

# **Construção de um Robô Humanóide para Humanoid League – Futebol de Robôs**

**Relatório Final  
2011**

Orientador: Reinaldo Bianchi

Departamento: Engenharia Elétrica

Aluno: Milton Peres Cortez Junior

Nº FEI: 11.107.777-2

---

## ÍNDICE

|   |               |
|---|---------------|
| <b>1) RESUMO .....</b>                          | <b>- 1 -</b>  |
| 1.1) PALAVRAS CHAVE .....                       | - 1 -         |
| 1.2) OBJETIVO .....                             | - 1 -         |
| <b>2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>           | <b>- 2 -</b>  |
| 2.1) ROBÔS HUMANÓIDES .....                     | - 2 -         |
| 2.2) GRAUS DE LIBERDADE .....                   | - 3 -         |
| 2.3) DINÂMICA HUMANÓIDE .....                   | - 4 -         |
| 2.3.1) ZERO MOMENT POINT .....                  | - 4 -         |
| 2.3.2) EQUACIONAMENTO DO ZMP .....              | - 5 -         |
| 2.3.3) CENTER OF PRESSURE .....                 | - 7 -         |
| 2.4) MATERIAIS .....                            | - 7 -         |
| 2.4.1) SERVO MOTOR .....                        | - 7 -         |
| 2.4.2) ESTRUTURA .....                          | - 8 -         |
| <b>3) DESENVOLVIMENTO .....</b>                 | <b>- 9 -</b>  |
| 3.1) USINAGEM DE PEÇAS .....                    | - 9 -         |
| 3.2) AJUSTES .....                              | - 10 -        |
| 3.3) MONTAGEM .....                             | - 11 -        |
| <b>4) ELETRÔNICA .....</b>                      | <b>- 18 -</b> |
| <b>5) TESTES .....</b>                          | <b>- 20 -</b> |
| 5.1) NOTAÇÃO .....                              | - 20 -        |
| 5.2) METODOLOGIA DE TESTE .....                 | - 21 -        |
| 5.3) REFERÊNCIAS DE MEDIÇÃO .....               | - 22 -        |
| 5.4) TESTE DE INCLINAÇÃO NO PLANO FRONTAL ..... | - 23 -        |
| 5.5) TESTE DE INCLINAÇÃO NO PLANO SAGITAL ..... | - 23 -        |
| <b>6) RESULTADOS .....</b>                      | <b>- 25 -</b> |
| 6.2) TESTE DE INCLINAÇÃO NO PLANO FRONTAL ..... | - 25 -        |
| <b>7) CONCLUSÃO .....</b>                       | <b>- 27 -</b> |
| <b>8) AGRADECIMENTOS .....</b>                  | <b>- 28 -</b> |
| <b>9) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>      | <b>- 29 -</b> |

## 1)Resumo

O presente trabalho consiste na descrição da construção de um robô humanóide, destinado a aplicações em pesquisa, apto a participar de competições de futebol de robôs organizadas a nível mundial pela *Robocup* [1]. Para tanto, o projeto obedece aos moldes da *Humanoid-League KidSize* [2],

São introduzidos os conceitos de ZMP (*Zero Moment Point*) [3] e CoP (*Center of Pressure*) [4], importantes referências a respeito da dinâmica bípede e que posteriormente favorecerão o controle do robô.

### 1.1) Palavras Chave

Robôs Humanóides; Equilíbrio; Locomoção Bípede; Robocup; Humanoid League.

### 1.2) Objetivo

Nesta iniciação científica, tem-se como objetivo a construção de um robô humanóide capaz de jogar futebol, dando continuidade a trabalhos prévios e permitindo a participação da FEI nos campeonatos organizados pela *Robocup*.

## 2) Revisão Bibliográfica

### 2.1) Robôs Humanóides

A partir da década de 80, com o avanço da eletrônica aliado ao surgimento de processadores de alta capacidade de processamento e pequeno tamanho físico, tem início o aparecimento de diversos projetos de robôs humanóides, o mais famoso entre eles é o ASIMO [5] (Advanced Step in Innovative MObility) da Honda Motors que teve seu projeto iniciado em 1986 e atualmente é referência no assunto. Na figura a seguir pode ser vista a seqüência evolutiva do ASIMO desde a sua criação.

