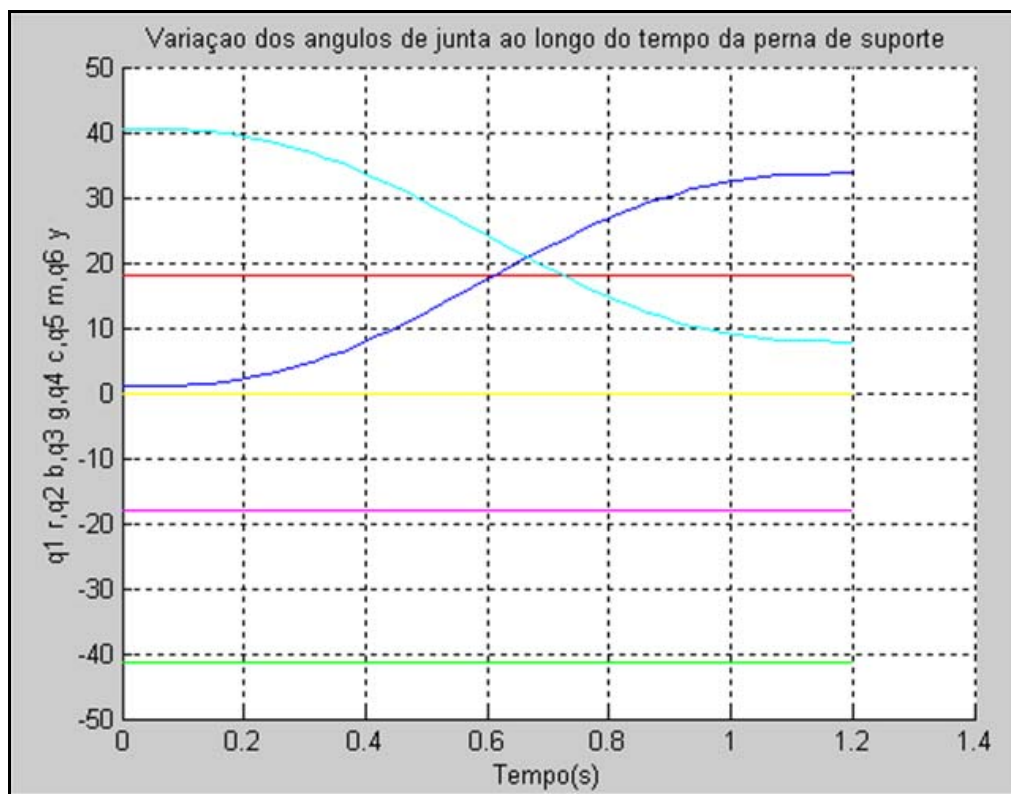


Figura 58 – Variação dos ângulos de junta ao longo do tempo da perna de suporte

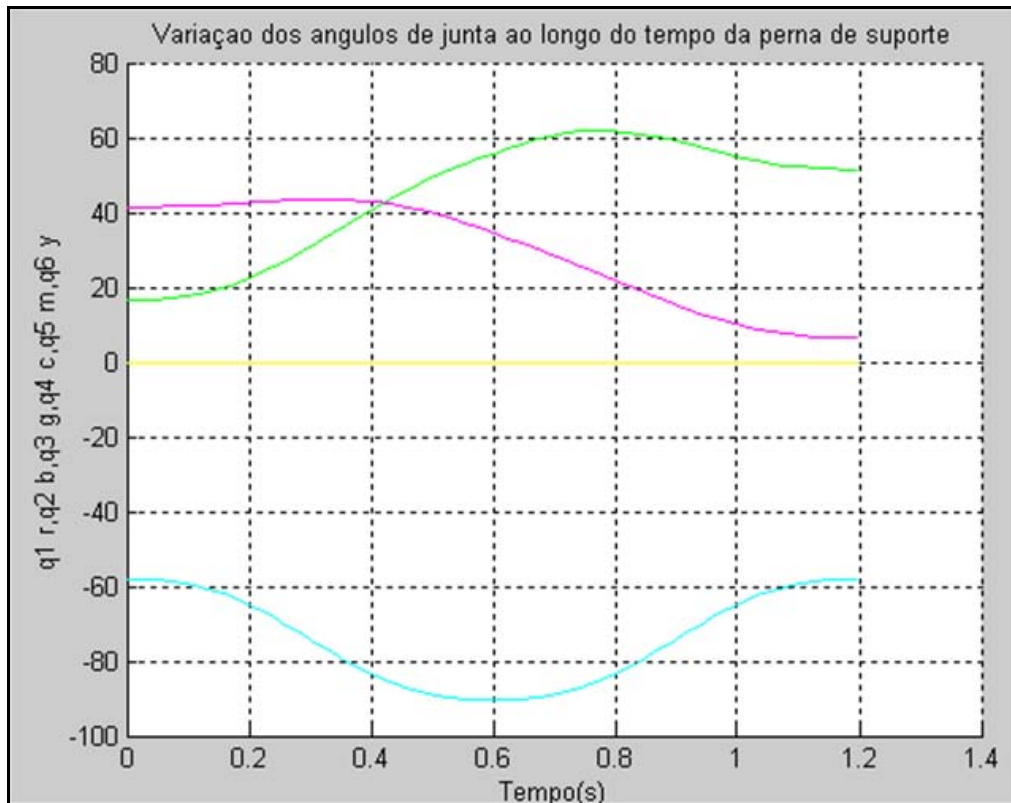


Figura 59 – Variação dos ângulos de junta ao longo do tempo da perna de avanço para o passo normal resultante da simulação dinâmica.

4.10. COMPARAÇÃO DOS BINÁRIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS

Compararam-se os resultados obtidos para os binários da simulação estática e da simulação dinâmica. Verificou-se que na simulação dinâmica um dos constrangimentos é que para a realização do passo não é necessário a utilização da junta q6 nem na perna de suporte nem na de avanço. Assim, iremos comparar os momentos exercidos nas cinco juntas analisadas na cinemática e na dinâmica para a mesma variação de ângulos de junta.

Para isto, foi substituído na cinemática directa das pernas com 10 DOF, os ângulos de junta obtidos na dinâmica através de cinemática inversa para realização do passo de um comprimento S1.

Os gráficos seguintes permitem comparar as curvas obtidas sendo que, a tracejado encontram-se os valores resultantes da análise estática e a traço contínuo os valores da dinâmica.

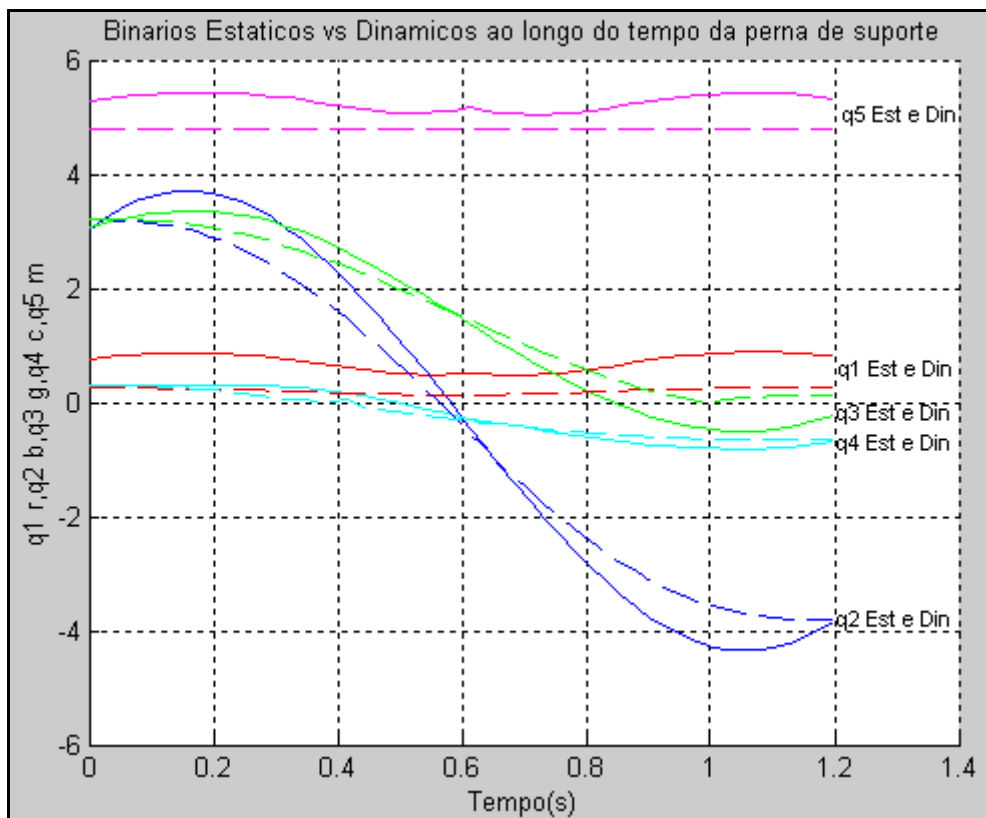


Figura 60 – Gráfico da variação dos binários estáticos e dinâmicos para o passo normal.

Verificou-se que os momentos estáticos e dinâmicos não são significativamente diferentes, mas, ao contrário do esperado os momentos estáticos são ligeiramente inferiores aos momentos dinâmicos. Isto poder-se-á justificar com a diferença dos comprimentos dos elos, já que na simulação estática a junta q6 não é considerada. Assim, a junta q5 está posicionada no local da junta q6, não estando de acordo com o modelo dinâmico. Aconselha-se posteriormente a realização do cálculo dos binários estáticos para 12 DOF, obtendo-se assim a confirmação da correcta simulação.

A margem de erro em relação aos binários dos motores não é muito elevada, mas utilizando relações de transmissão nas juntas mais solicitadas, é considerada suficiente para fundamentar a escolha dos motores.

Apenas para melhor visualização dos valores obtidos e para melhor fundamentar a escolha, apresenta-se na tabela a seguir, os valores máximos obtidos para as várias juntas em ambas as simulações.

Tabela 47 – Variação do binário exercidos nas juntas para as configurações de um passo na perna de suporte.

τ_{\max}	τ_{1L}	τ_{2L}	τ_{3L}	τ_{4L}	τ_{5L}
Estática	0,25	3,2	3,3	0,29	4,8
Dinâmica	0,8932	3,8128	3,5709	0,4513	5,4398

Tabela 48 – Variação do binário exercidos nas juntas para as configurações de um passo na perna de avanço.

τ_{\max}	τ_{1R}	τ_{2R}	τ_{3R}	τ_{4R}	τ_{5R}
Estática	0,000	0,0002	0,0682	-0,1252	0,0112
Dinâmica	0,0002	0,0137	-0,0987	-0,6628	0,0134

4.11. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO

Nesta fase do documento pretende-se abordar a definição de padrões de movimentação para o robot realizar tarefas específicas. A tarefa principal para a qual foi definido um padrão de movimentação das juntas foi, o passo.

Verificamos nesta fase, a existência de algumas restrições relativamente ao modo de locomoção do robot, que segundo alguma bibliografia encontrada, dividia a locomoção dos robots bípedes em dois tipos: andar estático e andar dinâmico.

A diferença entre eles é a maneira como o sistema se mantém em equilíbrio, ou seja, se o centro de massa projectado verticalmente está sempre dentro do polígono de suporte formado pelos pés. [21] [26]

- **Estático** – Neste tipo de locomoção o centro de massa está sempre projectado verticalmente dentro do polígono de suporte formado pelos pés. Na figura abaixo o centro de massa projectado no pé é representado por um quadrado preto. [21] [26]

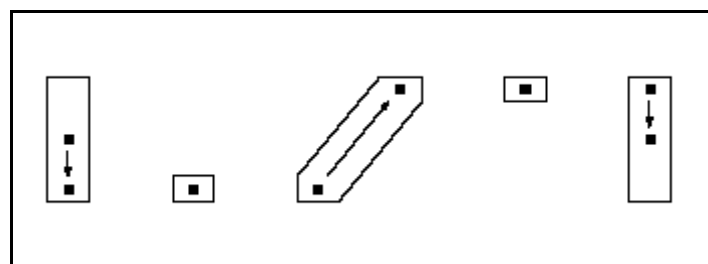


Figura 61 – Exemplo de andar estático. [21]

Para se conseguir este tipo de andar, os robots desta classe têm geralmente pés grandes e movem-se lentamente. Como este tipo de locomoção é estável, ou seja o robot não se desequilibra, permitindo que o robot tenha uma estrutura cinemática mais simples. O robot não necessita de utilizar motores com elevados binários, pois não é necessário reagir rapidamente a uma situação de desequilíbrio. Por outro lado, o andar resultante como já foi referido é lento e apenas pode ser utilizado para situações muito bem definidas, o que limita a aplicação dos robots, aquando da existência de obstáculos no terreno. [21] [26]

- **Dinâmico** – O centro de massa pode sair de dentro do polígono de suporte por algum período de tempo. Contudo, estes períodos de tempo têm que ser curtos e estritamente controlados para que o sistema não se torne instável. Devido a existência de uma locomoção dinâmico o robot deve estar constantemente em movimento para não se desequilibrar. [21] [26]

Um exemplo deste tipo de locomoção é a locomoção usada pelos seres humanos. Durante parte do andar, os dois pés encontram-se em contacto com o solo o que proporciona grande estabilidade. Durante a outra parte do andar um pé está no ar, e se esta configuração se mantém o ser humano poder-se-á desequilibrar e cair. Este tipo de andar é obviamente mais robusto e pode ser usado em terrenos acidentados, mas também exige uma maior complexidade mecânica, e actuadores com binários mais elevados. [21] [26]

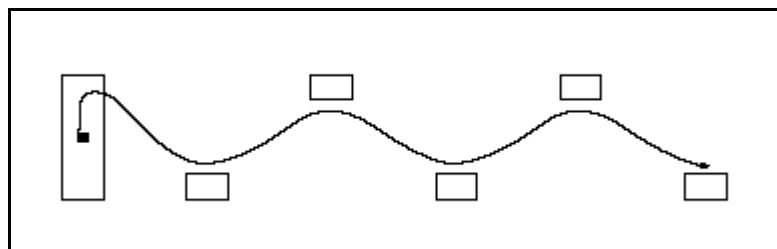


Figura 62 – Exemplo ilustrativo do andar dinâmico. [21]

Numa fase inicial e devido a grande dificuldade de implementar um andar dinâmico às pernas do robot optamos, pelo estudo e posterior aplicação do andar estático. Para isto, verificou-se a necessidade de estudar as diversas fases do passo, que será explicada no sub capitulo a seguir. [21] [26]

4.11.1. Fases do Passo

O acto de caminhar é um movimento repetitivo que podemos dividir em 2 fases principais que alternam para cada perna, a medida que se produz o movimento.

Assim a primeira fase do acto de caminhar corresponde a fase de suporte em que ambos os pés se encontram em contacto com o solo. Nesta fase o robot está estável devido ao suporte da base dos pés. O sistema entra nesta fase quando o pé de avanço contacta o chão e deixa esta fase quando o pé de suporte deixa de estar em contacto com o chão. [21] [26]

Na segunda fase apenas um dos pés se encontra em contacto com o solo. Durante esta fase o centro de massa do robot passa sobre o ponto de contacto como um pêndulo invertido, enquanto a perna de avanço se movimenta em preparação para tomar contacto com o chão. Mas, como se trata de um andar estático o centro de massa total do robot encontra-se projectado sobre a área do pé de suporte. [26]

Existe a preocupação de entrar em consideração com o facto de, inicialmente os pés de apoio e de avanço poderem encontrar-se paralelos ou afastados, de uma distância igual ao comprimento do passo pretendido. [26]

Assim, existe a necessidade de subdividir o passo em três tipos:

- Passo inicial;
- Passo normal;
- Passo final.

O robot quando se encontra na posição de repouso possui ambos os pés colocados lado a lado. É desta posição que o robot parte para efectuar o passo inicial em que o comprimento do passo corresponderá a metade do comprimento normal. O passo final é o regresso do robot a posição de repouso. [21] [26]

O passo pode ser dividido em quatro etapas principais, estas etapas correspondem basicamente a posições das pernas ao longo do passo:

- **Primeira fase** – O robot encontra-se com ambos os pés assentes no solo;
- **Segunda fase** – O pé de avanço deixa o solo, movendo as juntas o necessário para deslocar o centro de massa total do robot para o pé de suporte;
- **Terceira fase** – Nesta fase do passo, o pé de avanço ultrapassa o pé de apoio mantendo sempre o centro de massa projectado na superfície do pé de suporte.

- **Quarta fase** – Aqui, o pé de avanço entra em contacto com o solo, não sendo obrigatório que os pés se encontrem em posições paralelas. [21] [26]

Nos esquemas seguintes é possível observar melhor como se processa o passo. A perna de suporte está representada a traço interrompido, enquanto a perna de avanço é sinalizada a traço contínuo. [21] [26]

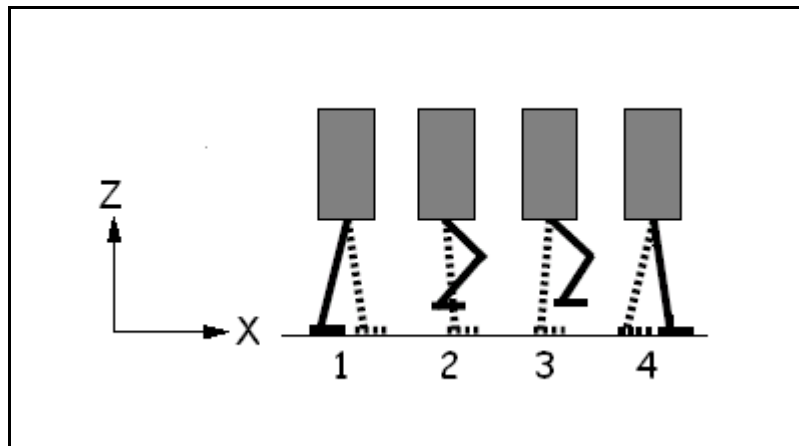


Figura 63 – Passo normal visto no plano ZX (sagital). [26]

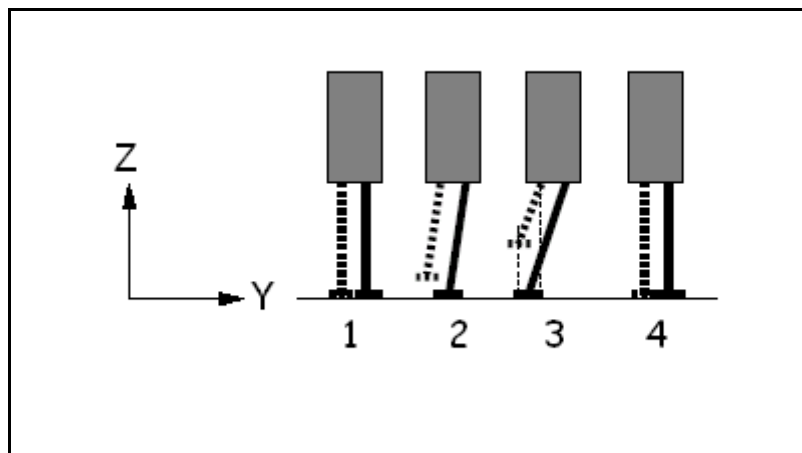


Figura 64 – Passo normal visto no plano ZY (frontal). [26]

Podemos observar as várias fases do passo associadas aos tipos de passo existentes, através do diagrama apresentado na figura a seguir.

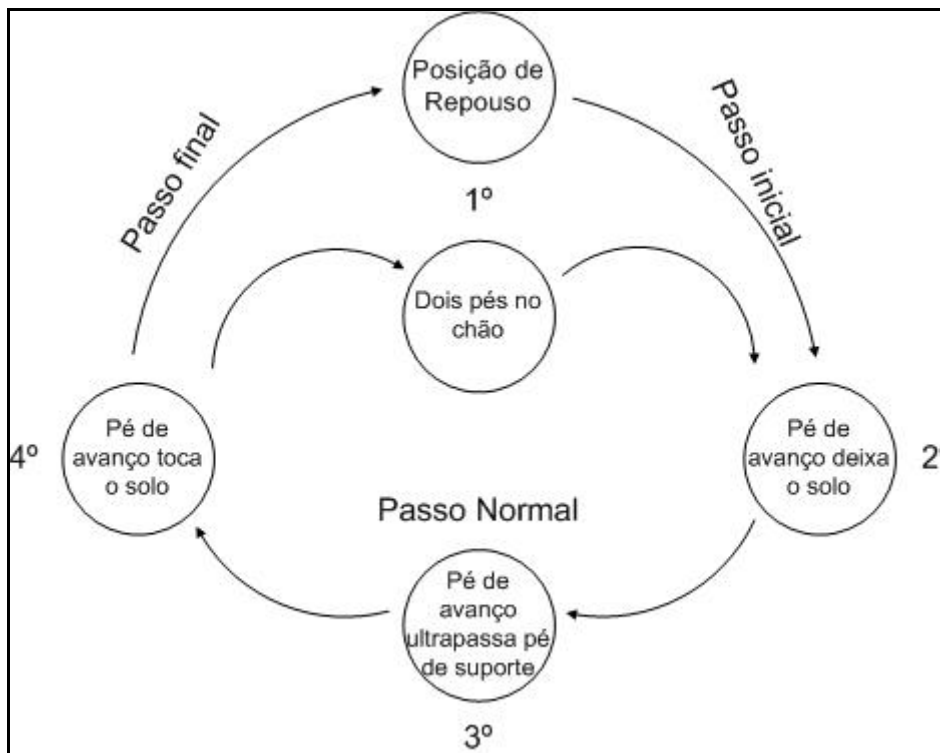


Figura 65 – Fases do passo e tipos de passo para locomoção estática.