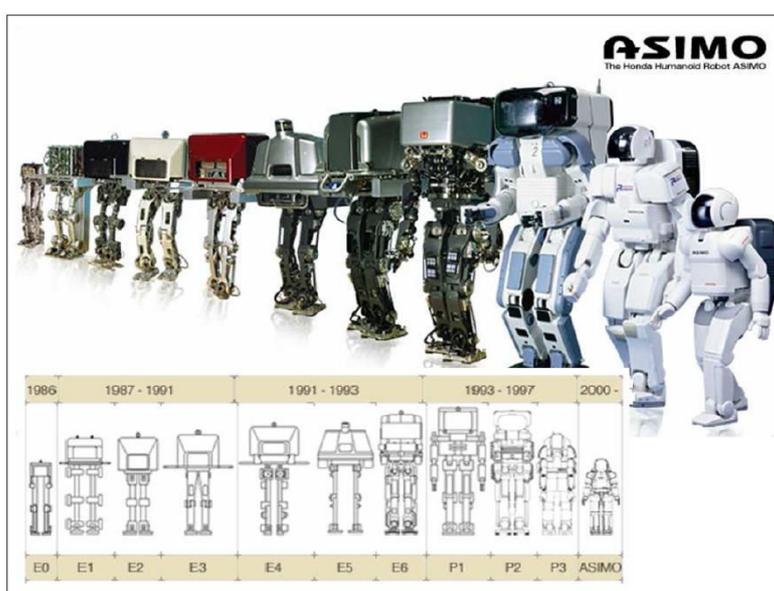


Figura 1 – Linha Cronológica do robô ASIMO [5].

Exemplos mais próximos do que se pretende desenvolver nesta iniciação científica são o Qrio fabricado pela Sony [6] e o NAO da Aldebaran Robotics [7]. Ambos são robôs de pequeno porte (aproximadamente 60cm de altura) largamente utilizados como plataforma de pesquisa em diversos centros acadêmicos do mundo. Sendo o NAO inclusive, o robô utilizado na *Standard Platform League* da *Robocup*.



(a)



(b)

Figura 2 – Qrio da Sony [6] (a), NAO da Aldebaran Robotics [7] (b).

## 2.2) Graus de Liberdade

O corpo humano possui uma quantidade muito grande de graus de liberdade, entretanto, para o objetivo deste trabalho, um robô capaz de caminhar e jogar futebol, não são necessários todos esses graus de liberdade. Por isso, realizou-se uma análise da quantidade de graus de liberdade necessária para um caminhar semelhante ao humano [8] e que também permitisse a realização dos movimentos periféricos de braços e pescoço utilizados durante os jogos. Nessa análise realizou-se observação e pesquisa acerca do corpo humano em movimento, posteriormente confrontou-se a quantidade de graus de liberdade concluída com a utilizada em robôs do mesmo porte.

A seguir, nas figuras 3 e 4, pode-se observar respectivamente, o padrão do caminhar bípede e trajetórias das juntas com suas forças verticais atuantes, resultados de simulação realizada no *Locomotion Laborator - University of Jena, Germany* [8].

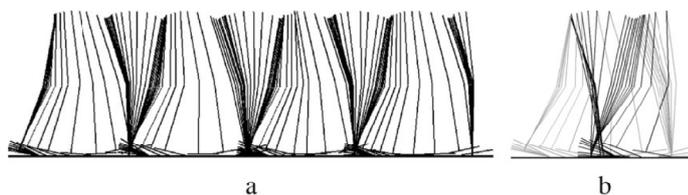


Figura 3 – Modelo de arames do comportamento na caminhada.

- (a) Comportamento de uma perna em quatro passos e (b) Comportamento de duas pernas em um único passo [8].

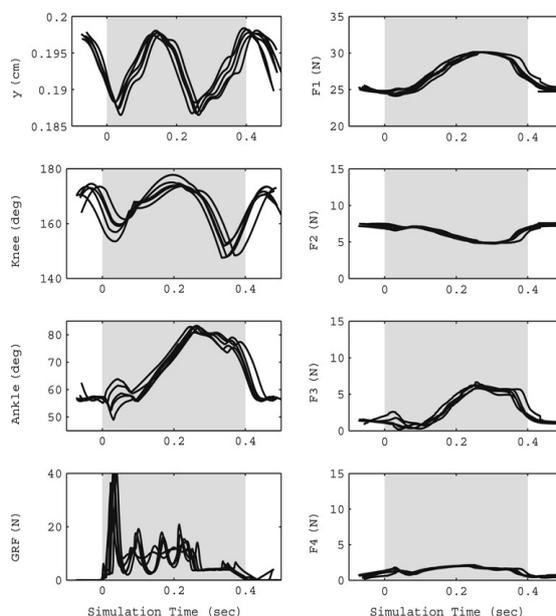


Figura 4 – Trajetória das juntas e forças verticais atuantes (respectivamente da esquerda para a direita) durante a simulação de caminhada. De cima para baixo: movimento vertical do corpo; trajetórias angulares do joelho e junta do tornozelo; forças de reação do solo [8].

Ao fim da análise, concluiu-se que o número de graus de liberdade necessários estaria entre 18 e 26 (quanto maior este valor, mais semelhante ao caminhar humano). Para cada perna a quantidade máxima utilizada é de 8 graus de liberdade, entretanto, 2 destes graus são movimentos redundantes (rotação em z do tornozelo e coxa; e rotação em x no tornozelo e planta do pé), que em um robô pequeno não exercem grande influência. Por isso reduziu-se em dois o número de graus de liberdade em cada uma das pernas, chegando a um total de 22 graus de liberdade no robô, mostrados esquematicamente na figura 5.

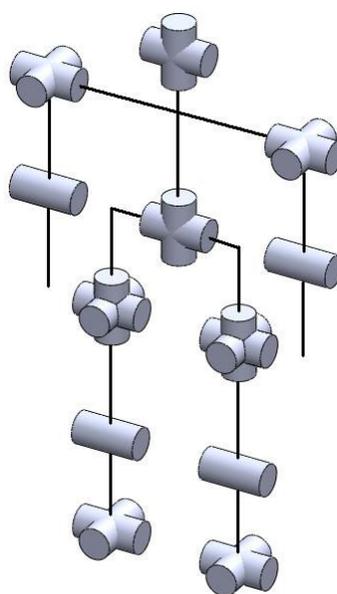


Figura 5 – Desenho Esquemático dos Graus de liberdade.

### 2.3) Dinâmica Humanóide

Existem diversas abordagens e métodos acerca do equilíbrio dinâmico em movimentação bípede, contudo a grande maioria é baseada nos conceitos do *Zero Moment Point* [9] e *Center of Pressure* [10]. A seguir descreve-se cada um desses conceitos.

#### 2.3.1) Zero Moment Point

Em robôs humanóides todas as juntas do mecanismo são motorizadas e podem ser diretamente controladas, com exceção do contato entre o chão e o pé do robô, que se pode considerar como um grau de liberdade adicional. Esse vínculo tem extrema importância na movimentação [Figura 6], pois nele localiza-se o vértice do ângulo

formado entre o solo e o pé, tal ângulo exerce influência sobre o tipo de estabilidade da caminhada (estabilidade estática ou dinâmica) [9].

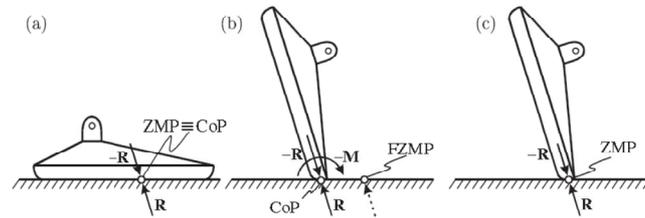


Figura 6 – Vínculo entre pé e solo / posição do ZMP [9].

(a) Pé totalmente apoiado, (b) pé inclinado e ZMP fora do vértice, (c) pé inclinado e ZMP no vértice.