Para visualizar-se os passos especificados foi desenvolvida uma simulação em ambiente MatLab, através do programa de cinemática directa das pernas.

- **Passo Inicial** – Podemos ver através da sequência de imagens abaixo as diferentes fases do passo inicial. Às imagens estará associado o texto necessário para explicar o que acontece nas juntas em cada fase.

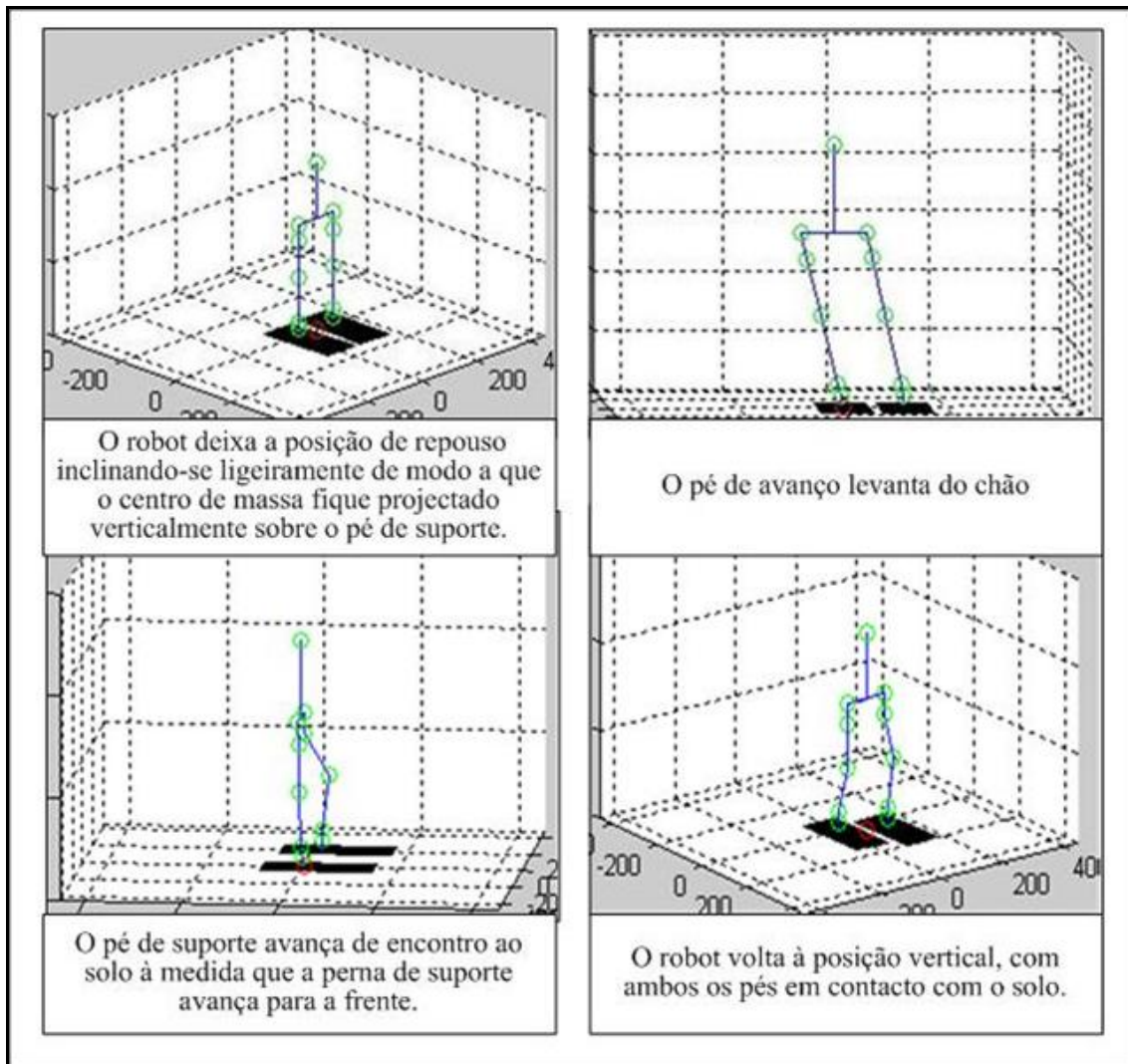


Figura 66 – Fases do passo inicial, imagens obtidas da simulação.

- **Passo Normal** – Nesta tipo de passo, tal como foi referido o robot parte de uma posição em que os pés não se encontram lado a lado. Assim sendo, após sair da posição de repouso o robot encontra-se em posição para dar início à sequência de movimentos a que corresponde o passo normal.

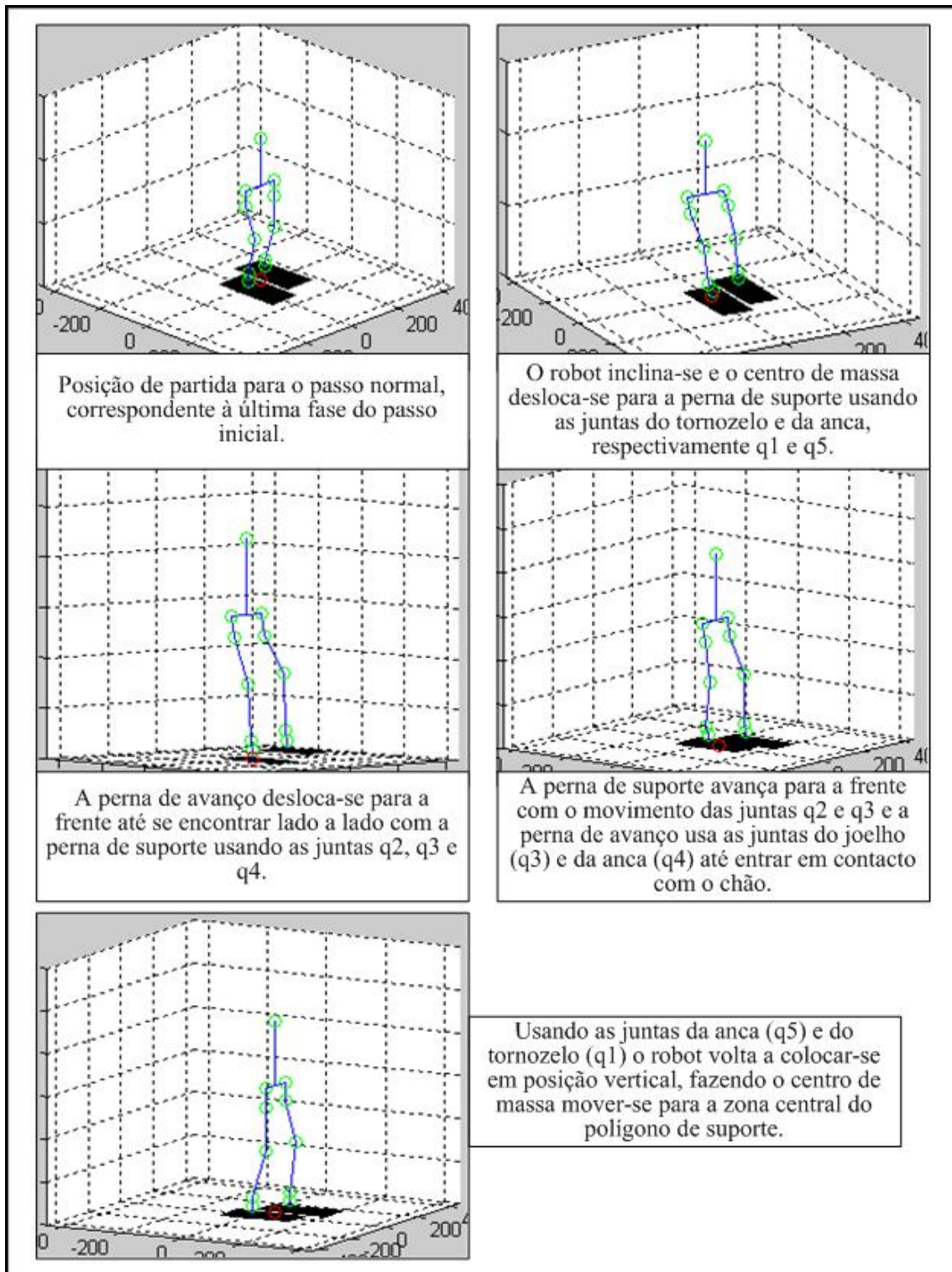


Figura 67 – Esquema com as diferentes fases do passo normal.

Depois de se descrever e ilustrar as diferentes fases do passo, será importante referir qual a variação das diferentes juntas, para realização de cada um dos passos. Assim utilizaram-se os seguintes ângulos de junta para a realização de cada um dos passos.

Tabela 49 – Ângulos de junta utilizados para o passo inicial.

Passo Inicial	
Perna de Suporte	Perna de Avanço
$Q_i = [0, 0, 0, 0, 0];$	$Q_i = [0, 0, 0, 0, 0];$
$Q_A = [15, 0, 0, 0, -15];$	$Q_A = [-15, 0, 0, 0, 15];$
$Q_B = [15, 0, 0, 0, -15];$	$Q_B = [-15, -10, 40, -30, 15];$
$Q_C = [15, 20, -20, 0, -15];$	$Q_C = [-15, -10, 30, -20, 15];$
$Q_D = [0, 20, -20, 0, 0];$	$Q_D = [0, -10, 30, -20, 0];$

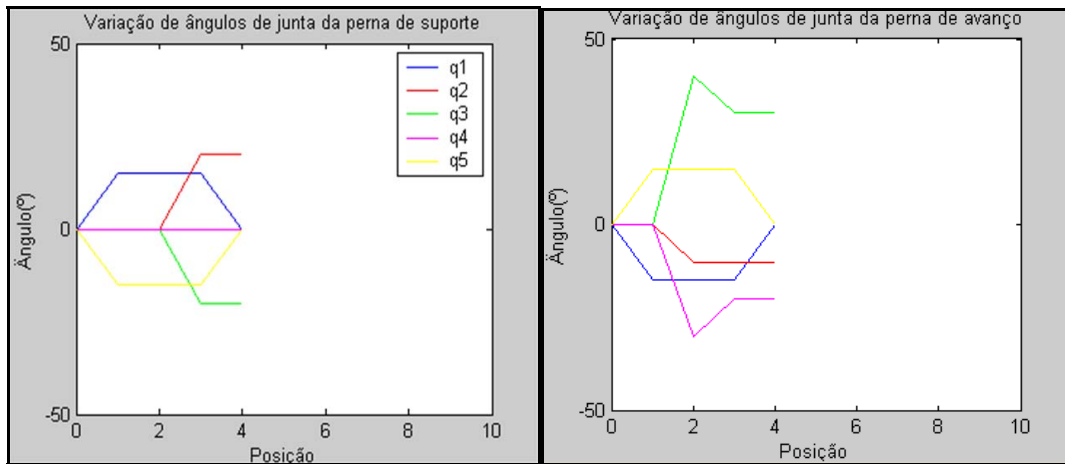


Figura 68 – Variação dos ângulos de junta para realização do passo inicial. Perna de Suporte à esquerda e perna de apoio à direita.

De seguida, apresenta-se a variação de ângulos de junta para a perna de suporte e para a perna de apoio quando efectuado o passo normal.

Tabela 50 – Ângulos de junta utilizados para o passo normal.

Passo Normal	
Perna de Suporte	Perna de Avanço
$Q_i = [0, 10, -30, 20, 0];$	$Q_i = [0, -20, 20, 0, 0];$
$Q_A = [15, 10, -30, 20, -15];$	$Q_A = [-15, -20, 20, 0, 15];$
$Q_B = [15, 10, -30, 20, -15];$	$Q_B = [-15, -10, 50, -40, 15];$
$Q_C = [15, 20, -20, 0, -15];$	$Q_C = [-15, -10, 30, -20, 15];$
$Q_D = [0, 20, -20, 0, 0];$	$Q_D = [0, -10, 30, -20, 0];$

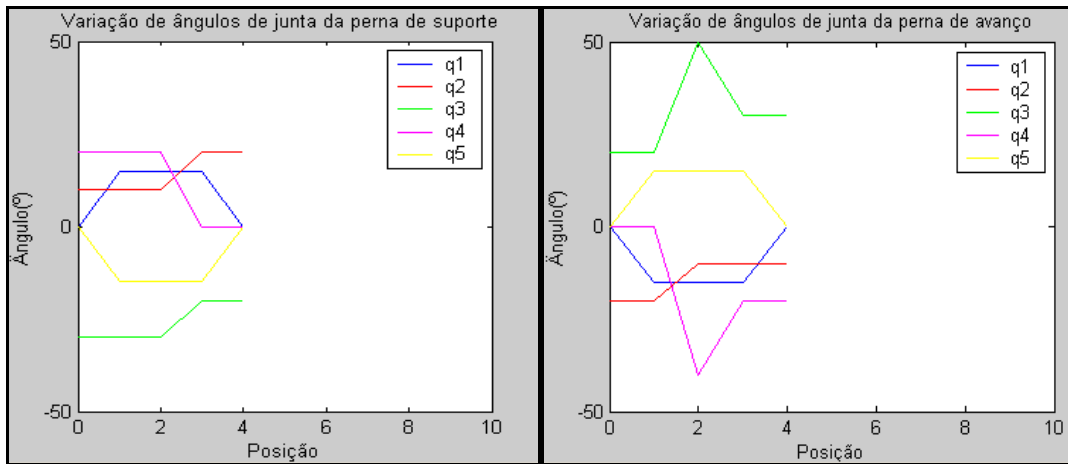


Figura 69 - Variação dos ângulos de junta para realização do passo normal. Perna de Suporte à esquerda e perna de apoio à direita.

4.11.2. Variação do Centro de Massa (CM)

A localização do centro de massa durante as várias fases do passo é de importância vital já que, como se pretendia que a locomoção seja do tipo estático, se o CM por algum momento sair de dentro da área de sustentação do pé de suporte o sistema entrará em desequilíbrio e o robot irremediavelmente irá cair.

Durante o caminhar o CM move-se do centro, onde se encontrava à mesma distância tanto do pé esquerdo como do pé direito, para se colocar dentro da área do pé de suporte. De seguida move-se para a frente devido ao deslocamento da perna de avanço e posteriormente da perna de suporte que atira o corpo para a frente dando-se aqui a maior variação. Neste momento o robot já possui ambos os pés no solo e o CM vai-se deslocar para a posição inicial, ou seja o centro.

O rectângulo a traço contínuo na figura a seguir representa o pé de suporte enquanto o rectângulo a tracejado representa o pé que se encontra no ar.

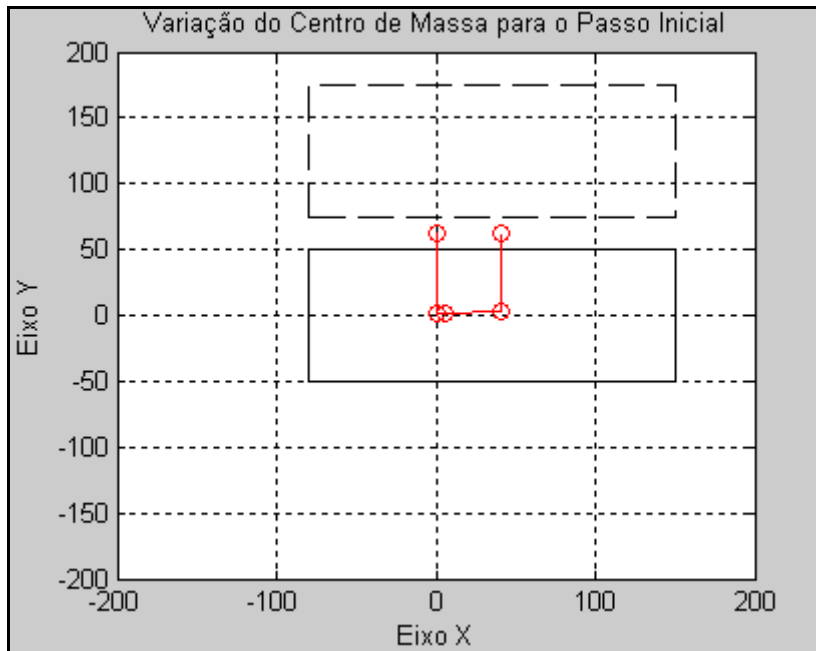


Figura 70 – Variação do centro de massa para o passo inicial.

O gráfico da variação do CM para o passo normal é quase idêntico ao do passo inicial, com a exceção de a amplitude da variação segundo o eixo dos XX do passo normal ser ligeiramente superior. Isto deve-se essencialmente ao comprimento do passo ser maior.

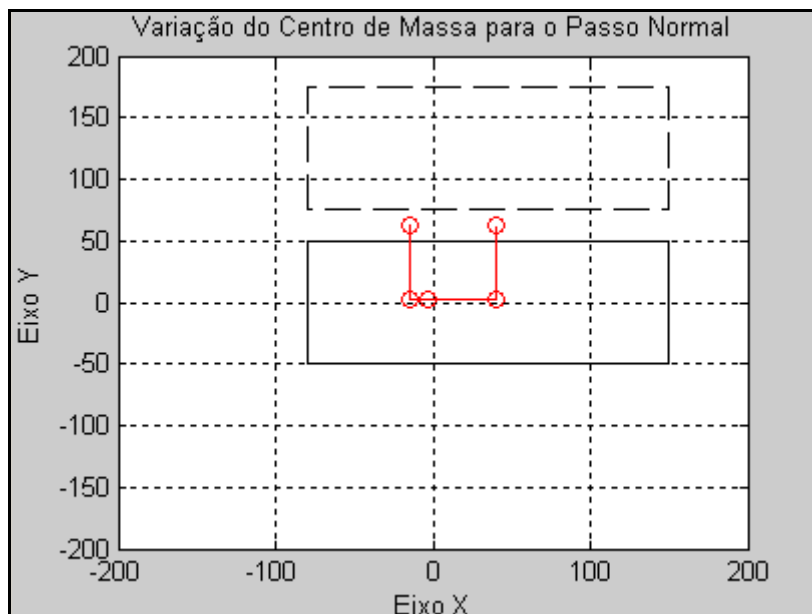


Figura 71 – Variação do centro de massa para o passo normal.

É importante referir que a variação do centro de massa em relação ao eixo dos XX, no caso do passo normal, não corresponde ao comprimento do passo. Isto porque no momento de partida considerado, o CM está localizado entre os dois pés e não no pé de avanço. Logo a distância percorrida pelo CM vai corresponder, sensivelmente, a metade do comprimento do passo.

Esta sequência de movimentos parece ser, por enquanto, a mais lógica a aplicar para obtenção dum caminhar estático. O reduzido número de fases, apenas quatro, poderá ter como resultado um passo estático não demasiado lento, como é característica deste tipo de caminhar. E a movimentação de várias juntas de pernas diferentes na mesma fase, poderá também contribuir para um menor consumo energético por parte dos motores já que estes exigem mais energia quando parados do que em movimento.

Como desenvolvimento futuro poderá dar-se a transformação das rectas dos gráficos de variação dos ângulos de junta, em curvas. Ou seja, em substituição de movimentos rígidos, de paragem e arranque, entre deslocamentos da mesma junta, podemos ter um movimento mais suave e porventura mais rápido. Esta pode ser uma forma de aproximar o caminhar estático do andar dinâmico.

O andar humano é muito complexo, não só os pés tem que se mover, mas as ancas, os braços, os ombros e cabeça movem-se em sincronia de modo a manter o sistema estável. Apesar de este estudo focar apenas as pernas, (só dez juntas) é necessário não esquecer que quando o robot estiver completo os braços e o tronco terão uma influência decisiva na performance do sistema e vão alterar substancialmente a forma de locomoção do robot.

5. CONCEPÇÃO DAS PERNAS DO ROBOT

O objectivo desta fase do projecto foi definir e apresentar as soluções mecânicas adoptadas para a construção das pernas da plataforma robótica humanóide.