Pelo fato de não ser motorizado, esse novo grau de liberdade não pode ser controlado diretamente como os outros, decorrente disso surgem as dificuldades no controle e estabilidade do robô. Dessa forma, o indicador geral do comportamento do mecanismo é o ponto onde, a influência de todas as forças atuantes sobre o sistema pode ser substituída por uma única força. Esse ponto é denominado *Zero Moment Point*, que doravante trataremos por ZMP, a teoria deste método foi proposta por Vukobratovic e Juricic [9] há aproximadamente quarenta e um anos. Por muito tempo foi utilizada como único procedimento na síntese da movimentação bípede e ainda hoje é largamente utilizada em conjunto com outras teorias, sendo indispensável no controle bípede, por estabelecer a avaliação das forças dinâmicas de reação do solo. Atualmente pode-se fazer uso do ZMP para qualquer tipo de junta passiva, ou seja, qualquer junta sem motorização, onde os movimentos são impelidos pela própria massa do corpo, como em um pêndulo, assim, além do vínculo entre o pé e o solo, tal método é aplicável também, ao estudo do balanço livre dos braços durante a caminhada.

### 2.3.2) Equacionamento do ZMP

O ZMP é definido como o ponto sobre o solo onde a resultante de todas as forças inerciais e da gravidade não possui componente ao longo do eixo horizontal. Em outras palavras, é o ponto onde  $M_x = 0$  e  $M_y = 0$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  representam o momento em torno dos eixos x e y, gerada respectivamente pela força de reação  $F_r$  e momento de reação  $T_r$ . Matematicamente o ZMP está definido como a seguinte função:

$$\mathbf{P}_{ZMP} = (x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0) \in S \quad (1)$$

Onde  $\mathbf{P}_{ZMP}$  é o ponto dado pelas coordenadas  $x$  e  $y$  e  $S$  é a região que delimita a superfície de suporte sob os pés. Enquanto o  $\mathbf{P}_{ZMP}$  encontra-se dentro da região  $S$  o contato entre o solo e o pé é estável.

De modo a simplificar a análise considera-se para a fase uni-apoiada (posição onde apenas um pé toca o solo) [Fig. 7(a)], que o pé encontra-se totalmente em contato com o solo e substitui-se os efeitos da estrutura acima do tornozelo pela força  $\mathbf{F}_A$  e momento  $\mathbf{M}_A$  [Fig. 7(b)].

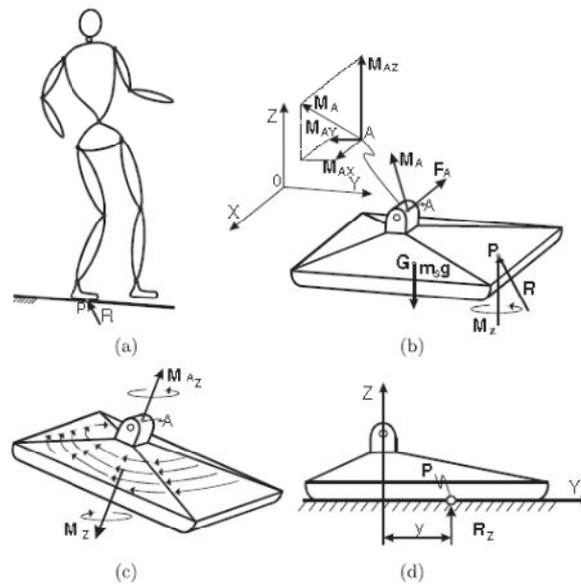


Figura 7 – Aproximação das forças agindo sobre mecanismo [9].

Admitindo que não exista escorregamento relativo, as forças de reação do solo consistem das três componentes da força  $\mathbf{R}$  ( $R_x, R_y, R_z$ ) e do momento  $\mathbf{M}$  ( $M_x, M_y, M_z$ ), onde as componentes ( $R_x, R_y$ ) representam as forças de fricção que contrabalançam as componentes horizontais de  $\mathbf{F}_A$ , enquanto que o momento  $M_z$  [Fig. 7(c)] é o momento de fricção que faz oposição a  $\mathbf{M}_A$ , evitando o escorregamento.