De entre várias abordagens ao problema de concepção e projecto, para garantir a correcta execução dos movimentos pretendidos para cada junta do robot, optou-se pelas soluções a seguir apresentadas para cada elemento da perna onde se gera o movimento.

5.1. PÉ

O pé do robot é a base da plataforma, devido aos estudos estáticos e dinâmicos realizados optou-se por fazer um pé de grandes dimensões para garantir a estabilidade dos movimentos do robot. Sendo que as dimensões utilizadas não ultrapassam as dimensões permitidas para a participação futura no Robocup e que poderão vir a ser alteradas facilmente numa fase posterior deste projecto.

Assim, o pé do robot terá 90 mm de largura e 210 mm de comprimento. Para este será utilizada chapa de 5mm de espessura.

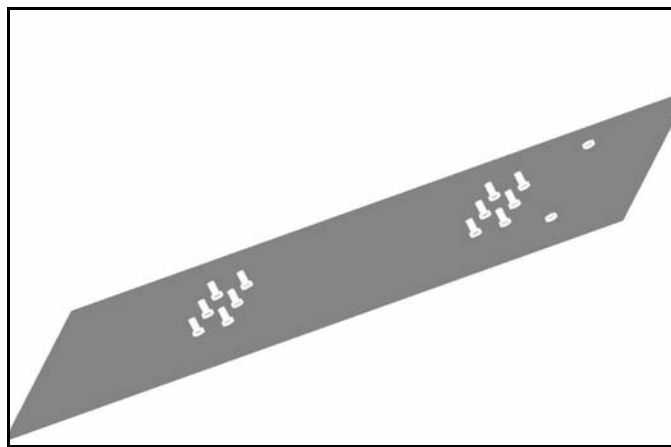


Figura 72 – Planta do pé, com os furos necessários para fixação de componentes.

5.2. ELOS

Após vários elos projectados optou-se pela utilização de elos com a forma apresentada na figura a seguir, pois estes possuem maior resistência mecânica e estabilidade estrutural. Para além disto, posteriormente serão fixos as chapas laterais destes, alguns motores e placas electrónicas, sendo necessária uma maior área para fixação destes. As chapas dos elos são acopladas através de veios de ligação e fixas com parafusos M3.

O elo utilizado para ligar o tornozelo ao joelho, elo q2_q3, e o elo utilizado para ligar o joelho à anca, elo q3_q4, têm dimensões diferentes. Isto deve-se essencialmente à junta esférica existente na anca que devido, aos vários graus de liberdade e as dimensões elevadas dos motores utilizados, verificou-se a necessidade de distribuir os movimentos desta junta numa maior área.

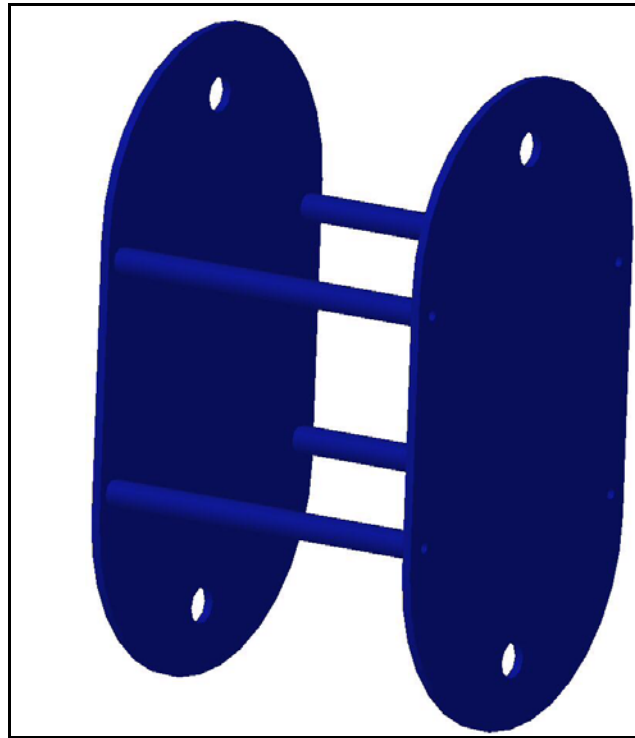


Figura 73 – Elo de ligação das juntas q2 e q3, elo q2_q3.

De referir ainda que, nos furos visíveis nas extremidades dos elos serão colocados casquilhos sob pressão e que se necessário recorre-se a colas para absoluta aderência destes aos elos.

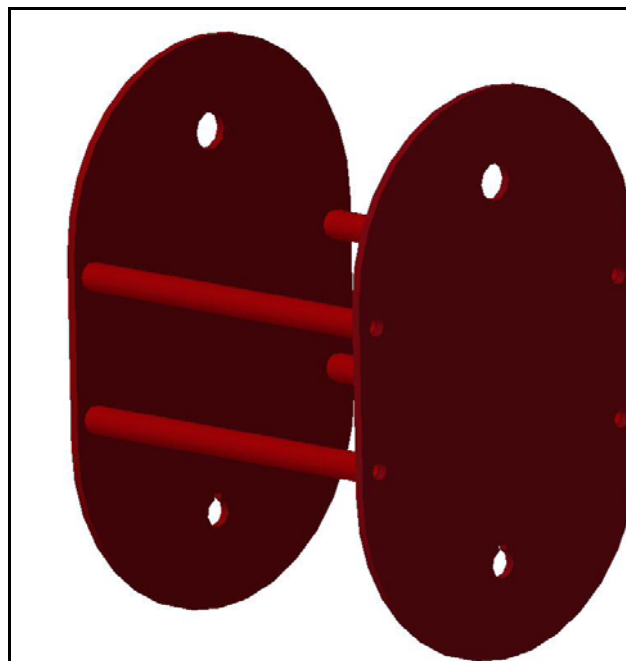


Figura 74 – Elo para ligação da junta q3 a junta q4, elo q3_q4.

Na figura a seguir, poderemos ver a variação de comprimentos anteriormente referida entre os elos projectados.

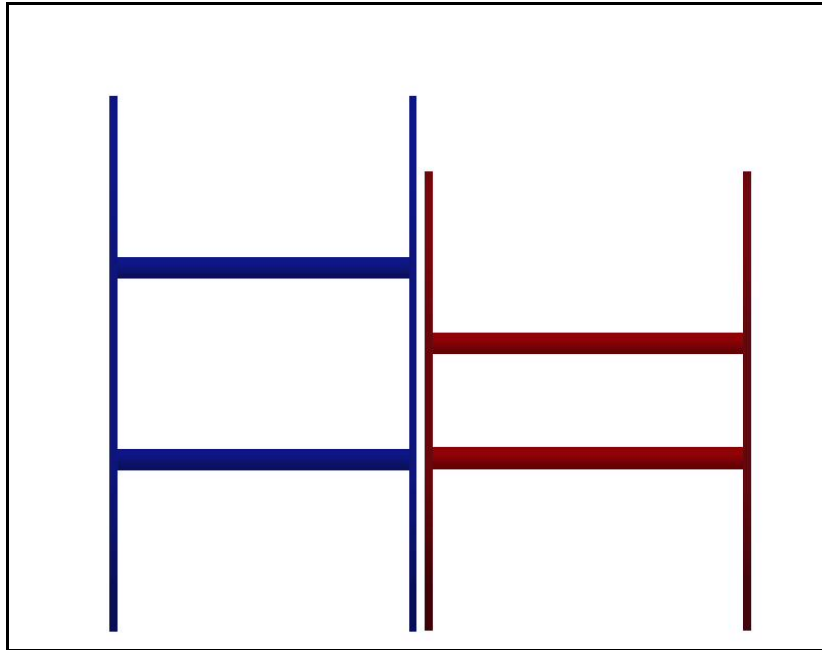


Figura 75 – Variação de comprimentos entre os elos $q2_q3$ e $q3_q4$.

5.3. TORNOZELO

Os movimentos pretendidos para a junta universal existente no tornozelo serão efectuados através da transmissão por engrenagens de dentado recto, fixas aos veios mandados por parafusos colocados transversalmente ao eixo de rotação das engrenagens.

Foram projectados dois veios mandados para cada um dos movimentos, junta $q1$ e $q2$, com diâmetros diferentes nas extremidades para poderem ser adicionados casquilhos, que se encontram solidários aos elos e às peças de fixação à planta.

A engrenagem mandante da junta $q1$ foi acoplada a um veio mandante, sendo que este estava acoplado ao veio do motor, com uma peça de enchimento que foi também maquinada. A existência da peça de enchimento deve-se ao pequeno diâmetro do veio do motor e, para garantir estabilidade mecânica ao mecanismo, optou-se pela sua adaptação ao mesmo.

Na junta q2 a engrenagem mandante é directamente acoplada ao motor, sendo que também aqui existirá a necessidade de colocar a peça de enchimento anteriormente referida.

A ligação dos veios mandados da junta q1 e q2, para a correcta concepção da junta universal no tornozelo, foi feita através de uma peça com furos ortogonais dispostos nas extremidades. A fixação dos veios a esta peça foi feita com ajustamento fortemente preso e com parafusos M3, colocados transversalmente aos eixos de rotação dos veios a fixar.

O veio mandado q1 é fixo à planta do pé através das peças de fixação à planta, sendo que entre esta peça e o veio q1 existe um casquilho fortemente preso à peça de ligação à planta. Esta peça é acoplada à planta do pé através de 6 parafusos M3 de cabeça de embeber de oco hexagonal. Estas peças suportam toda a estrutura do robot, pelo que houve uma grande preocupação na selecção de materiais com resistência mecânica apropriada.

O motor q1 é fixo à planta do pé através de um perfil rectangular. Como não foi possível a sua encomenda em pequenos comprimentos, decidiu-se quinar chapa para a obtenção do mesmo. É claro que a qualidade de peças quinadas não é a ideal, deixando-se em aberto a possibilidade de numa fase posterior deste projecto substituir estas peças por perfil com dimensões correctas e tolerâncias rigorosas.

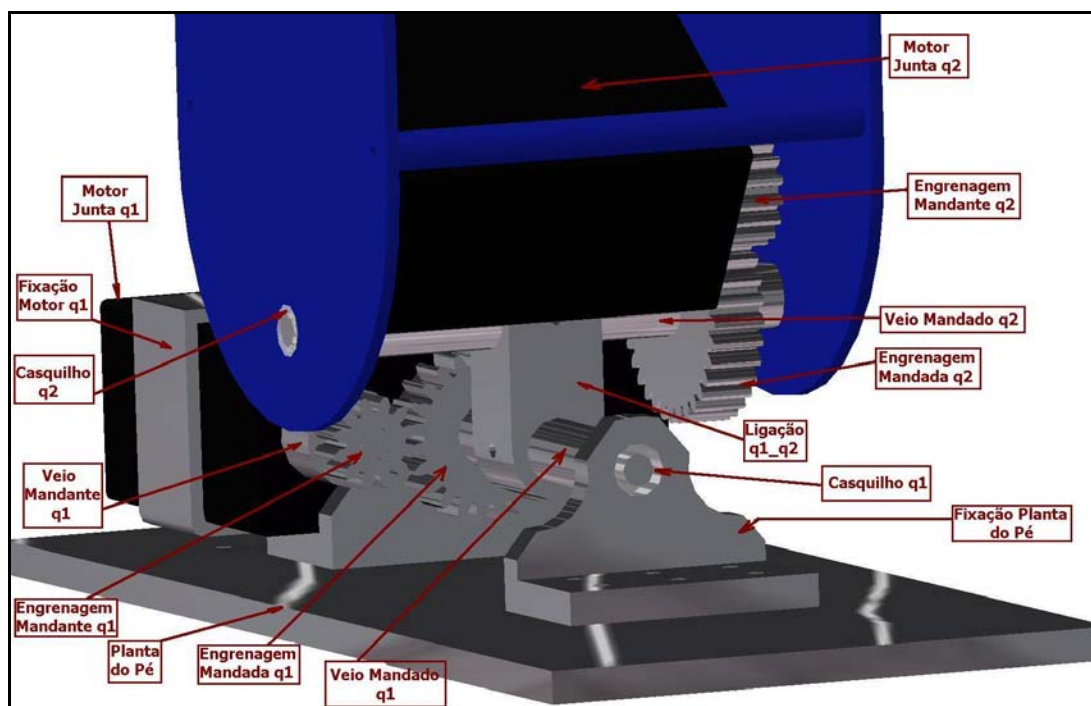


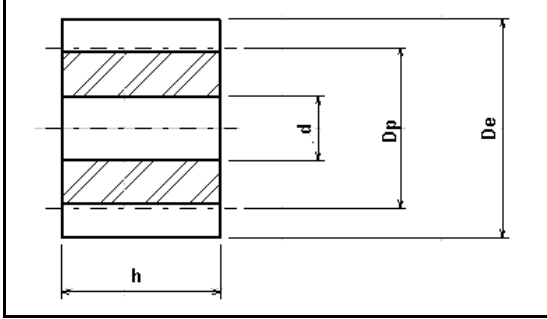
Figura 76 – Tornozelo do robot humanóide, descrição dos componentes.

Na figura acima pode-se ver os diversos componentes utilizados para a realização dos dois movimentos ortogonais no tornozelo.

É de referir que os motores utilizados para a realização dos movimentos são motores da Hitec, cuja referência é 31815 HS – 805BB, e cujas características principais são: binário de 19,8 kg.cm, peso de 152 g e dimensões da caixa do motor de $66 \times 30 \times 57,6$ mm.

As engrenagens utilizadas na junta q1 têm uma relação de 1:2, sendo que a engrenagem mandada tem 24 dentes e a engrenagem mandante tem 12 dentes. As engrenagens quando compradas, possuíam um cubo lateral e 15mm de dentado, pelo que foram cortadas e posteriormente rectificadas para a obtenção de engrenagens sem cubo lateral e com 8 mm de dentado.

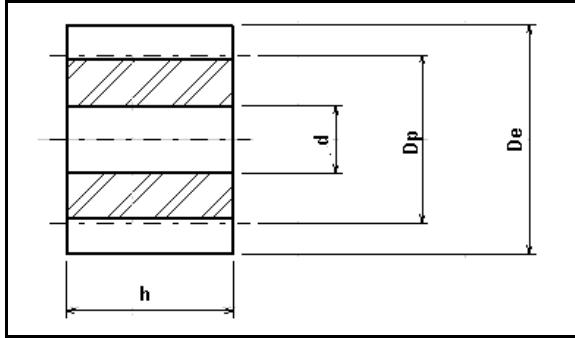
Tabela 51 – Dimensionamento geral das engrenagens mandantes e mandadas utilizadas na junta q1.

<u>Engrenagem Mandante q1</u>	
Material	Liga Alumeec79 (Fornecedor LANEMA)
Número de Dentes, Z	12 Dentes
Ângulo de Pressão, α	20°
Modulo, m	1
Largura da Engrenagem, h	10 mm
Diâmetro Exterior, De	14 mm
Diâmetro Primitivo, Dp	12 mm
Furo para o Veio, d	4 mm
<u>Engrenagem Mandada q1</u>	
Material	Liga Alumeec79 (Fornecedor LANEMA)

Número de Dentes, Z	24 Dentes
Ângulo de Pressão, α	20°
Modulo, m	1
Largura da Engrenagem, h	10 mm
Diâmetro Exterior, De	26 mm
Diâmetro Primitivo, Dp	24 mm
Furo para o Veio, d	10 mm

As engrenagens utilizadas na junta q2 têm também uma relação de transmissão de 1:2, e foram também sujeitas aos mesmos processos de fabrico para que o seu dentado seja também de 8 mm. A engrenagem mandante tem 17 dentes e a mandada 34 dentes.

Tabela 52 – Dimensionamento das engrenagens a usar na junta q2 e nas restantes juntas referidas mais à frente.

<u>Engrenagem</u> <u>Mandante q2, q3 e q4</u>	
	Material Liga Alumec79 (Fornecedor LANEMA)
Número de Dentes, Z	17 Dentes
Ângulo de Pressão, α	20°
Modulo, m	1
Largura da Engrenagem, h	10 mm
Diâmetro Exterior, De	19 mm
Diâmetro Primitivo, Dp	17 mm
Furo para o Veio, d	7,5 mm
<u>Engrenagem</u> <u>Mandada q2, q3 e q4</u>	
Material	Liga Alumec79 (Fornecedor LANEMA)

Número de Dentes, Z	34 Dentes
Ângulo de Pressão, α	20°
Modulo, m	1
Largura da Engrenagem, h	10 mm
Diâmetro Exterior, De	36 mm
Diâmetro Primitivo, Dp	34 mm
Furo para o Veio, d	10 mm

5.4. JOELHO

No joelho existe apenas um movimento a ser realizado, que é conseguido através de um par de engrenagens de dentado recto com relação de transmissão de 1:2. As engrenagens aqui utilizadas têm: 17 dentes a mandante, e 34 dentes a mandada.

A engrenagem mandada é acoplada a um veio transmissor de movimento através de um parafuso M3, colocado transversalmente ao eixo de rotação do veio.

A engrenagem mandante é acoplada ao motor, sendo que é necessário, tal como no caso das juntas q1 e q2, colocar uma peça de enchimento para maior estabilidade do mecanismo. O veio do motor, a peça de enchimento e a engrenagem mandante são acopladas através de um parafuso M3, colocado transversalmente em relação ao eixo de rotação do conjunto.

Para que se consiga obter o movimento correcto da junta tem-se que garantir que o movimento de rotação só é efectuado em torno do elo q2_q3, mantendo-se rígido em relação ao elo q3_q4.

Para isto foi utilizado um enchavetamento longitudinal forçado que fixa longitudinalmente o veio mandado ao elo q3_q4. A chaveta utilizada para a realização deste enchavetamento é uma chaveta de cunha com cabeça própria para enchavetamentos deste tipo. O dimensionamento da chaveta foi feito através de livros de desenho técnico, e são apresentadas na figura as dimensões necessárias para definir completamente a chaveta.

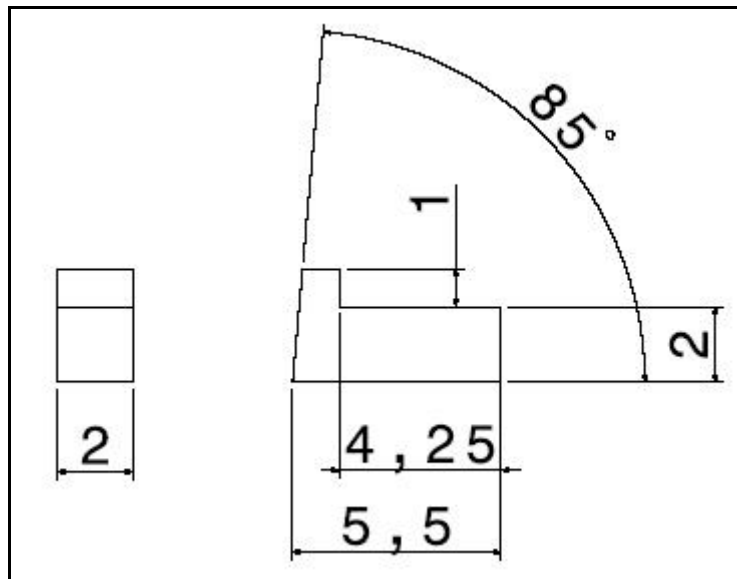


Figura 77 – Dimensões da chaveta de cunha com cabeça.

Verificou-se ainda a necessidade de colocar uma peça no exterior do elo para aumentar a área de enchavetamento, isto deve-se essencialmente ao facto, das placas dos elos terem apenas dois milímetros de espessura, esta peça é designada por roseta. A fixação desta peça será garantida através de ligação colada.

Tal como referido, no elo q2_q3 o veio mandado roda livremente pelo que existe a necessidade de colocar um casquilho entre o veio e o elo para garantir o deslizamento do veio e por sua vez o movimento. O casquilho entra no elo por pressão e se necessário é colado no interior do furo do elo q2_q3.

Para finalizar o motor é colocado com uma certa inclinação no interior do elo, porque devido as elevadas dimensões do motor é impossível coloca-lo na vertical por falta de espaço.

De seguida podemos ver na figura, os diferentes componentes da junta rotacional geradora do movimento no joelho.