Enquanto o robô está parado, o ponto  $\mathbf{P}$  corresponde ao centro de gravidade do sistema, projetado sobre o polígono de suporte  $S$  por  $\mathbf{F}_A$  e  $\mathbf{M}_A$ , entretanto, sob os efeitos da dinâmica, o ponto  $\mathbf{P}$  onde agem  $\mathbf{R}$  e  $\mathbf{M}_z$  é deslocado de  $y$  [Fig. 7(d)]. Se o polígono de suporte  $S$  não for grande o suficiente para suportar o deslocamento  $y$ ,  $\mathbf{R}$  atuará na borda do pé ocasionando a rotação [9]. Aplicando as equações da estática para a fase uni-apoiada:

$$\mathbf{R} + \mathbf{F}_A + m_s \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{OP} \times \overrightarrow{R} + \overrightarrow{OG} \times m_s \mathbf{g} + \mathbf{M}_A + \mathbf{M}_z + \overrightarrow{OA} \times \mathbf{F}_A = \mathbf{0} \quad (3)$$

Onde  $O$  é a origem do sistema de vetores,  $A$  é a articulação do tornozelo,  $m_s$  a massa do robô e  $\mathbf{g}$  a aceleração da gravidade. Deslocando a origem do sistema para o ponto  $P$ , obtém-se a partir da equação (3):

No plano vertical

$$\mathbf{M}_z = -(\mathbf{M}_A^V + (\overrightarrow{OA} \times \mathbf{F}_A)^V) = \mathbf{0} \quad (4)$$

No plano horizontal

$$\overrightarrow{OG} \times m_s \mathbf{g} + \mathbf{M}_A^H + (\overrightarrow{OA} \times \mathbf{F}_A)^H = \mathbf{0} \quad (5)$$

### 2.3.3) Center of Pressure

Considerando-se o robô apoiado apenas em uma das pernas, existe uma carga distribuída (de reação do solo) agindo sob o pé, essa carga pode ser substituída por uma única força resultante em um ponto onde a somatória dos momentos é nula [11]. Este ponto denomina-se *Center of Pressure*, abreviadamente tratado por CoP. Esse conceito é bastante parecido com o de ZMP, entretanto, este último está relacionado às forças transmitidas sem contato (gravidade, inércia), enquanto que o conceito de CoP está atrelado às forças transmitidas por contato e por isso, ao contrário do ZMP, não pode existir fora da área do polígono de suporte  $S$ .

Assim defini-se

$$\mathbf{P}_{CoP} = \{(x_{CoP}, y_{CoP}, 0) \in S\} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{CoP}^x = 0; \quad \mathbf{M}_{CoP}^y = 0 \quad (7)$$

## 2.4) Materiais

### 2.4.1) Servo Motor

Certamente os componentes de maior importância no projeto são os servomotores, eles influenciam diretamente na agilidade e precisão dos movimentos, além disso, atuam também como partes estruturais do robô, responsáveis pela sustentação dos demais componentes.

Em um trabalho anterior de iniciação científica, realizado sob orientação do professor Flavio Tonidandel, “*Projeto Mecânico de um Robô Humanóide – Futebol de Robôs Humanoid League*”, de 2010, pesquisaram-se diversos tipos e marcas de servo-

motores até encontrar o modelo mais adequado às necessidades do projeto, por fim, o motor escolhido foi o modelo RX-28, exibido na figura 8, fabricado pela *Dynamixel* [12], uma empresa especializada em atuadores para o segmento de robótica.



Figura 8 – Servo-motor Dynamixel RX-28 [12].

Tabela 1 – Especificações do Dynamixel RX-28.

|                                 | Dynamixel RX-28                             |       |
|---------------------------------|---|-------|
| <b>Peso</b>                     | 72g   |       |
| <b>Dimensões</b>                | 35.6 x 50.6 x 35.5 mm                       |       |
| <b>Relação de transmissão</b>   | 1:193                                       |       |
| <b>Tensão aplicada</b>          | 12V   | 16V   |
| <b>Maximo torque (kgf · cm)</b> | 28.3  | 37.7  |
| <b>Velocidade (s/60 graus)</b>  | 0.167                                       | 0.126 |
| <b>Resolução</b>                | 0.29°                                       |       |
| <b>Liberdade de rotação</b>     | 300°  |       |
| <b>Material</b>                 | Engrenagens metálicas / Carcaça em plástico |       |
| <b>Motor</b>                    | Maxon RE-MAX                                |       |

#### 2.4.2) Estrutura

A estrutura responsável por unir e dar suporte aos motores é composta por peças usinadas em alumínio. Nota-se na figura 9, que tanto as peças usinadas, quanto os servo-motores, desempenham papel estrutural no robô.