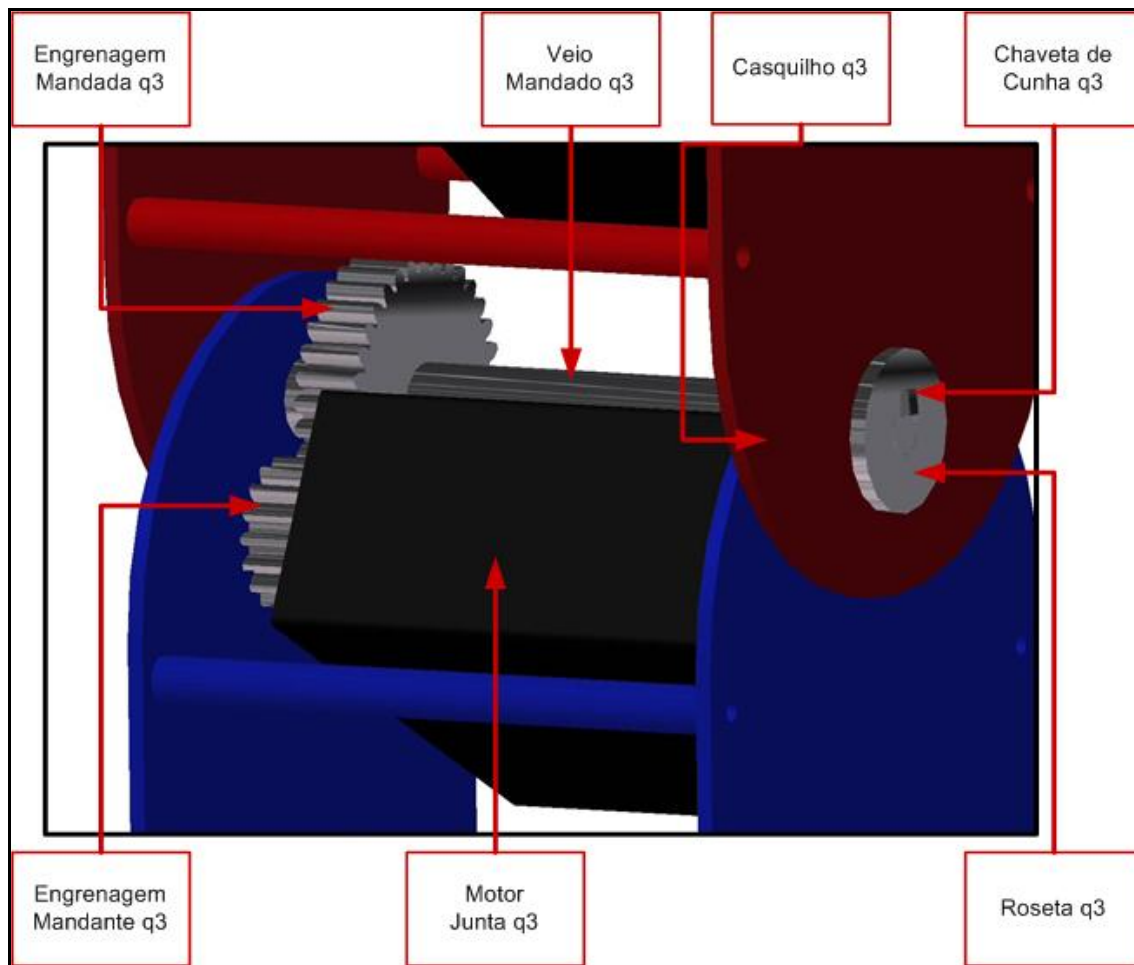


Figura 78 – Junta rotacional da perna esquerda, vista de trás.

Verificou-se ainda a necessidade de colocar uma peça no exterior do elo, de modo a aumentar a área de enchavetamento. Isto deve-se essencialmente ao facto das placas dos elos terem apenas dois milímetros de espessura, sendo esta peça designada por roseta. A fixação desta peça será garantida através de ligações coladas.

Tal como referido anteriormente, no elo $q2_q3$ o veio mandado roda livremente, pelo que existe a necessidade de colocar um casquilho entre o veio e o elo, de modo a garantir o deslizamento do veio, permitindo assim o movimento. O casquilho entra no elo por pressão.

Para finalizar, o motor é colocado com uma certa inclinação no interior do elo, pois, devido às elevadas dimensões do motor é impossível colocá-lo na vertical, por falta de espaço.

Pode-se ver na figura os diferentes componentes da junta rotacional geradora do movimento no joelho.

5.5. ANCA

Na anca existem três movimentos ortogonais, pelo que esta junta foi a mais difícil de projectar de todas até agora enunciadas. Numa fase inicial pensou-se na utilização de veios estriados e engrenagens para a realização dos diferentes movimentos, mas após assemblagem dos motores aos mecanismos verificou-se que a dimensão dos motores era demasiado elevada e fazia com que uma parte considerável destes ficasse no exterior da estrutura. Por estas razões e apesar de esta ser uma forma mais apelativa em termos de engenharia, o mesmo não se verificou do ponto de vista estético.

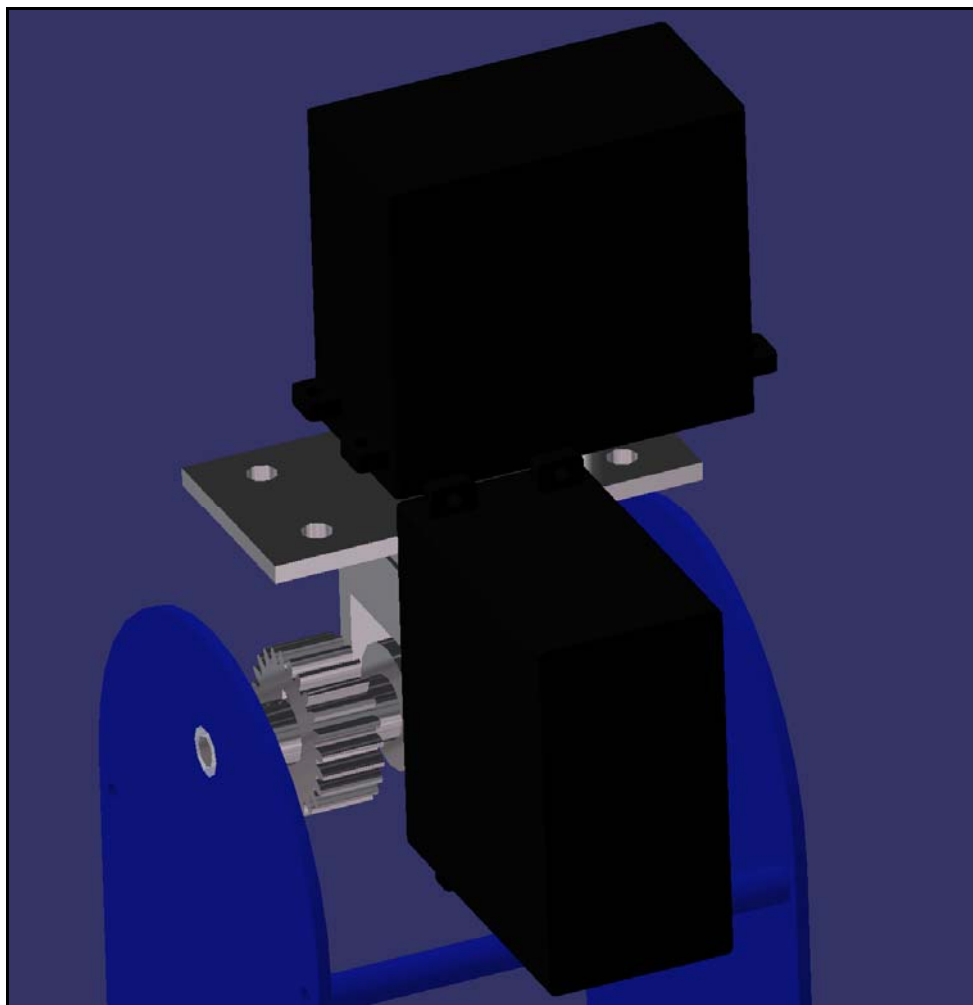


Figura 79 – Junta esférica inicialmente concebida, com motores no exterior da estrutura.

Assim, verificou-se a necessidade de conceber outra junta esférica, onde os movimentos fossem gerados mantendo os motores no interior da estrutura.

A junta esférica compreende três movimentos: q4, q5 e o q6, o movimento q4L é obtido através de transmissão por engrenagem de dentado recto com transmissão de 1:2 que, tal como nas outras juntas a engrenagem mandada é acoplada ao veio mandado através de um parafuso colocado transversalmente ao eixo de rotação do veio.

A engrenagem mandante é acoplada ao motor e a peça de enchimento já referida para as outras juntas, através de um parafuso M3 que tal como na engrenagem mandada é colocado transversalmente ao eixo de rotação.

Os movimentos q5L e o q6L são garantidos por actuação directa, utilizando peças de ligação dos motores aos elos, interligando-os à estrutura. Estas peças de ligação serão obtidas a partir de perfis em U, quadrados e rectangulares. Estes perfis poderão ser facilmente encontrados nos catálogos *on-line* da EXTRUSAL – Companhia Portuguesa de Extrusão, S.A.. Mas, esta empresa apenas vende elevadas quantidades de material e não quantidades tão pequenas como as que nós necessitávamos.

Perante esta contrariedade, decidiu-se comprar chapa de 2 mm de espessura de alumínio e de seguida por quinagem tentar obter perfis em U que depois seriam adaptados para os diferentes locais onde seriam necessários.

Como é de esperar no processo de quinagem não se conseguem obter dimensões correctas e muito menos qualquer tipo de tolerâncias. Obteve-se assim, perfis com dimensões ligeiramente superiores às pretendidas pelo que tiveram de se maquinar calços e materiais de enchimento.

Aconselha-se numa fase posterior de continuação deste projecto que se possível estas peças sejam substituídas para maior fiabilidade do equipamento.

Os motores no caso da junta q5 e q6 utilizará uma peça de fixação que é fornecida com os motores, para gerar o movimento e assim ter uma maior área de fixação aos perfis. Estas peças são acessórios dos motores que apresentavam dimensões elevadas e que foram maquinados para terem um diâmetro exterior de 30mm.

O motor da junta q5 é envolvido por um perfil rectangular, designado por fixação_motor_q5, no qual de um dos lados temos um furo que permite a passagem da peça de fixação do motor.

Para melhor apoiar e estabilizar o motor q5, no lado oposto encontra-se um parafuso que é fixo ao perfil em U exterior, designado por Ligação_q5_1, e cuja extremidade é maquinada para rodar livremente no interior de um casquilho colocado no perfil fixação_motor_q5.

Para garantir que o veio do motor na junta q6 não é solicitado ao corte, pensou-se em utilizar um rolamento de rolos ou de agulhas para permitir os esforços axiais. Uma vez que os esforços efectuados sobre o veio do motor não deverão ser muito elevados, utilizou-se um casquilho de *teflon* virgem, que dissipa os esforços axiais de corte colocados sobre o veio do motor.

A ligação entre os diferentes perfis e entre os perfis e os motores é feita através de parafusos e porcas M3 e M6.

Podemos ver na figura a seguir, a junta esférica projectada em que os furos visíveis são furos roscados onde serão colocados os parafusos a utilizar.

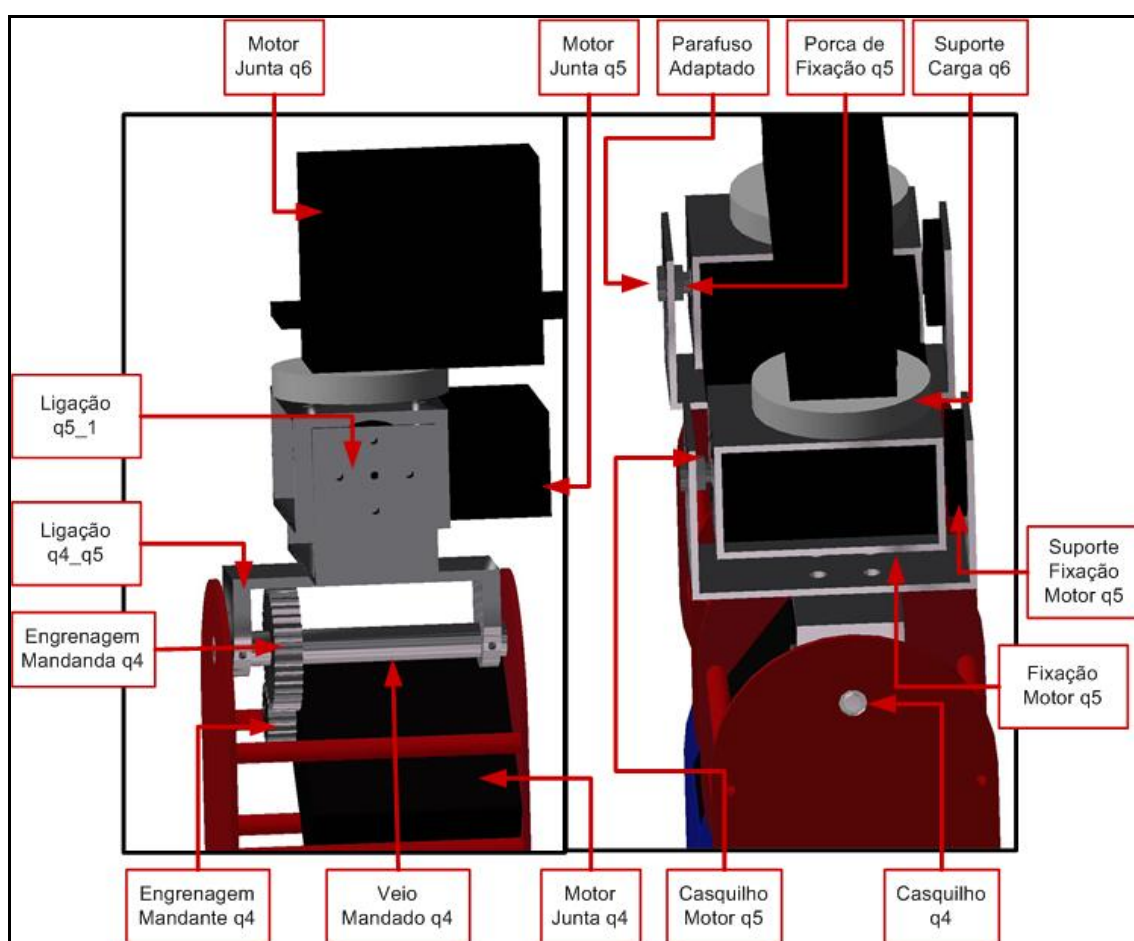


Figura 80 – Junta esférica da anca, vista de frente e lateralmente.

5.6. LIGAÇÃO PERNA – ANCA

Nesta fase já foram projectadas todas as juntas faltando apenas o elemento de ligação das duas pernas. O elemento a utilizar para esta tarefa será um perfil quadrado

de 76×76 mm e com aproximadamente 250 mm de comprimento. Este perfil foi encontrado nos catálogos *on-line* da EXTRUSAL – Companhia Portuguesa de Extrusão, S.A., mas tal como anteriormente foi referido este perfil não era fornecido em tão pequenas quantidades.

Assim sendo, optou-se pelo corte de 4 chapas com 2mm de espessura e posterior acoplamento através de cantoneiras ou perfil em L que foi facilmente encontrado em estabelecimentos comerciais ligados ao *bricolage*.

A utilização desta solução permite que os motores usados para gerar movimento na junta q6 estejam envolvidos pelo perfil de ligação, ficando assim ocultos.

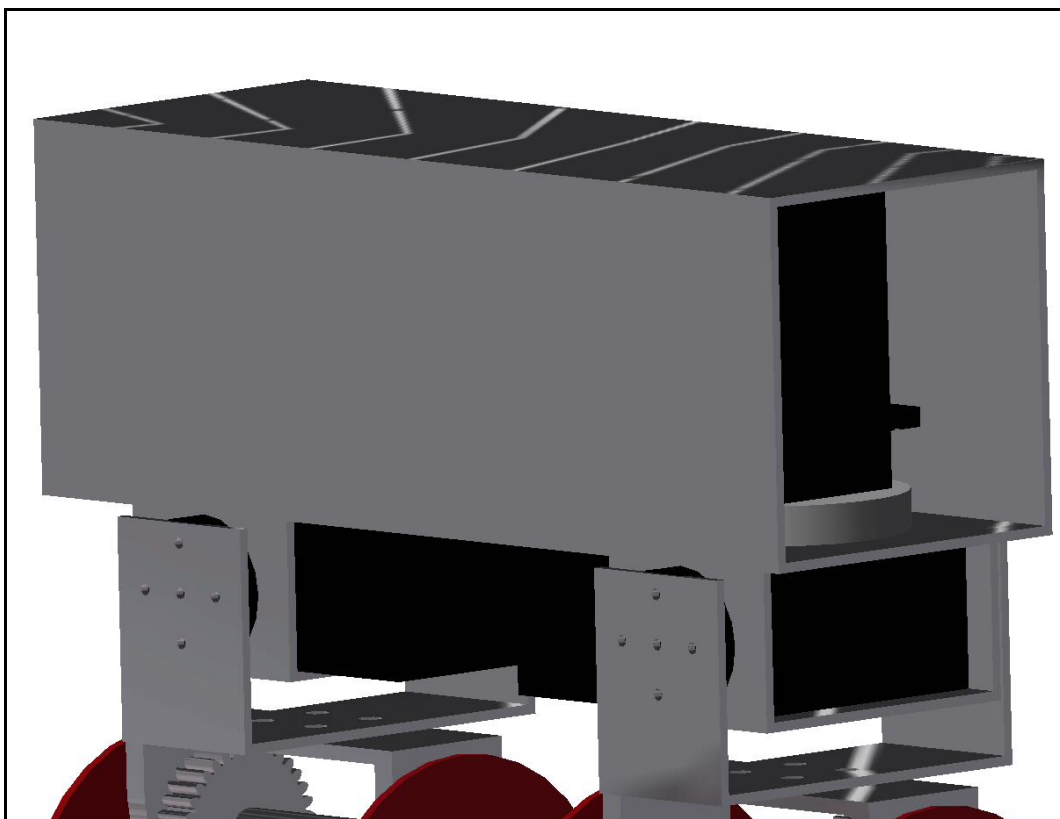


Figura 81 – Ligação das pernas através do perfil ligação _anca.

5.7. PERNAS MODELADAS

Para concluir esta fase do projecto apresentam-se duas vistas das pernas completas. De referir que o espaço vazio no interior dos elos será utilizado para colocar placas electrónicas necessárias ao controlo dos motores. Os parafusos e porcas a usar não estão incluídos na modelação, visto não se considerar importante.

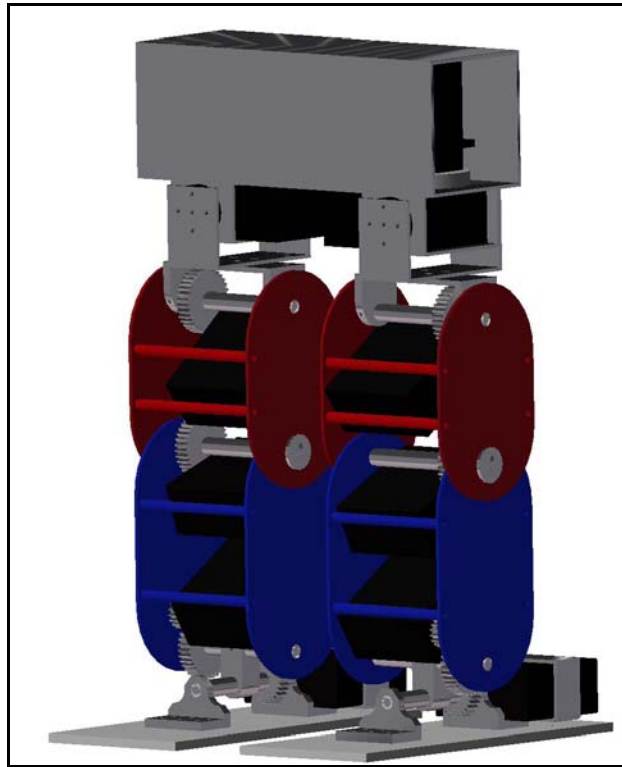


Figura 82 – Pernas completas e com ligação da anca, vista de frente.

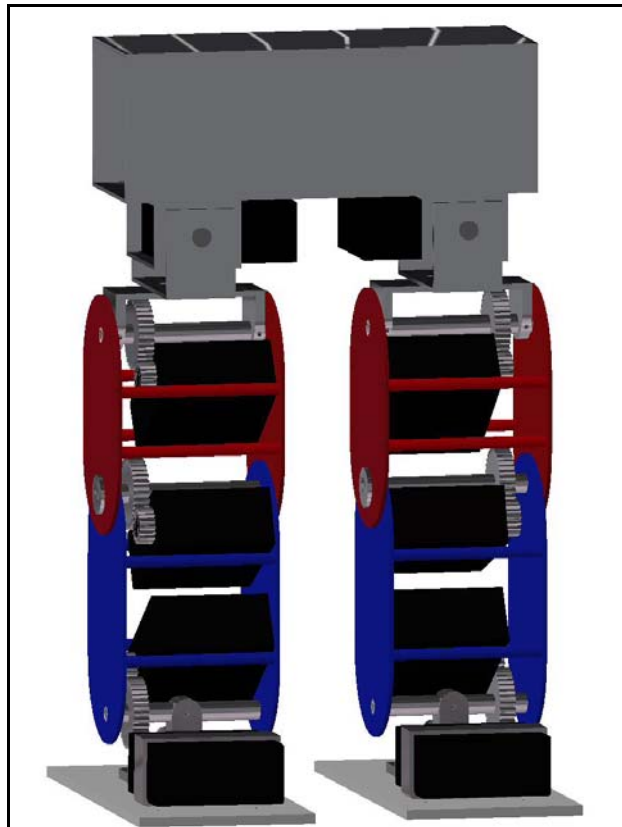


Figura 83 – Pernas do robot humanóide, vista de trás.

6. SELECÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo abordamos um dos objectivos a atingir para a correcta execução deste projecto. Este objectivo corresponde ao estudo e selecção dos materiais a utilizar na concepção do robot humanóide. Para isso foram estudadas diversas hipóteses, tendo como limitações a garantia de resistência e boas propriedades mecânicas perante os esforços a realizar, a utilização de materiais através dos quais se obtenha uma estrutura bastante leve (devido aos resultados obtidos do estudo dos binários estáticos e dinâmicos) e, ainda, os custos associados aos materiais escolhidos.

Após um rápido estudo foi excluída a utilização de aços na estrutura do robot e nos mecanismos de transmissão a utilizar, devido a elevada densidade do material. Decidimos assim, utilizar *nylon*, *teflon* e/ou alumínio, na estrutura e nos mecanismos transmissores de movimento. Ao longo do projecto várias soluções foram implementadas existindo problemas associados a orçamentos e maquinagem de componentes, pelo que tivemos de reconsiderar a não utilização de aço na concepção da plataforma.

A pesquisa realizada levou-nos a um distribuidor, LANEMA, S.A., com um extenso catálogo neste área.

Apresenta-se a seguir um pequeno resumo teórico sobre os materiais estudados e os campos de aplicação destes. Serão ainda apresentadas as características dos materiais escolhidos, para serem utilizados no nosso projecto. Para tal iremos recorrer a informação disponível no catálogo da LANEMA, S.A..

6.1. TERMOPLÁSTICOS ESTRUTURAIIS

Abordemos aqui, os aspectos importantes da estrutura, propriedades e aplicações dos termoplásticos estruturais. A definição de plástico estrutural é arbitrária, já que não existe nenhum plástico que, de alguma forma, não possa ser considerado um plástico estrutural. Segundo os apontamentos de materiais de construção mecânica do Professor Filipe Oliveira, considera-se como estrutural um termoplástico que possua um conjunto de propriedades que o tornem especialmente útil em aplicações de engenharia. Para esta

abordagem foram seleccionados as poliamidas (nylons), policarbonato, poliacetais entre outros.

As baixas densidades destes materiais constituem uma propriedade muito vantajosa em muitos projectos de engenharia. À semelhança do que acontece com a maioria dos materiais plásticos, também estes termoplásticos estruturais têm resistências à tracção relativamente baixas, apresentando, valores entre 54 e 83MPa. Estas baixas resistências mecânicas constituem normalmente uma desvantagem em projectos de engenharia. Em relação a resistência ao impacto dos termoplásticos estruturais, verifica-se que o policarbonato tem uma grande resistência, apresentando valores entre 640 e 850 J/m. Os valores baixos apresentados pelo poliacetal e pelo nylon, respectivamente de 75 e 105 J/m, são de certa forma enganadores, uma vez que são, de facto, materiais “tenazes”, mas sensíveis ao entalhe, conforme indicam os ensaios de Izod com provete entalhado.

A capacidade de isolamento eléctrico dos termoplásticos estruturais é elevada, como acontece com a maioria dos materiais plásticos, com valores entre 13 e 28 kV/mm. As temperaturas máximas de utilização dos termoplásticos estruturais variam entre 82 e 260°C.

Há muitas outras propriedades dos termoplásticos estruturais que os tornam materiais importantes do ponto de vista industrial. Os termoplásticos estruturais são relativamente fáceis de processar numa forma acabada ou quase acabada, e o seu processamento pode ser automatizado em muitos casos.

6.2. PLÁSTICOS FLUORADOS

Estes materiais são plásticos ou polímeros produzidos a partir de monómeros contendo um ou mais átomos de flúor. Os plásticos fluorados possuem uma combinação especial de propriedades para aplicações de engenharia. Esta classe de polímeros tem elevada resistência a ambientes químicos hostis e boas propriedades de isolamento eléctrico. Os plásticos fluorados contendo grande percentagem de flúor têm baixos coeficientes de atrito, o que os torna autolubrificantes e não-aderentes.

Produzem-se muitos plásticos fluorados, mas os dois mais utilizados são o politetrafluoroetileno (PTFE) e o policlorotrifluoroetileno (PCTFE).

6.3. LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio possui uma combinação de propriedades que o torna um material muito útil em engenharia. O alumínio tem densidade baixa ($2,70 \text{ g/cm}^3$), sendo por isso muito utilizado em produtos manufacturados para veículos de transporte. O alumínio tem também boa resistência à corrosão na maioria dos meios naturais, devido à estabilidade do filme de óxido que se forma na sua superfície. Muito embora o alumínio puro apresente baixa resistência mecânica, as ligas de alumínio podem ter resistências até cerca de 690MPa. O alumínio não é tóxico, sendo extensivamente usado em recipientes e embalagens para alimentos. O alumínio é usado na indústria eléctrica devido às suas propriedades eléctricas. O preço relativamente baixo do alumínio, aliado às muitas propriedades úteis, fazem com que este metal tenha grande importância industrial.

6.4. ANÁLISE ESTRUTURAL DOS ELOS

O material escolhido inicialmente para a construção dos elos foi o alumínio, posteriormente chegamos a conclusão que um plástico com boas características mecânicas seria suficiente para a função e diminuiria consideravelmente o peso da estrutura. Assim, optamos por construir os elos usando o plástico ERTALYTE.

A forma do elo vai influenciar a rigidez estrutural do robot assim como a maneira como os componentes vão estar colocados no seu interior. É por isso importante fazer uma análise estrutural aplicando os esforços a que o elo vai estar sujeito e verificar se o material escolhido é suficientemente resistente.

Para a realização de um estudo de resistência de um componente é necessário conhecer algumas características do material utilizado:

- Resistência à tracção = 90 MPa
- Módulo de elasticidade = 3700 MPa
- Densidade: $1,39 \text{ g/cm}^3$

As restantes características técnicas deste material são descritas mais à frente neste documento.

O programa utilizado para a modelação e análise estrutural dos elos foi o CATIA. O método para se proceder a uma análise estrutural de um dado elemento consiste em, primeiro efectuar a modelação do modelo para análise e fazer a atribuição do material.

De seguida proceder à definição do sistema de cargas, forças e momentos, e definir também os pontos de fixação da peça, pontos estes que são completamente imóveis. O passo seguinte é a análise dos resultados obtidos, deslocamentos, deformações e campo de tensões. Com base na informação obtida é possível aferir o comportamento do componente em termos da sua integridade estrutural.

Foram efectuados dois tipos de modelos dos elos, como peça única e como o resultado da assemblagem de duas placas e de 4 barras de ligação, aparafusadas.

6.4.1. Análise ao Elo como Peça Única

Para a análise foi aplicada uma força vertical de 200N, nos furos que recebem os veios, provocado pelo peso do robot e um momento de 10N.m também aplicado nos furos. Ambos os valores são exagerados, já que o robot nunca irá suportar um peso de 20Kg em qualquer parte da sua estrutura. A única restrição presente é a fixação do elo nos furos inferiores.

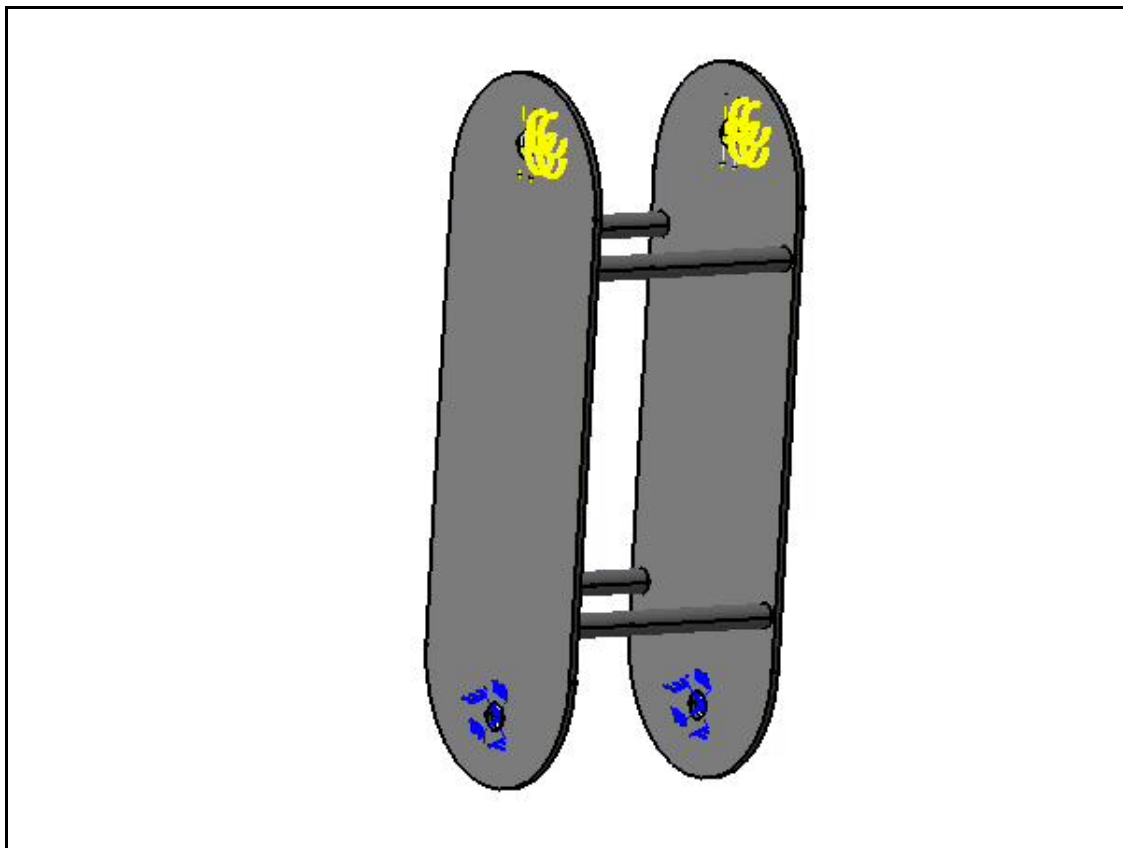


Figura 84 – Forças aplicadas.

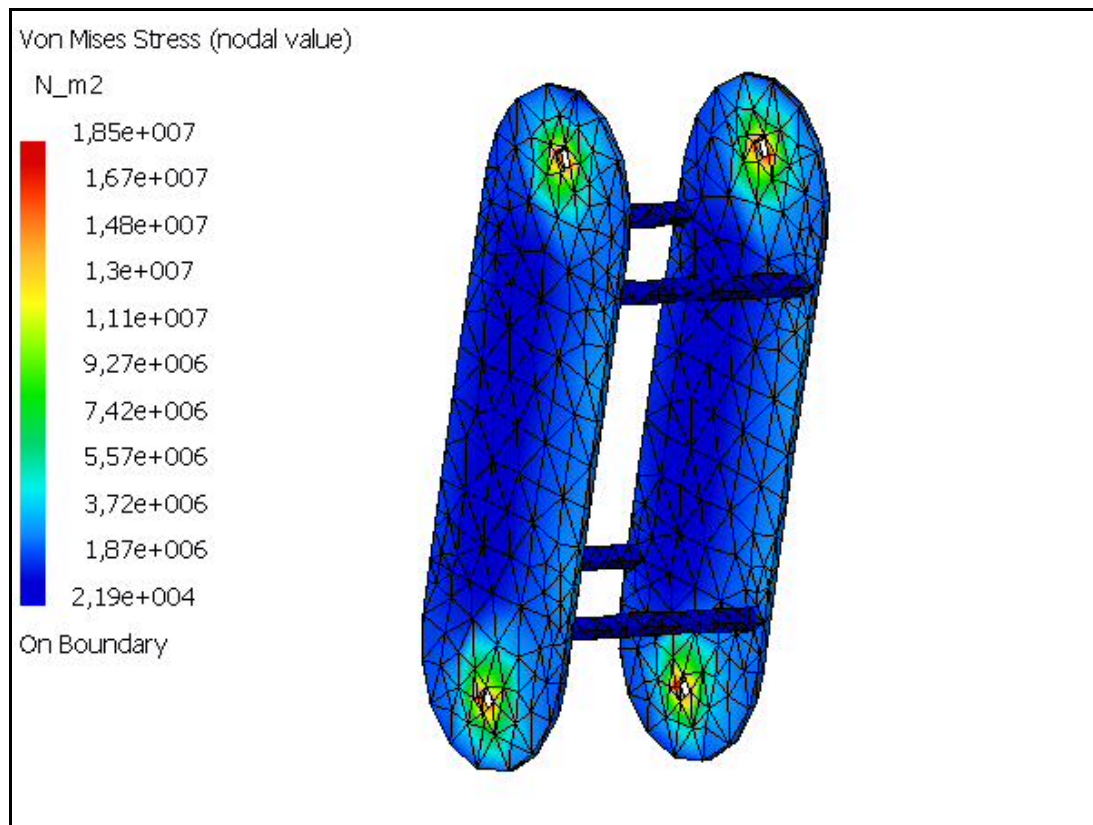


Figura 85 – Resultado da análise estrutural do elo como elemento único.

As zonas mais solicitadas, como seria de esperar, são os furos das placas que vão alojar os veios. É a zona que suporta o peso da estrutura, e ainda sofre um momento devido à rotação do veio.

A tensão máxima atingida para este estudo é de 18,5MPa. Analisando os resultados concluímos que não há perigo de rotura do material. A tensão de cedência é superior à máxima tensão atingida devido às cargas aplicadas, o que nos confere um coeficiente de segurança elevado.

6.4.2. Análise ao Elo Assemblado

Esta análise é semelhante à anterior, difere apenas na forma como o elo foi modelado no CATIA. Neste caso, em vez de um elo maciço, possuímos 2 placas e 4 barras de ligação que se encontram aparafusadas. Este estudo serve para verificar se as ligações aparafusadas não representam zonas de risco, sujeitas a grandes tensões. A força aplicada é de 200N e o momento é de 10N.m.

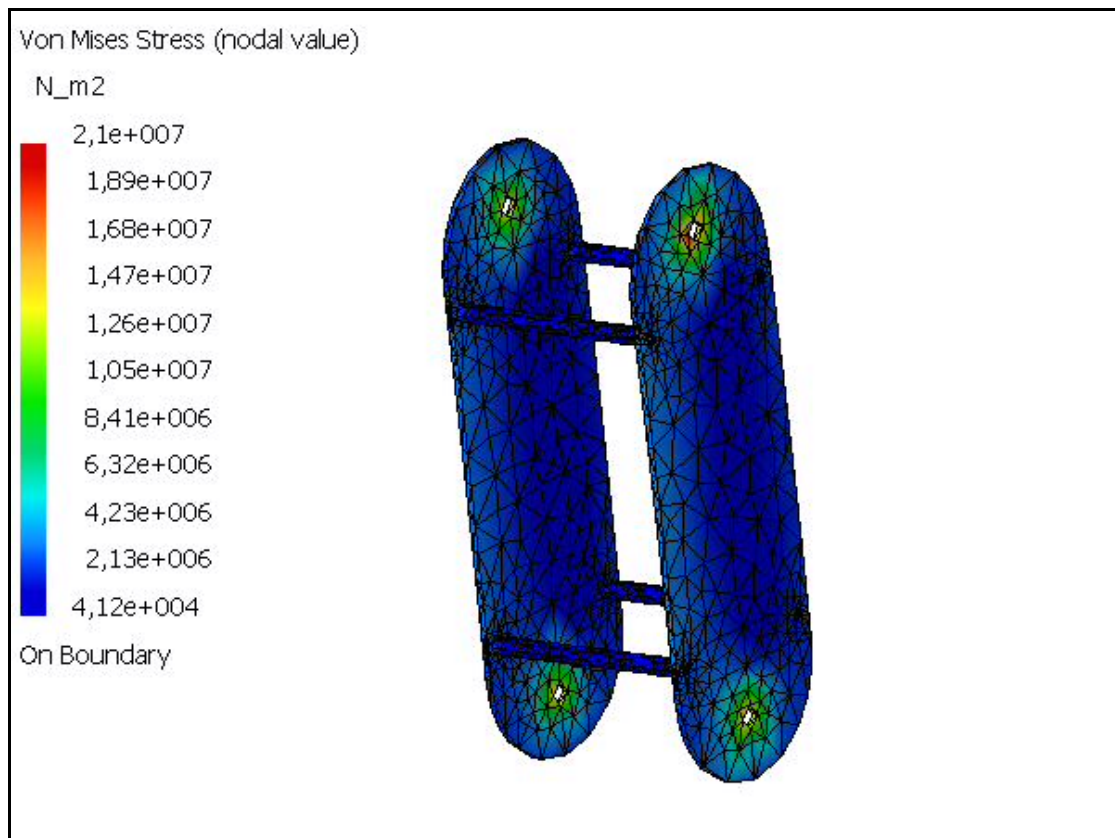


Figura 86 – Resultado da análise estrutural, elo com veios de ligação assembledos.

A máxima tensão atingida é de 21MPa, valor ligeiramente superior ao obtido para a análise ao elo maciço. E como podemos verificar, a tensão máxima atingida é inferior à tensão de rotura do material, podemos assim concluir que não existe risco de rotura devido ao material, nem devido à ligação aparafusada das placas.

Posteriormente, na fase de montagem da estrutura, verificamos que o material era demasiado flexível e que as rodas dentadas não engrenavam devido à variação do entreixo. Isto deve-se à existência de uma força provocada pela rotação do motor, que não foi considerada na análise estrutural.

Para garantir um entreixo fixo e para assegurar a transmissão de movimento entre a roda mandante, fixa no veio do motor, e a roda mandada, foi necessário criar novas soluções.

A primeira solução foi apoiar a roda mandante à placa do elo, através de um pequeno veio em alumínio, denominado de veio mandante. Foi usada uma ligação colada entre o veio e a roda mandante. Este veio por sua vez é apoiado no elo através de um casquilho.

A segunda solução, que complementa a primeira, consiste numa pequena placa em alumínio, que possui dois furos, onde são colocados os veios mandado e mandante. Desta maneira o entre-eixo não pode variar e a transmissão de movimento é garantida.

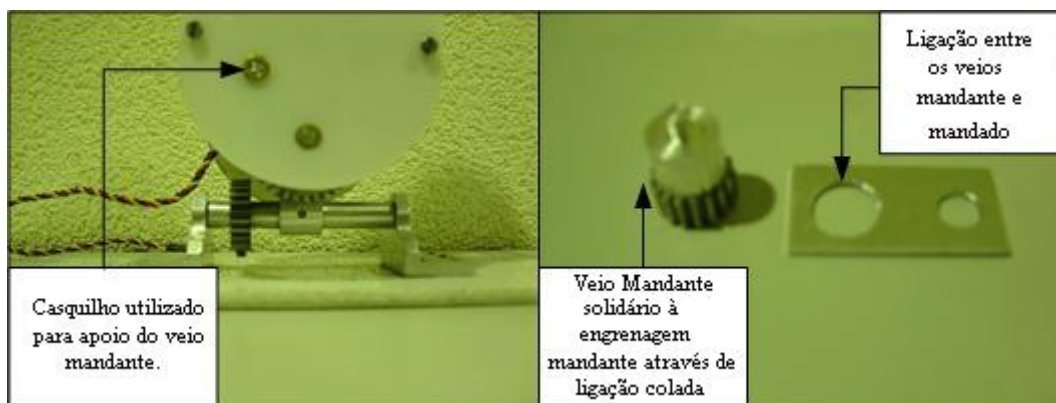


Figura 87 – Veio Mandante e ligação entre veios.

A introdução destas soluções garantem o engrenamento das rodas, pelo que não é necessário substituir o material escolhido para o fabrico dos elos.

6.5. MATERIAIS UTILIZADOS

A informação que se refere de seguida foi retirada do catálogo do distribuidor, LANEMA, S.A.. De igual forma, também os materiais apresentados foram escolhidos com base na forma como são fornecidos (dimensões, e forma).

Após análise dos materiais disponíveis optou-se pela utilização de poliamidas (nylon), nos elos e nos pés da plataforma, tendo o cuidado de escolher materiais com resistência mecânica mais elevada dentro dos limites normais de resistência das poliamidas.

Para os casquilhos utilizou-se o *teflon* como material próprio para esta tarefa devido às suas capacidades auto-lubrificantes.