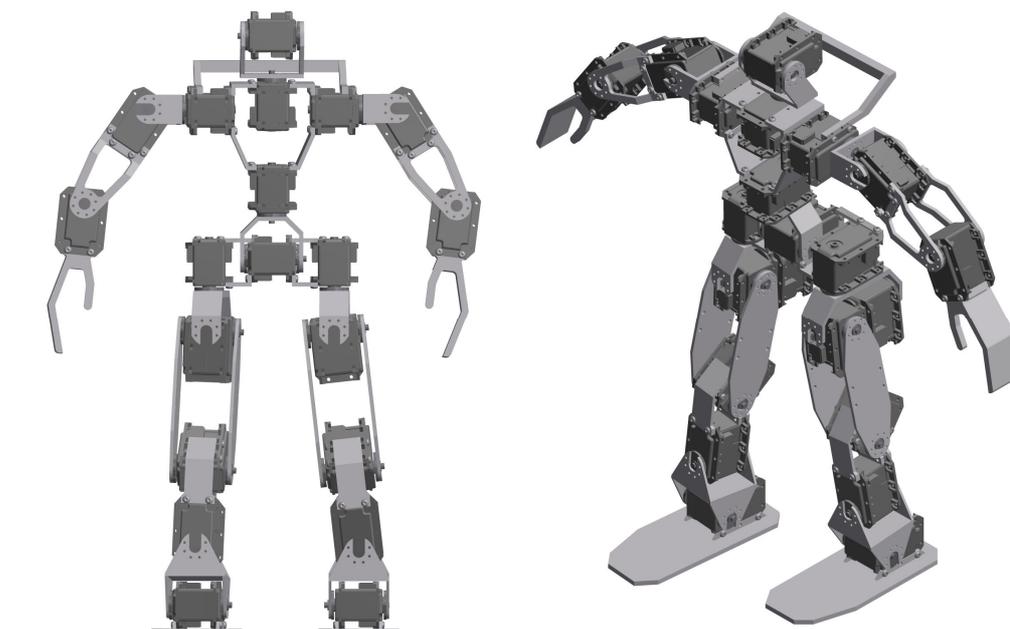


Figura 9 – Estrutura mecânica do robô.

### 3) Desenvolvimento

#### 3.1) Usinagem de Peças

Recebido o material iniciou-se usinagem das peças, realizada por completo nos laboratórios mecânicos da FEI. Tratando-se ainda da fase de prototipagem, com o objetivo de simplificar a usinagem algumas peças sofreram ligeira alteração na espessura, aumentou-se em 1 mm as dimensões externas (o que não interfere no funcionamento) tornando as peças mais robustas e fáceis de fixar no maquinário disponível na FEI.

Devido à variedade de peças, para que fosse possível realizar montagens parciais ao longo do período de usinagem, dividiu-se o total de peças em quatro subconjuntos, usinados na respectiva ordem, *Pernas*, *Quadril*, *Tronco* e *Braços*, figura 10. A relação de componentes de cada subconjunto é exibida adiante, na tabela 2.