Quanto às rodas dentadas, seria pretendido numa fase de projecto, que estas fossem feitas em alumínio mas em resposta a um orçamento pedido à PJFerramentas, o valor exigido era bastante elevado, pelo que se optou por procurar engrenagens já maquinadas, mesmo que estas fossem em outros materiais. Da procura efectuada encontraram-se dois vendedores a Pinhol Equipamentos Industriais, Lda. e a LANEMA, S.A.. Nestas empresas encontraram-se as engrenagens necessárias, mas com o problema

das engrenagens serem fabricadas em aço C43. O facto das engrenagens serem fabricadas em aço implica aproximadamente um peso para uma roda, com exactamente as mesmas dimensões, de três vezes superior.

Os restantes mecanismos a utilizar foram maquinados em ligas de alumínio, devido às elevadas resistências mecânicas que as ligas de alumínio podem ter e devido à densidade destas ligas ser baixa o que como se referiu é objectivo primordial para se obter uma estrutura leve.

Agora pode-se apresentar, as principais características dos materiais utilizados, utilizando a informação do catálogo *online* da LANEMA, S.A..

6.5.1. Elos e Pés

Os plásticos estruturais escolhidos utilizados na estrutura dos elos e nos pés do robot humanóide são apresentados aqui. Sendo que, serão utilizadas folhas de 2 e 5mm e varões de 6 mm.

ERTACETAL® C e H: O *ERTACETAL* é um material com maior estabilidade dimensional do que as poliamidas no entanto com menor resistência ao desgaste. O *ERTACETAL C* é mais resistente às hidrolises, às soluções alcalinas fortes e à degradação por oxidação térmica do que o *ERTACETAL H*. No entanto *ERTACETAL H* possui uma maior resistência mecânica, rigidez, dureza e fluência assim como também um menor coeficiente de dilatação térmica e maior resistência ao desgaste. [2]

Características Principais: Alta resistência mecânica, alto módulo de elasticidade, boa resistência à fluência, elevada resistência ao impacto inclusive a baixas temperaturas, excelente estabilidade dimensional, boas propriedades de deslizamento e resistência ao desgaste, fácil maquinação (melhor que as poliamidas), baixa absorção de humidade, elevada resistência a químicos e fisiologicamente inerte. [2]

Aplicações: Peças de precisão, rodas dentadas de modulo pequeno, acoplamentos, luvas, elementos de válvulas, casquilhos, em geral em todo o tipo de peças onde se necessita melhor acabamento e estabilidade dimensional. [2]

Características Técnicas:

Densidade: 1.41 g/cm³;

Resistência à tracção – escoamento/ruptura: 68 MPa;

Deformação à ruptura: 35 %;

Modulo de elasticidade: 3100 MPa. [2]

Programa de Fabrico:

Varões desde os 3mm até os 320mm;

Folhas desde 1mm até 6mm. [2]

ERTALYTE®: As propriedades específicas deste PET cristalino no estado virgem fazem do *ERTALYTE* um material particularmente adaptado para peças mecânicas de precisão expostas a cargas elevadas e sujeitas a grande desgaste. [2]

Características Principais: Elevada resistência mecânica, rigidez e dureza, muito boa resistência à fluência, coeficiente de atrito baixo e uniforme, excelente resistência ao desgaste melhor do que as poliamidas, muito boa estabilidade dimensional e fisiologicamente inerte. [2]

Aplicações: Casquilhos, guias e rodízios, engrenagens de baixo módulo sem impacto, raspadores para produtos alimentares e similares, peças de precisão, peças isoladoras, próteses dentárias e componentes para bombas na indústria alimentar. [2]

Características Técnicas:

Densidade: 1.39 g/cm³;

Resistência à tracção – escoamento/ruptura: 90 MPa;

Deformação à ruptura: 15 %;

Modulo de elasticidade: 3700 MPa. [2]

Programa de Fabrico:

Varões desde os 10mm até os 210mm;

Folhas desde 2mm até 6mm. [2]

6.5.2. Casquilhos

NYLATRON® GS: A adição de MoS₂ (Bisulfureto de Molibdénio) confere a esta qualidade maior rigidez, dureza e estabilidade dimensional do que o *ERTALON 66SA*, no entanto reduz ligeiramente a resistência ao impacto. A dispersão do Bisulfureto de Molibdénio na estrutura molecular resulta num maior grau de cristalização, melhorando as propriedades de deslizamento e desgaste. [2]

Características Principais: Maior rigidez, dureza e estabilidade dimensional, maior grau de cristalização, melhores propriedades de deslizamento e desgaste e menor coeficiente de atrito. [2]

Aplicações: Casquilhos, réguas de deslizamento, todas as aplicações das poliamidas onde seja necessário maior resistência ao desgaste e poder de deslizamento. [2]

Características Técnicas:

Densidade: 1.15 g/cm³;

Resistência à tracção – escoamento/ruptura: 55 MPa;

Deformação à ruptura: 20 %;

Modulo de elasticidade: 3500 MPa. [2]

Programa de Fabrico:

Varões desde os 6mm até os 50mm. [2]

6.5.3. Restantes Componentes

Apesar de não ter acontecido, é importante referir que todos os restantes mecanismos deverão ser preferencialmente fabricados em ligas de alumínio. Se possível, deveria ser utilizada a seguinte liga devido as suas elevadas propriedades mecânicas. De salientar de entre as propriedades aqui especificadas, que a resistência à tracção é bastante elevada para o caso dos alumínios e por isto este será o material escolhido para a realização dos componentes transmissores de movimento e em particular para peças de ligação como é o caso, da peça que liga o pé à junta q1 e a que efectua a ligação entre a junta q1 e q2.

LIGA ALUMEC 79 E 89: Liga com características mais elevadas dentro dos alumínios o que permite a sua utilização em aplicações até agora reservada aos aços, boa maquinação, e boa resistência a abrasão. [2]

Aplicações: Matrizes para injeccção, matrizes para injeccção de plásticos, moldes para a indústria da borracha e do calçado, moldes para extrusão do plástico, moldes para injeccção de espuma de polietileno e moldes para fundição por cera perdida. [2]

Características Técnicas da Liga ALUMEC 79:

Densidade: 2.80 g/cm³;

Resistência à ruptura: 400 - 450 MPa (com tratamento de têmpera e envelhecimento artificial);

Limite elástico Rp 0,2: 390 - 450 MPa (com tratamento de têmpera e envelhecimento artificial);

Modulo de elasticidade: 72000 MPa. [2]

Características Técnicas da Liga ALUMEC 89:

Densidade: 2.83 g/cm³;

Resistência à ruptura: 545 - 600 MPa (com tratamento de têmpera e envelhecimento artificial);

Limite elástico Rp 0,2: 495 - 530 MPa (com tratamento de têmpera e envelhecimento artificial);

Modulo de elasticidade: 72000 MPa. [2]

7. CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DAS PERNAS

Neste capítulo pretende-se essencialmente referir aspectos relacionados com a montagem e descrição de todos os componentes maquinados para a construção do robot humanóide.

Como já foi referido, a concepção das pernas sofreu algumas alterações durante o processo de fabrico. Isto ocorreu devido a problemas de orçamentos demasiado elevados, perfis não disponíveis para pequenas quantidades e falta de máquinas de maior precisão, como é o caso de CNC.

Assim, serão aqui apresentadas duas versões do trabalho de construção e montagem. Sendo que, na primeira pretende-se mostrar uma perspectiva explodida das pernas do robot através das ferramentas de CAD utilizadas. Juntamente com uma explicação de como deverá ser efectuado o processo de montagem.

Na segunda fase pretende-se mostrar as peças obtidas através do fabrico em máquinas convencionais, descrever resumidamente os processos de obtenção.

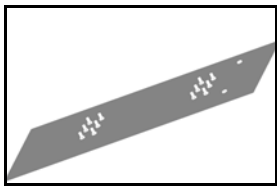
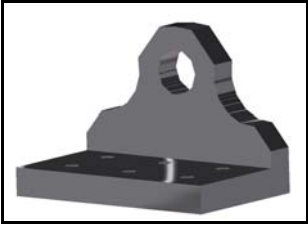


7.1. CONSTRUÇÃO E MONTAGEM VIRTUAL

Aqui serão apresentadas as peças projectadas, divididas por utilizações nas juntas, com algumas observações relativas às dimensões, materiais e outros aspectos considerados relevantes. Estas peças deveriam ser as fabricadas para garantir o correcto funcionamento do conjunto. Apresenta-se também a perspectiva explodida do conjunto para que no futuro seja possível a montagem fácil dos diferentes componentes.

7.1.1. Descrição dos Componentes






- **PÉ**

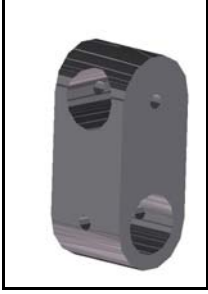
Tabela 53 – Componentes utilizados nos pés do robot.

Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Planta do Pé	Alumínio 2830Kg/m ³	Espessura: 5mm Área: 189 cm ²	0,175	
Fixação da Planta ao Veio q1L	Alumínio 2830Kg/m ³ Quantidade 2 Peças	Espessura: 5mm Fixação à planta por parafusos M3 com cabeça de embeber.	0,023	
Casquilhos q1L	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade 2 Peças	D _e = 8mm D _i = 5mm Espessura: 5mm	1,838×10 ⁻⁴	
Fixação do Motor q1L à Planta do Pé.	Alumínio 2830Kg/m ³	Espessura: 2mm Obtida a partir de um perfil rectangular cortado em baixo, no centro. Fixação com dois M3 com cabeça de embeber.	0,019	

- **JUNTA Q1**





Tabela 54 – Componentes utilizados na concepção da junta q1.


Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Veio Mandado q1	Alumínio 2830Kg/m ³	D _{max} = 10mm D _{min} = 5mm	0,015	
Engrenagem Mandada q1	Alumínio 2830Kg/m ³	N.º de dentes: Z ₂ = 24 dentes Relação de Transmissão: i ₁₂ = 2 Largura: b = 8 mm	0,01	
Veio Mandante q1	Alumínio 2830Kg/m ³	D _{max} = 15 mm D _{min} = 5 mm Furo Ø 10 mm	0,003	
Engrenagem Mandante q1	Alumínio 2830Kg/m ³	N.º de dentes: Z ₂ = 12 dentes Relação de Transmissão: i ₁₂ = 2 Largura: b = 8 mm	0,003	
Motor q1		Comprimento: L = 66mm Largura: b = 30mm Altura: h = 57,6mm	0,152	

Ligação das Juntas q1 e q2	Alumínio 2830Kg/m ³	Diâmetro dos furos igual a 10mm. Garantir um ajustamento fortemente preso.	0,014	
-----------------------------------	-----------------------------------	---	-------	---

▪ JUNTA Q2

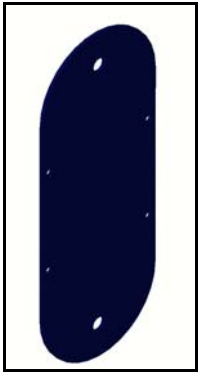

Tabela 55 – Componentes utilizados na concepção da junta q2.

Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Veio q2	Alumínio 2830Kg/m ³	$D_{max} = 10mm$ $D_{min} = 5mm$	0,017	
Casquilho q2	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade: 2 Peças	$D_e = 8mm$ $D_i = 5mm$ Espessura: 2mm	$7,351 \times 10^{-5}$	
Engrenagem Mandante q2	Alumínio 2830Kg/m ³	N.º de dentes: $Z_2 = 17$ dentes Relação de Transmissão: $i_{12} = 2$ Largura: $b = 8mm$	0,0064	
Engrenagem Mandada q2	Alumínio 2830Kg/m ³	N.º de dentes: $Z_2 = 34$ dentes Relação de Transmissão: $i_{12} = 2$ Largura: $b = 8mm$	0,029	

Motor q2		Comprimento: L = 66mm Largura: b = 30mm Altura: h = 57,6mm	0,152	
-----------------	--	---	-------	---





▪ ELO Q2_Q3




Tabela 56 – Componentes utilizados na concepção do elo de ligação das juntas q2 e q3.

Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Placas do Elo	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade: 2 Peças	Entreeixo: $e_{23} = 110\text{mm}$ Largura: 80 mm Espessura: 2mm	0,035	
Veios de Ligação das Placas	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade: 4 Peças	$D_e = 6\text{mm}$ $D_i = 3\text{mm}$ $L = 76\text{mm}$	0,002	
Parafuso M3 de Cabeça Cilíndrica de Oco Hexagonal CHC.	Aço Quantidade: 4 Peças por placa de elo.			

▪ JUNTA Q3

Tabela 57 – Componentes utilizados para gerar movimento na junta q3.

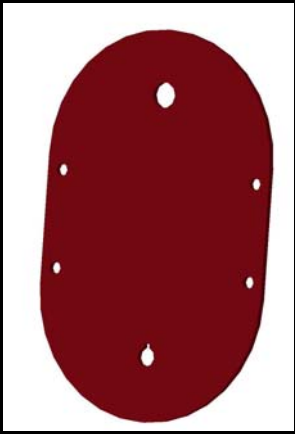

Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Veio q3	Alumínio 2830Kg/m ³	$D_{\max} = 10\text{mm}$ $D_{\min} = 6\text{mm}$	0,017	
Casquilho q3	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade 2 Peças	$D_e = 8\text{mm}$ $D_i = 6\text{mm}$ Espessura: 2mm	$7,351 \times 10^{-5}$	
Engrenagem Mandante q3	Alumínio 2830Kg/m ³	N.º de dentes: $Z_2 = 17$ dentes Relação de Transmissão: $i_{12} = 2$ Largura: $b = 8\text{mm}$	0,0064	
Engrenagem Mandada q3	Alumínio 2830Kg/m ³	N.º de dentes: $Z_2 = 34$ dentes Relação de Transmissão: $i_{12} = 2$ Largura: $b = 8\text{mm}$	0,029	

<p>Chaveta q3 (Chaveta usada para fixação aos elos)</p>	<p>Aço 7860Kg/m³ Quantidade 2 Peças</p>	<p>Comprimento: L = 5,25mm Zona contacto: L1=4,25mm Largura: b = 2mm Altura: h = 2mm</p>	<p>2,453×10⁻⁴</p>	
<p>Roseta</p>	<p>Alumínio 2830Kg/m³ Quantidade 2 Peças</p>	<p>D_e = 20mm Com escatel quadrado de 2×2 Espessura: 2mm</p>	<p>0,002</p>	
<p>Motor q3</p>		<p>Comprimento: L = 66mm Largura: b = 30mm Altura: h = 57,6mm</p>	<p>0,152</p>	

▪ ELO Q3_Q4



Tabela 58 – Componentes utilizados na concepção do elo de ligação das juntas q3 e q4.



Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
-------------	----------	-----------------	------------	--------

Placas do Elo	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade: 2 Peças	Entreeixo: e ₂₃ = 80mm Largura: 80 mm Espessura: 2mm	0,028	
Veios de Ligação das Placas	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade: 4 Peças	D _e = 6mm D _i = 3mm L = 81mm	0,002	
Parafuso M3 de Cabeça Cilíndrica de Oco Hexagonal CHC.	Aço Quantidade: 4 Peças por placa de elo.			

▪ JUNTA Q4





Tabela 59 – Componentes utilizados para gerar movimento na junta q4.


Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Veio q4	Alumínio 2830Kg/m ³	D _{max} = 10mm D _{min} = 6mm	0,019	
Casquilho q4	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade 2 Peças	D _e = 8mm D _i = 6mm Espessura: 2mm	7,351×10 ⁻⁵	

<p>Engrenagem Mandante q4</p>	<p>Alumínio 2830Kg/m³</p>	<p>N.º de dentes: $Z_2 = 17$ dentes Relação de Transmissão: $i_{12} = 2$ Largura: $b = 8\text{mm}$</p>	<p>0,0064</p>	
<p>Engrenagem Mandada q4</p>	<p>Alumínio 2830Kg/m³</p>	<p>N.º de dentes: $Z_2 = 34$ dentes Relação de Transmissão: $i_{12} = 2$ Largura: $b = 8\text{mm}$</p>	<p>0,029</p>	
<p>Perfil de Ligação da junta q4 à junta q5</p>	<p>Alumínio 2830Kg/m³</p>	<p>Comprimento: 76 mm Largura: 30 mm Altura: 36 mm</p>	<p>0,046</p>	
<p>Motor q4</p>		<p>Comprimento: $L = 66\text{mm}$ Largura: $b = 30\text{mm}$ Altura: $h = 57,6\text{mm}$</p>	<p>0,152</p>	

▪ JUNTA Q5

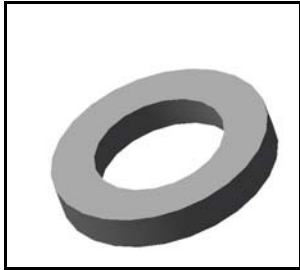
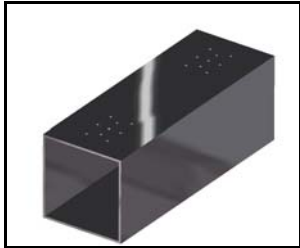

Tabela 60 – Componentes utilizados para concepção da junta q5.

Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Casquilho q5	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade 2 Peças	D _e = 8mm D _i = 6mm Espessura: 2mm	6,656×10 ⁻⁵	
Parafuso M6 Adaptado	Aço	Comprimento do parafuso: 9mm Este parafuso será maquinado na ponta para obter-se uma superfície plana na extremidade, de modo a distribuir a carga do colocada sobre o motor q5.		Pseudo Parafuso só para ver a extremidade a maquinar. 
Perfil para Suporte do Motor q5	Alumínio 2830Kg/m ³ Perfil rectangular	Comprimento: 44 mm Largura: 64 mm Altura: 34 mm	0,022	
Perfil de Ligação da junta q5 à junta q4	Alumínio 2830Kg/m ³ Perfil em U	Comprimento: 35 mm Largura: 79,5 mm Altura: 45 mm	0,035	

Motor q5		Comprimento: $L = 66\text{mm}$ Largura: $b = 30\text{mm}$ Altura: $h = 57,6\text{mm}$	0,152	
-----------------	--	--	-------	---

▪ **JUNTA Q6**

Tabela 61 – Componentes utilizados para concepção da junta q6.

Componentes	Material	Características	Massa (kg)	Figura
Suporte de Carga q6	Nylon 1390Kg/m ³ Quantidade 1 Peças	$D_e = 50\text{ mm}$ $D_i = 32\text{ mm}$ Espessura: 9mm	$6,351 \times 10^{-5}$	
Perfil de Ligação das Pernas	Alumínio 2830Kg/m ³ Perfil Quadrado	Comprimento: 210 mm Largura: 76 mm Altura: 76 mm	0,035	
Motor q6		Comprimento: $L = 66\text{mm}$ Largura: $b = 30\text{mm}$ Altura: $h = 57,6\text{mm}$	0,152	

7.1.2. Perspectiva Explodida

Nesta fase apresentam-se várias vistas da perspectiva explodida do conjunto das pernas que por ter demasiados componentes é bastante difícil, mostrar e explicar o modo de montagem mais indicado nas diferentes partes das pernas.

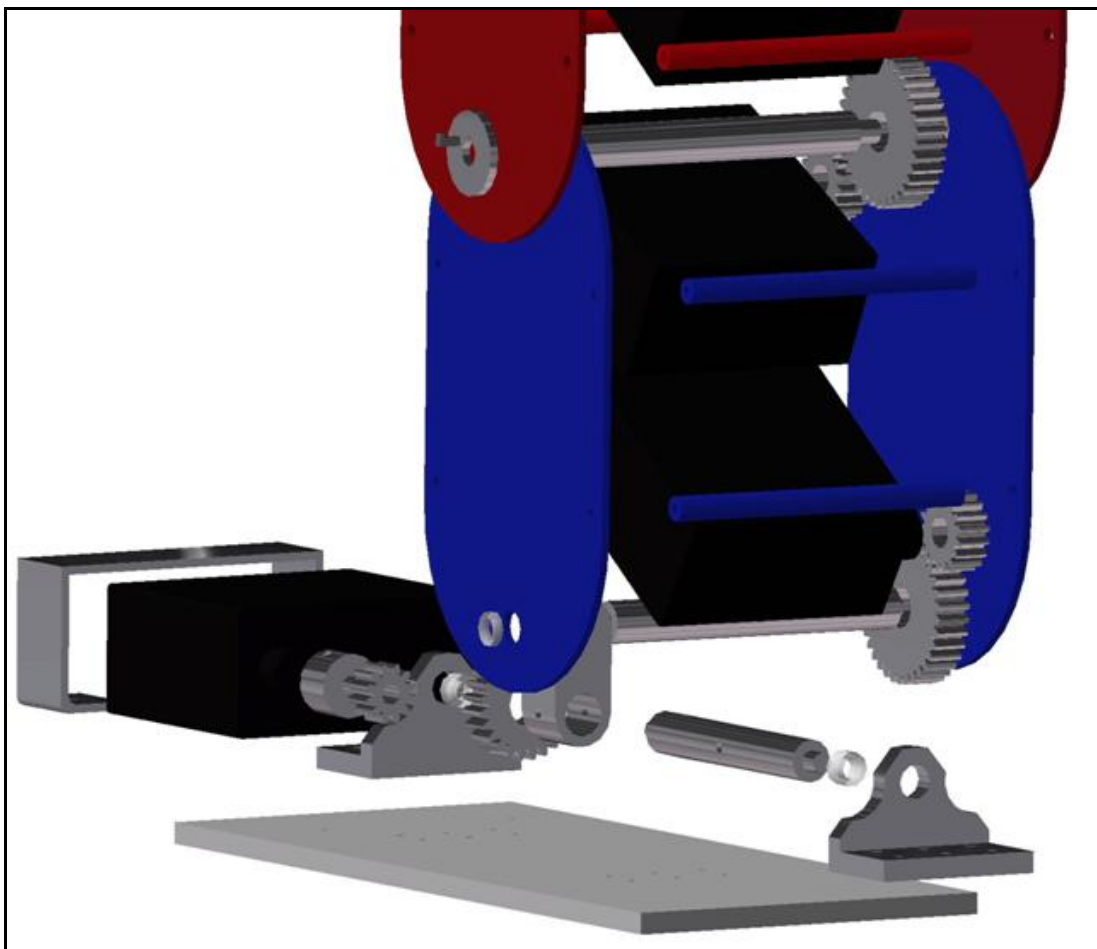


Figura 88 – Perspectiva explodida onde podemos ver os componentes usados no pé e nas juntas q1 e q2.

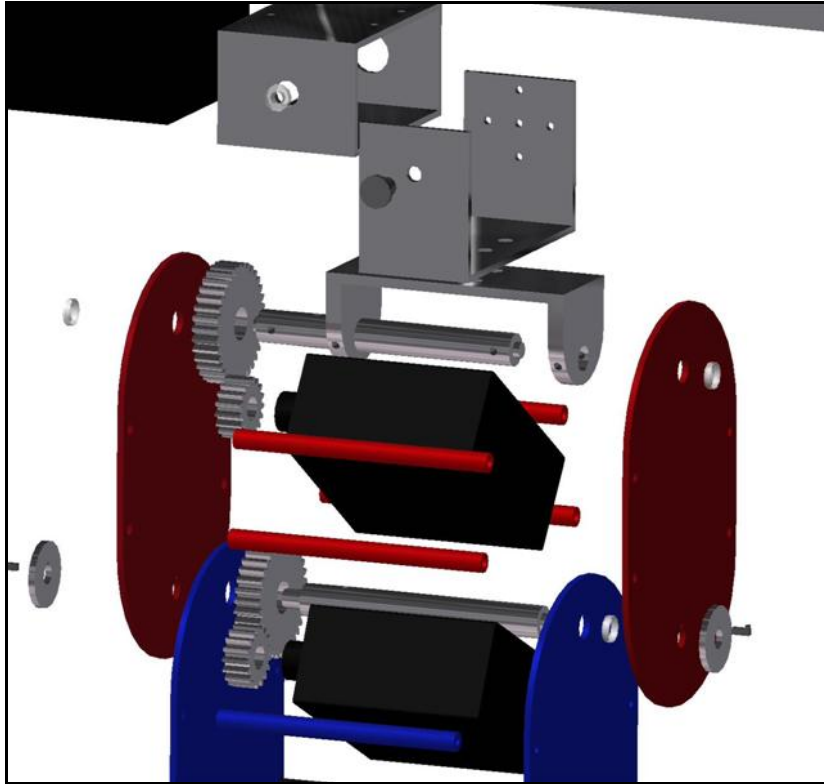


Figura 89 – Perspectiva explodida da junta q3 e q4 onde se pode ver o modo de encaixe dos componentes.

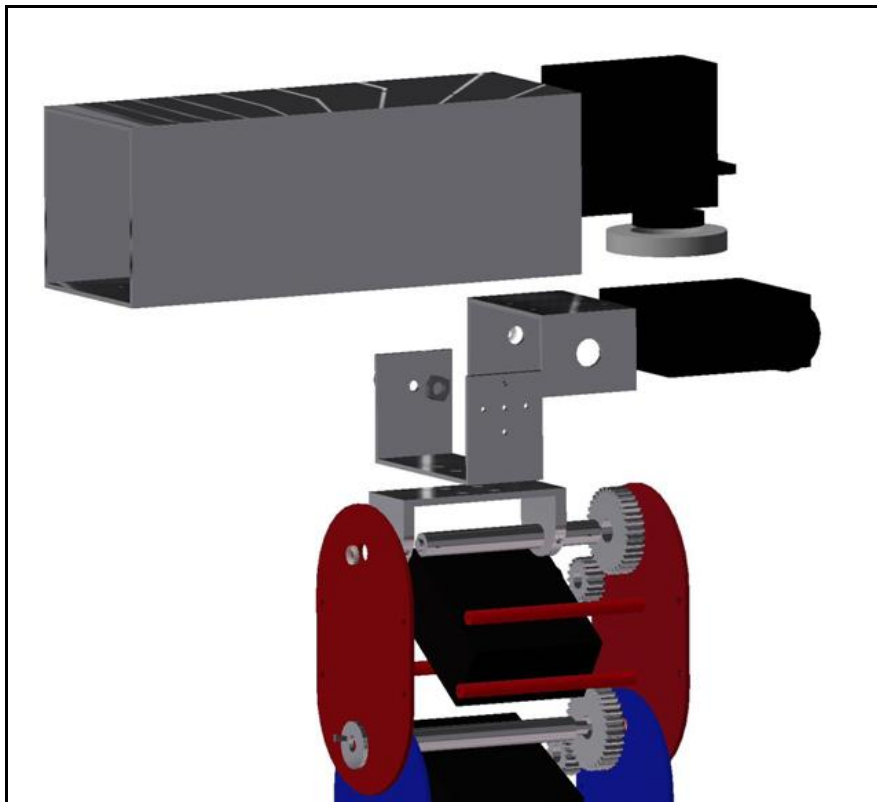


Figura 90 – Perspectiva explodida, vista de frente da junta esférica existente na anca.

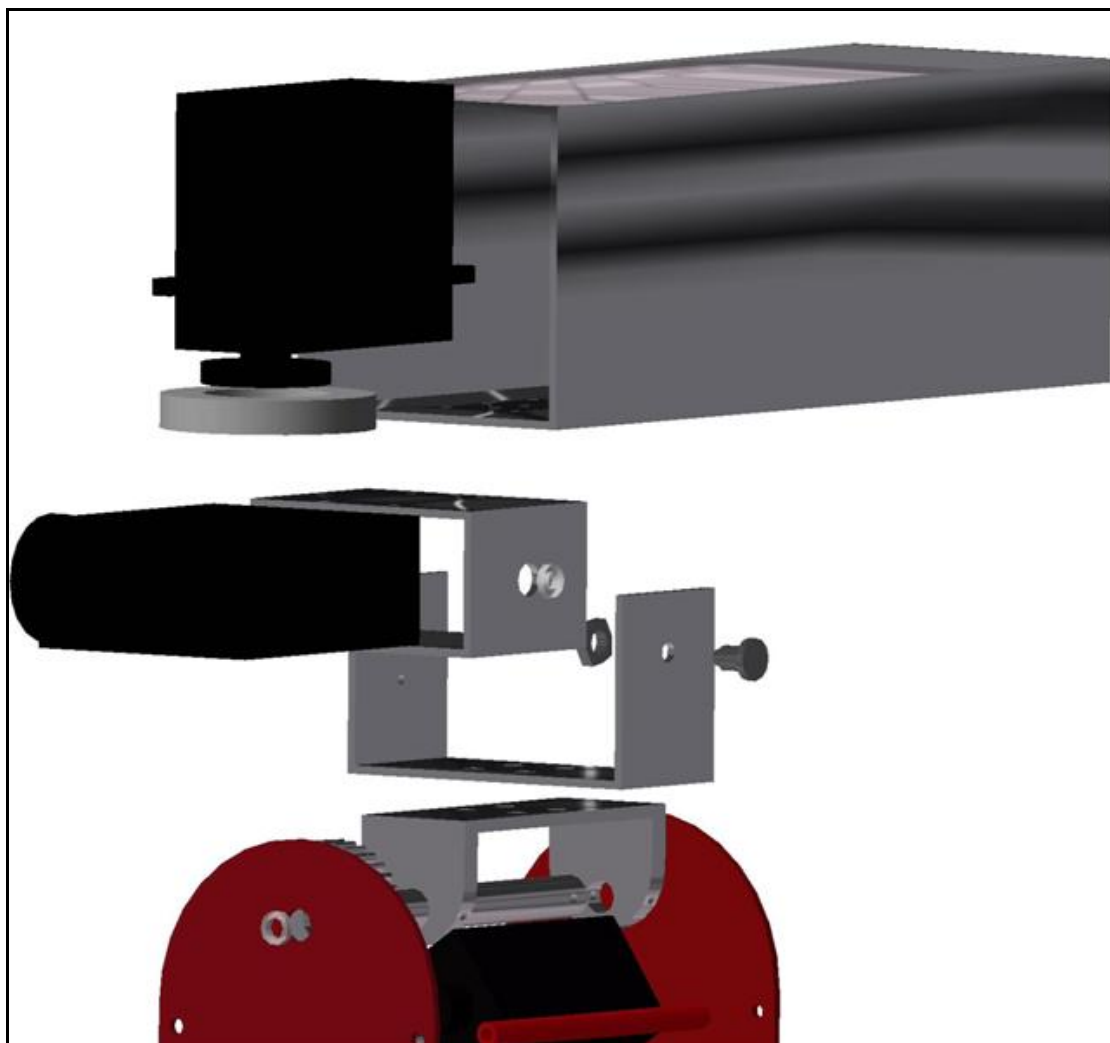


Figura 91 – Perspectiva explodida da junta esférica, vista de trás.


7.2. CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Nesta fase do projecto, pretende-se enunciar os processos de fabrico utilizados para concepção das pernas e anca do robot, e mostrar quais os resultados reais obtidos, que nem sempre se encontrarão de acordo com aquilo que foi projectado e apresentado no sub capítulo anterior.

7.2.1. Componentes Maquinados e Processos de Fabrico

- **PÉ**





Tabela 62 – Componentes utilizados nos pés do robot.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
Planta do Pé	A planta do pé do robot foi obtida a partir de material comprado a LANEMA, S.A., que forneceu o material já com a largura pretendida. Posteriormente, foi cortado na serra de fita o comprimento pretendido e depois foi furado na furadora manual.	
Fixação da Planta ao Veio q1L	Esta peça devido as formas circulares teria de ser maquinada numa máquina CNC. Optou-se pela fabricação destas peças fora do DEMUA, na empresa Rui Couto, Lda.	
Casquilhos q1L	Os materiais para fazer os casquilhos apresentavam uma maquinabilidade muito baixa. Por isso optou-se pela utilização de latão que apesar de ser um material mais pesado, apresenta uma maquinabilidade excelente conseguindo-se no torno convencionais tolerâncias mais rigorosas.	
Fixação do Motor q1L à Planta do Pé.	<p>Devido a não se conseguir encontrar perfis com pequenos comprimentos para as dimensões anteriormente especificadas, e visto o orçamento para maquinagem deste ser demasiado elevado.</p> <p>Optou-se por cortar chapa com as dimensões exteriores do perfil e posteriormente quinar duas vezes cada extremidade das chapas para obter o perfil desejado.</p> <p>Verificou-se que a quinagem não era um processo rigoroso e assim tiveram de ser maquinados calços para preencher o espaço em excesso.</p>	

▪ JUNTA Q1



Tabela 63 – Componentes utilizados na concepção da junta q1.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
-------------	---	--------

<p>Veio Mandado q1</p>	<p>O veio mandado utilizado para a junta q1, foi maquinado no torno convencional. Os furos para fixação das engrenagens e do elemento de ligação das juntas q1 e q2, foram efectuados na furadora manual devido a estes se encontrarem transversalmente ao eixo de rotação do veio e assim não sendo possível realiza-los no torno.</p>	
<p>Engrenagem Mandada q1</p>	<p>Inicialmente pretendia-se que as engrenagens fossem maquinadas na empresa, PJJ Ferramentas, através do processo de electroerosão a fio. Mas devido ao elevado orçamento proposto por estes, optou-se pela compra de engrenagens já maquinadas em aço existentes na Pinhol Equipamentos Industriais, Lda.</p> <p>Estas engrenagens tinham cubo lateral e uma largura de dentado de 15mm.</p> <p>Visto estas serem dimensões demasiado elevadas para o que era pretendido, decidiu-se sangrar as engrenagens no torno convencional e posteriormente rectificá-las para a dimensão de 8mm de dentado.</p>	
<p>Veio Mandante q1</p>	<p>O veio aqui obtido também foi maquinado através de operações de torneamento numa máquina convencional.</p> <p>Sendo que, é de referir que todos os veios em alumínio maquinados foram obtidos a partir de perfil quadrado, que era o único disponível na liga pretendida.</p>	
<p>Engrenagem Mandante q1</p>	<p>Ta como para a engrenagem mandada q1 o processo de obtenção das engrenagens foi o mesmo.</p>	
<p>Ligação das Juntas q1 e q2</p>	<p>Esta peça devido as formas circulares teria de ser maquinada numa máquina CNC, visto esta não estar disponível quando necessária.</p> <p>Optou-se pela fabricação destas peças fora da oficina do DEMUA, na empresa Rui Couto, Lda.</p>	

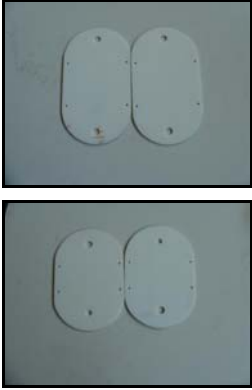
- **JUNTA Q2**


Tabela 64 – Componentes utilizados na concepção da junta q2.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
Veio q2	O veio mandado utilizado para a junta q2, foi maquinado no torno convencional existente na oficina do DEMUA. E os furos para fixação das engrenagens e do elemento de ligação das juntas q1 e q2, foram efectuados na furadora manual da mesma.	
Engrenagem Mandante e Mandada q2	As engrenagens utilizadas para transmitir o movimento entre o motor e o veio mandado da junta foram obtidas tal como foram obtidas as engrenagens utilizadas na junta q1.	

- **ELO Q2_Q3 E ELO Q3_Q4**



Tabela 65 – Componentes utilizados na concepção do elo de ligação das juntas q2 e q3.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
Placas do Elo	Os elos foram inicialmente maquinados na oficina do DEMUA. Mas devido aos materiais utilizados, as pequenas dimensões das chapas, verificou-se que não era possível obter os toleranciamentos necessários para o correcto funcionamento destes no conjunto. Assim, optou-se pela fabricação destes na empresa Rui Couto, Lda.	

<p>Veios de Ligação das Placas</p>	<p>Os veios de ligação também foram fabricados na empresa Rui Couto, Lda..</p>	
---	--	---



▪ **JUNTA Q3**

Tabela 66 – Componentes utilizados para gerar movimento na junta q3.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
<p>Veio q3</p>	<p>O veio mandado utilizado para a junta q3, foi maquinado no torno convencional existente na oficina do DEMUA. E os furos para fixação da engrenagem foi efectuado na furadora manual.</p>	
<p>Engrenagem Mandante e Mandada q4</p>	<p>As engrenagens utilizadas para transmitir o movimento entre o motor e o veio mandado da junta foram obtidas tal como foram obtidas as engrenagens utilizadas na junta q1.</p>	
<p>Chaveta q3 (Chaveta usada para fixação aos elos)</p>	<p>Em vez de utilizarmos, uma chaveta a qual seria difícil de encontrar devido as baixas dimensões, usou-se um pino que fixa os componentes conforme desejado e com bastante estabilidade.</p>	
<p>Roseta</p>	<p>A roseta foi maquinada no torno convencional, sendo que o escatel que deveria existir deu lugar a um furo no qual entrará um pino que irá garantir a fixação do elo q3_q4 e do veio q3.</p> <p>Optou-se por esta solução, visto ser difícil e dispendioso maquinar escatéis de tão pequenas dimensões.</p>	

▪ **JUNTA Q4**

Tabela 67 – Componentes utilizados para gerar movimento na junta q4.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
Veio q4	O veio mandado utilizado para a junta q4, foi maquinado no torno convencional existente na oficina do DEMUA. E os furos para fixação das engrenagens, foram efectuados na furadora	
Engrenagem Mandante e Mandada q4	As engrenagens utilizadas para transmitir o movimento entre o motor e o veio mandado da junta foram obtidas tal como foram obtidas as engrenagens utilizadas na junta q1.	
Perfil de Ligação da junta q4 à junta q5	Este perfil tem 5 mm de parede lateral pelo que não seria possível obtê-lo através do processo de quinagem. Assim, o Eng.º António Festas disponibilizou-se a maquina-los na CNC.	

▪ **JUNTA Q5**


Tabela 68 – Componentes utilizados para concepção da junta q5.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
Parafuso M6 Adaptado		

<p>Perfil para Suporte do Motor q5</p>	<p>O perfil rectangular a ser utilizado não foi obtido nas empresas, devido às pequenas quantidades pretendidas.</p> <p>Por isto, verificou-se a necessidade de adoptar uma nova solução. Esta solução consiste na obtenção de um perfil em U, através do processo de quinagem e que juntamente com duas cavilhas roscadas M3, fixa o motor da junta q5.</p>	
<p>Perfil de Ligação da junta q5 à junta q4</p>	<p>O perfil pretendido não foi comprado e foi obtido através de chapa de 2mm cortada com as dimensões desejadas e posteriormente quinadas a 90°, em duas das extremidades da chapa.</p> <p>Tal como em outros casos, as dimensões pretendidas e as resultantes do processo de quinagem não foram as mesmas pelo que serão utilizadas peças de nylon para encher o espaço excedente.</p>	

▪ **JUNTA Q6**

Tabela 69 – Componentes utilizados para concepção da junta q6.

Componentes	Processos de Fabrico e Outras Observações	Figura
<p>Suporte de Carga q6</p>	<p>Esta peça foi obtida através de torneamento convencional. Em que o furo interior foi obtido por facejamento interior, com ferro de corte próprio.</p>	
<p>Perfil de Ligação das Pernas</p>	<p>Tal como para os outros perfis que se pretendiam utilizar aqui também não foi conseguido obter o perfil desejado. Assim, utilizamos quatro chapas com largura de 80mm e quatro cantoneiras de pequenas dimensões, para ligação das quatro chapas.</p>	

Alguns dos componentes aqui apresentados não tem fotografias associadas, de qualquer forma deixa-se nesta fase algumas imagens que permitem mostrar o que com bastante esforço foi conseguido durante o fabrico das pernas.



Figura 92 – Componentes não montados, juntas q5, q6 e ligação das pernas.

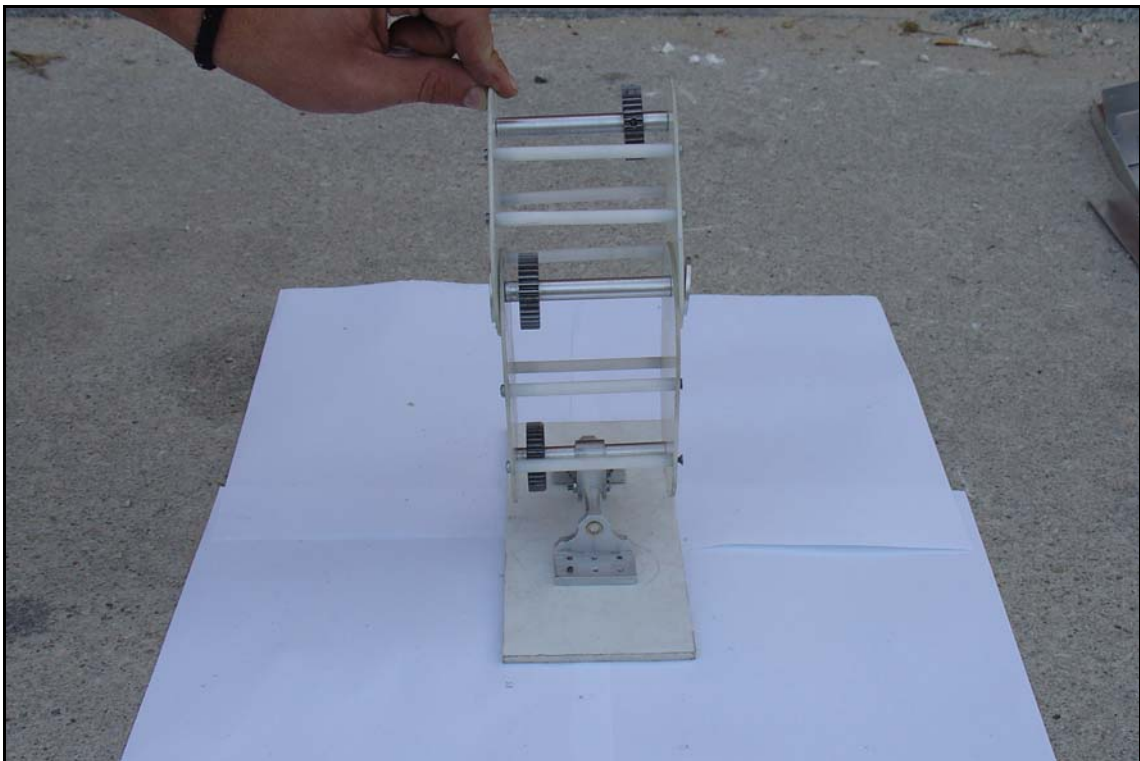


Figura 93 – Perna apenas com os componentes mandados.