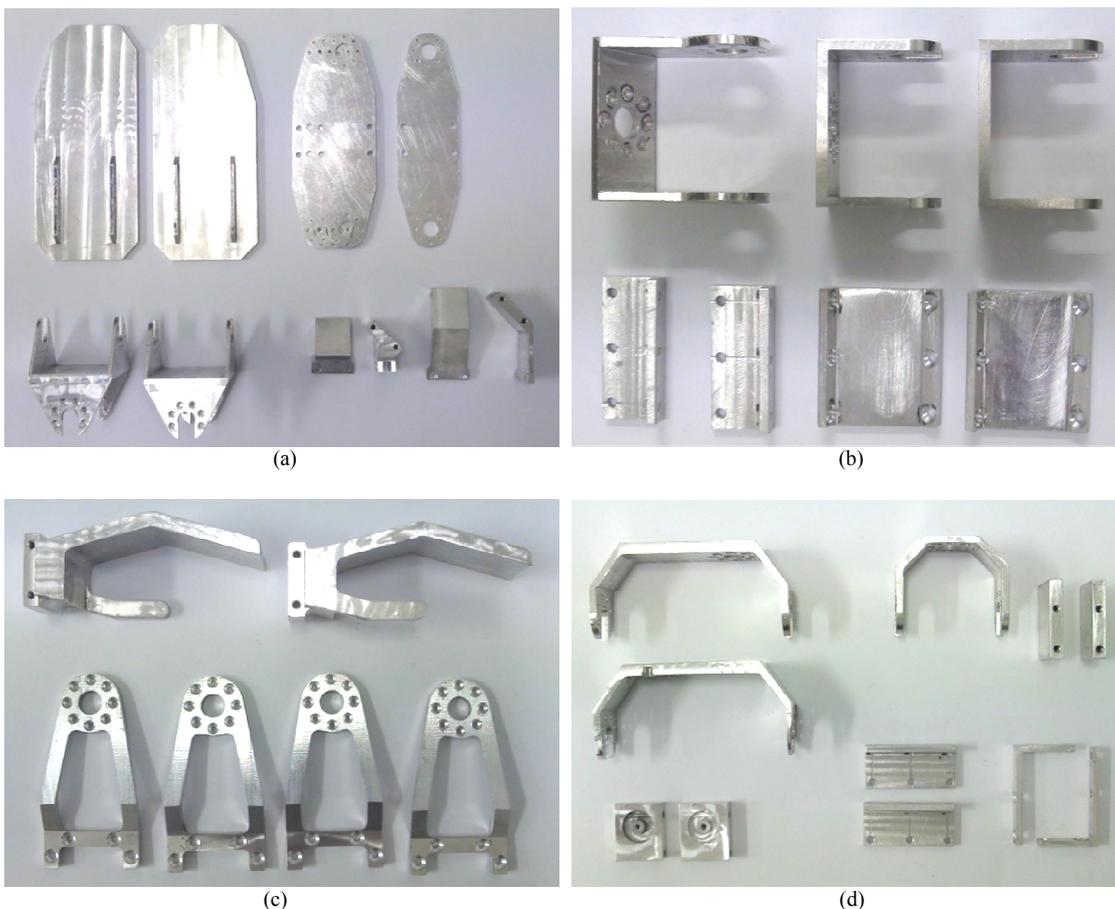


Figura 10 – a) Componentes da perna; b) Componentes do Tronco; c) Componentes do braço; d) Componentes do Quadril.

Tabela 2 – Relação de componentes de cada subconjunto

| Conjunto      | Componente | Qty. | Conjunto       | Componente    | Qty. |
|---------------|------------|------|----------------|---------------|------|
| <b>Pernas</b> | Ankle      | 2    | <b>Quadril</b> | Hips          | 2    |
|               | Knee front | 2    |                | Hips joint    | 2    |
|               | Knee back  | 2    |                | Link          | 2    |
|               | Left foot  | 1    |                | Pelvis        | 2    |
|               | Right foot | 1    |                | Waistline     | 1    |
|               | Thigh      | 4    |                | Groin         | 2    |
| <b>Tronco</b> | Neck       | 1    |                | <b>Braços</b> | Arm  |
|               | Trapezium  | 2    | Left hand      |               | 1    |
|               | Trunk      | 2    | Right hand     |               | 1    |
|               | Shoulder   | 2    |                |               |      |

### 3.2) Ajustes

No motor escolhido, os furos de fixação da carcaça possuem rosca M2,5, dimensão pouco comum e difícil de se encontrar apesar de obedecer ao padrão métrico. No projeto, dimensionaram-se as peças de forma que fosse possível fixá-las com

parafusos de comprimento igual a 8 mm, entretanto, não foi possível encontrar comercialmente parafusos M2,5 em tal comprimento, encontrando-se a pronta entrega apenas parafusos de 6 mm de comprimento, assim, para evitar perder mais tempo na busca de parafusos optou-se por rebaixar o alojamento dos parafusos em 2 mm, compensando a diferença de comprimentos.