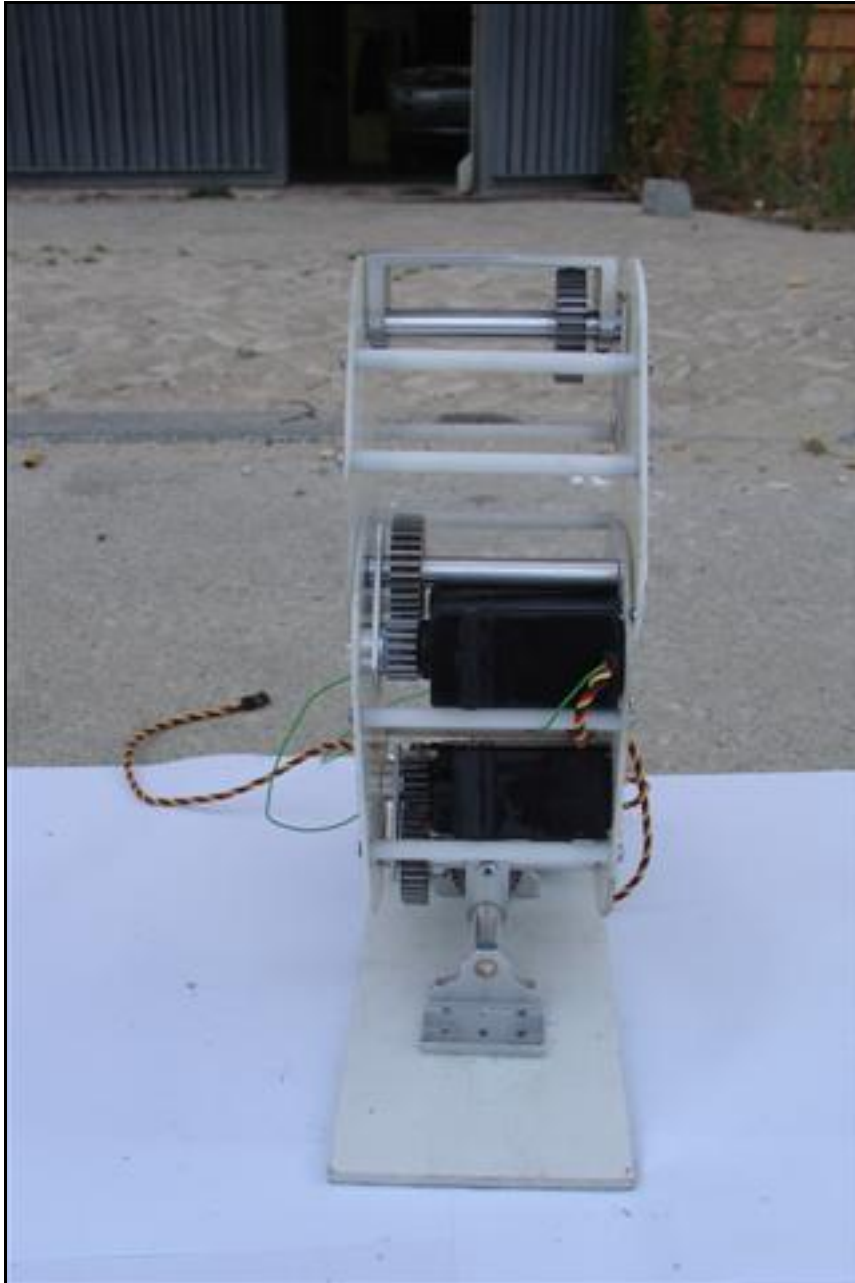


Figura 94 – Perna com actuação na junta q_2 e q_3 .

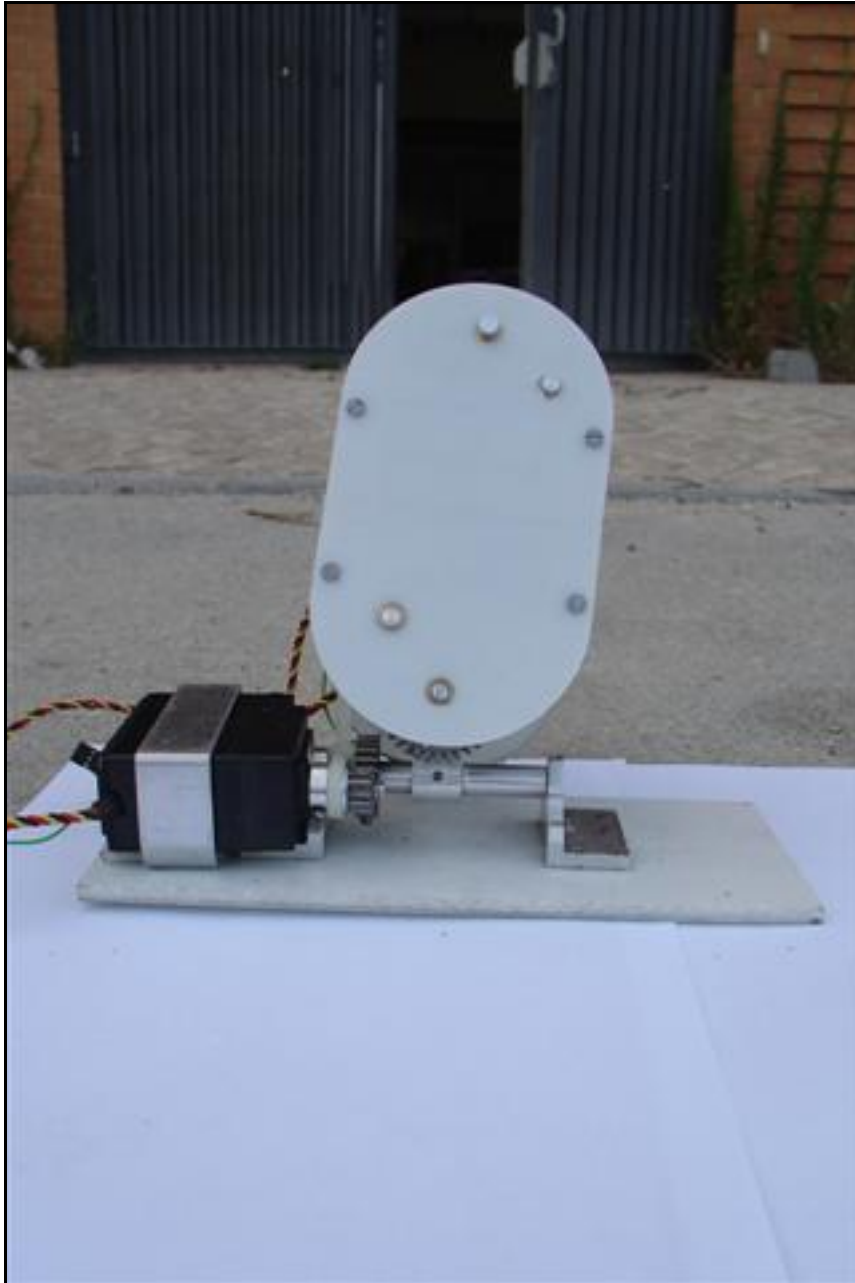


Figura 95 – Junta q1 com o motor gerador de movimento.



Figura 96 – Perna esquerda e direita não completamente montadas.

8. CONCLUSÃO

Ao longo deste projecto verificou-se que as matérias envolvidas nos estudos funcionais de uma plataforma humanóide, eram imensas. Foi então necessária uma constante (re)aprendizagem de diversas matérias essenciais à realização deste projecto, pelo que apesar das dificuldades considera-se que foi dado um grande passo na robótica praticada neste Departamento, devido ao desenvolvimento de um sistema robótico tão complexo.

Os resultados obtidos através dos modelos e simulações permitem concluir que os binários dos motores, juntamente com as relações de transmissão usadas nas juntas mais solicitadas são adequados para a execução do movimento das pernas, apesar da margem de manobra ser um pouco limitada.

Devido a esta limitação, verificou-se que os padrões de locomoção poderão vir a ter um papel essencial para o movimento do robot, tendo sempre em conta a complexidade do andar humano, no qual não só os pés têm de se mover, como também as ancas, os braços, os ombros e a cabeça se têm de mover em sincronia, de modo a manter o sistema estável. Apesar de este estudo focar apenas as pernas, (só seis juntas) é

necessário não esquecer que quando o robot estiver completo os braços e o tronco terão uma influência decisiva na performance do sistema, alterando substancialmente a forma de locomoção do mesmo.

Relativamente às simulações elaboradas, faltou a realização da cinemática inversa que permitiria através do comprimento do passo obter os ângulos de junta necessários para efectuar este. Aconselha-se assim, a realização desta tarefa que não foi concretizada durante a elaboração deste projecto.

A construção das pernas não se verificou tão linear como se esperava, pois após modelação dos componentes da plataforma, verificou-se que nem sempre era possível haver resposta às necessidades exigidas. Assim, utilizaram-se métodos menos rigorosos para fabrico dos componentes, e isso revelou-se na falta de precisão, até certo ponto exagerada, de algumas peças. A posterior substituição destas peças deverá ser efectuada.

A montagem dos componentes verificou-se difícil, principalmente por fornecedores e empresas que prestaram serviços ao projecto e que não cumpriram os prazos de entrega.

Apesar de todas as contrariedades, que foram sem dúvida imensas, a vontade de continuar manteve-se até ao fim e, mesmo não tendo sido possível a construção completa das pernas, muito foi feito. Assim, Deixa-se toda a informação relevante durante a execução deste projecto para uma posterior continuação, pois consideramos importante a conclusão da construção do protótipo completo.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] FU, K. S.; GONZALEZ, R. C.; LEE, C. S. G. - **Robotics: control, sensing, vision and intelligence**. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [2] JONES, J. L.; FLYNN, A. M. - **Mobile Robots: Inspiration to implementation**. A. K. Peters, 1993.
- [3] MCKERROW, P.J. - **Introduction to Robotics**. Sydney: Addison-Wesley, 1995.
- [4] MORAIS, A. B. - **Órgãos de Máquinas: textos de apoio**. Departamento De Engenharia Mecânica: Universidade de Aveiro, 2002.
- [5] SANTOS, V. - **Apontamentos de Robótica Industrial**. Departamento de Engenharia Mecânica: Universidade de Aveiro, 2001.
- [6] MORAIS, Simões - **Desenho Técnico Básico 3: Desenho de Construções Mecânicas**. [s.l.]: Porto Editora, 2000.
- [7] OLIVEIRA, Filipe - **Apontamentos de Materiais de Construção Mecânica**. Departamento de Engenharia Cerâmica e Vidro: Universidade de Aveiro, 2002.
- [8] CARNEIRO, J.A.; QUEIRÓS de MELO, F.J.; CARDOSO, R.P. - **Mecânica Aplicada I**. Departamento de Engenharia Mecânica: Universidade de Aveiro, 2003.
- [9] DAS; KASSIMAL; SAMI – **Engineering Mechanics: Dynamics**.
- [10] MORAIS, A.B. - **Mecânica das Estruturas**. Departamento de Engenharia Mecânica: Universidade de Aveiro, 2002.
- [11] Lanema - **Catálogo técnico da Lanema**, 2003.

- [12] Pinhol – **Catálogo Online**, 2004.
- [13] Extrusal – **Catálogo Online**, 2004.
- [14] WILLIAM; WARWICK; [et al] - **Gray Anatomia**. Brasil: Editora Guanavara Koogan.
- [15] GROOVER, P. M.; WEISS, M.; [et al] - **Industrial Robotics**. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [16] HUNT, V. D. - **Industrial Robotics Handbook**. New York: Industrial Press, 1983.
- [17] MCCLOY, D.; HARRIS, D.M. – **Robotics: an introduction**. Milton Keynes: Open University Press, 1986.
- [18] RENÉ, David - **Petri Nets and Grafcet: tools for modelling discrete event systems**. New-York : Prentice Hall, 1992.
- [19] WOLFGANG, Reisig - **A Primer in Petri Net Design**. Berlin: Springer, 1992.
- [20] PIRES, J.N. - **Técnicas de Automação**. ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2004.
- [21] NICHOLLS, Elliot - **Bipedal Dynamic Walking in Robotics: Honour Thesis**. University of Western Australia, 1998.
- [22] NAKAJIMA; YONEMURA; KAWAMURA - **Experimental Approach for the Fast Walking by the Biped Walking Robot MARI-1**. Yokohama: Dept. of Elec. and Comp. Eng., Yokohama National University.

- [23] CHANCHAI; PRABHAS - **Automatic Synthesis of Robot Programs for a Biped Static Walker by Evolutionary Computation**. Bangkok: Chulalongkorn University, 2001.
- [24] ENDO; YAMASAKI; [et al] – **A Method for Co- Evolving Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot**. Washington, DC: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2002.
- [25] KIM, Jung-Hoon; PARK, Seo-Wook; [et al] – **Development of a Humanoid Biped Walking Robot Platform KHR-1: Initial Design and Its Performance Evaluation**. Republic of Korea: Department of Mechanical Engineering.
- [26] GONÇALVES, Nelson; SILVA, Pedro - **Robot Bípede: Relatório do Trabalho Final de Curso**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2002.
- [27] LIM, Hun-ok; ISHII, A.; TAKANISHI, A. – **Basic Emotional Walking Using a Biped Humanoid Robot**. Japan: Department of Mechanical Engineering, Waseda University.
- [28] CHEW, Chee- Meng - **Blind Walking of a Planar Biped on Sloped Terrain**. Massachusetts: Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [29] IMAI, H.; NOZAWA, M.; [et al] – **Human Motion Oriented Control Method for Humanoid Robot**. Japan: University of Tsukuba, 2002.
- [30] TANIE, Kazuo – **Humanoid Robot and its Application Possibility**. Japan: National Institute of Advanced Science and Technology, 2003.
- [31] FUJITSU – **HOAP 1 Design Specification**.
- [32] FUJITSU – **HOAP 2 Design Specification**.

- [33] PALUSKA, D. J. - **Design of a Humanoid Biped for Walking Research**. Massachusetts: Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [34] IAKOVLEV, Alexander; KRITCHOUN, Alexei – **Team Description ARNE**. St. Petersburg: NE Company, 2003.
- [35] IMURA, Shuji; MAEDA N. - **Description of HITS Dream Team "Firststep" by Honda International Technical School (HITS)**. Japan: Honda International Technical School, 2003.
- [36] OKAMOTO, Keiichi; OKAMOTO, Yayoi - **Team "Foot-Prints"**. Japan, 2003.
- [37] NORDIN, Peter; NORDAHL, Mats G. - **An Evolutionary Architecture for a Humanoid Robot**. Goteborg: Chalmers University of Technology, Institute of Physical Resource Theory.
- [38] Furuta, T; Kitano, H.; [et al] – **ERATO Kitano Project**. Registration information to Robocup 2003.
- [39] PIKE, Tim – **Gait Generation for a Humanoid Robot**. Brisbane: University of Queensland, 2003.
- [40] KEE, D. – **GuRoo**. Registration information to Robocup 2003.
- [41] RAWICHOTE, C.; AONO, M.; [et al] – **Osaka University "Senchans 2003"**. Osaka: Osaka University, 2003.
- [42] KANEKO, K.; KANEHIRO, F.; [et al] - **Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP**. Lausanne: Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, 2002.

- [43] MENGA, G.; [et al] - **The Isaac project: development of an autonomous biped robot**. Torino: Politecnico di Torino, 2003.
- [44] FACONTI, D.; [et al] - **The Isaac Project: development of an autonomous biped robot**. Torino: Politecnico di Torino, 2003.
- [45] BROLIN, S.; BRAN, A.; ASPLUND, L. - **Team Description Murphy / Murray Humanoid League Robocup 2003**. Sweden: Uppsala University, 2003.
- [46] YAMASAKI, F.; KITANO, H.; [et al] - **PINO The Humanoid that Walk**. Japan: Kitano Symbiotic Systems Project.
- [47] YAMASAKI, F.; KITANO, H.; [et al] - **PINO The Humanoid: A Basic Architecture**. Japan: Kitano Symbiotic Systems Project.
- [48] CHRISTENSEN, H. - **Intelligent Home Appliances**. Stockholm: Centre for Autonomous Systems, Numerical Analysis and Computer Science Royal Institute of Technology.
- [49] LAM, P.; BALTES J. - **Tao-Pie-Pie: Humanoid robot**. Auckland: Centre for Imaging Technology and Robotics, University of Auckland.
- [50] ZHOU, C.; [et al] - **Robo-Erectus: A Soccer-Playing Humanoid Robot**. Singapore: School of Electrical and Electronic Engineering, Singapore Polytechnic.

Sites Consultados:

<http://home4.highway.ne.jp/nagasaka/ape.htm>

<http://homepage3.nifty.com/Chocopa/fp/>

<http://www.symbio.jst.go.jp/>

<http://www02.so-net.ne.jp/~itou/Silf-H2.html>

<http://avocet.cs.umanitoba.ca/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=8>

<http://www.hh.se/stud/pt00elpr/>
<http://humanoid.fy.chalmers.se/>
<http://www.automation.fujitsu.com/en/products/products09.html>
<http://www.isaacrobot.org/>
<http://www.symbio.jst.go.jp/PINO/index.html>
<http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/top.html>
<http://www.robo-erectus.org/>
<http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200011/00-057E2/>
<http://world.honda.com/ASIMO/>
<http://www.hotbox.ru/start.php>
<http://www.hondacollege.ac.jp/>
<http://www.itee.uq.edu.au/~damien/GuRoo/>
http://www.kawada.co.jp/ams/hrp-2/index_e.html
http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/h6/H6_H7.html
<http://lucy.vub.ac.be/>
<http://www.docs.uu.se/robocup/DVP2001/>
<http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/>
http://www-personal.engin.umich.edu/~artkuo/Passive_Walk/passive_walking.html
http://www.frontiernet.net/~imaging/gait_model.html
<http://www.control.hut.fi/Publications/Haavisto-2004/>
<http://www.daimi.au.dk/PetriNets/>
<http://www.21stcentury.co.uk/robotics/index.asp>
<http://www.androidworld.com/>
<http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/index-eg.html>
<http://www.tam.cornell.edu/~ruina/hplab/>
<http://www.tam.cornell.edu/~ruina/hplab/>
<http://pr.fujitsu.com/en/news/2001/09/10.html>
<http://www.automation.fujitsu.com/en/>
<http://world.honda.com/ASIMO/>
<http://www.uc3m.es/uc3m/dpto/IN/dpin04/indexrob.html>
<http://borneo.gmd.de/mailman/listinfo/humanoid>
http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/h6/H6_H7.html
http://www.dh.aist.go.jp/research/humanoid/H6_H7.html
http://www.kawada.co.jp/ams/isamu/index_e.html

http://www.kawada.co.jp/ams/isamu/index_e.html
<http://www.humanoid.waseda.ac.jp/>
<http://www.humanoid.waseda.ac.jp/Humanoids2001/>
<http://www.ai.mit.edu/projects/humanoid-robotics-group/>
<http://www.isaacrobot.org/>
<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/~kuffner/humanoid/>
http://www.machinebrain.com/General_Robotics/Humanoid_Robotics/
<http://tam.cornell.edu/students/garcia/msghomepage.html>
<http://www-2.cs.cmu.edu/~robocup2001/>
<http://www.ais.fraunhofer.de/robocup/HL2003/teams.html>
<http://www.robocup.org/02.html>
<http://www.robocup2004.pt/>
<http://www.robotcafe.com/>
<http://www.robotics.com/robots.html>
http://www.ece.unh.edu/robots/rbt_home.htm
<http://robots.net/>
<http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/top.html>
<http://www.joinme.net/robotwise/>
<http://www.jameson.hpg.ig.com.br/index.html>