### 3.3) Montagem

Antes de fixar as peças usinadas aos motores é necessário prepará-los montando os flanges (discos com abas perfuradas, responsáveis por transmitir o movimento do eixo do motor à peça que será articulada). No robô existem três diferentes configurações para o motor, que variam de acordo com o tipo de flange e lado do motor em que estão montados. Apenas para identificar cada uma das configurações, daqui em diante às trataremos pelas designações: *com flange simples*, *com flange livre* e *com flange para carga axial*.

Na configuração *com flange simples*, um flange é montado diretamente ao eixo do motor que transmite o torque por meio de ranhuras e sua fixação axial é realizada por um parafuso conforme exibido na figura 11.

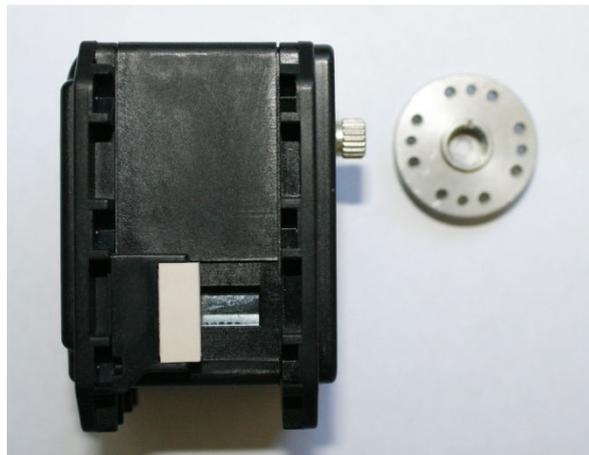


Figura 11 – Configuração com flange simples.

A segunda configuração, *com flange livre*, é utilizada para articulações que necessitam de apoio em ambos os lados do motor. Em um dos lados é fixado um *flange simples* e no lado oposto um *flange livre*, que consiste de três peças, um rolamento, um flange e uma bucha, figura 12, não conectados ao eixo e, portanto, sem motorização.

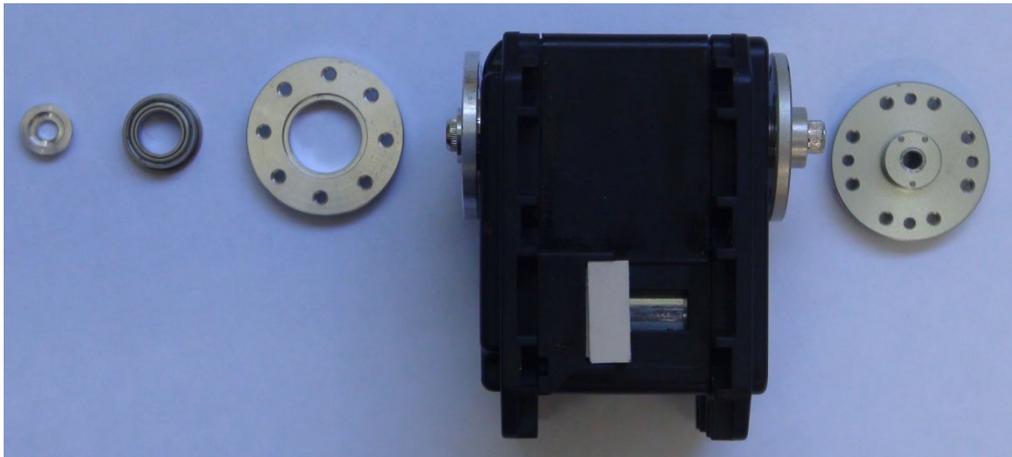


Figura 12 – Configuração com flange livre e seus componentes.

Bastante similar ao primeiro caso, na configuração *com flange para carga axial* apenas um flange é montado, no lado do eixo, entretanto, neste caso há um disco revestido com material de baixo coeficiente de atrito, montado entre o motor e o flange, impedido que o esforço axial compressivo seja transmitido ao eixo, como pode ser observado na figura 13.

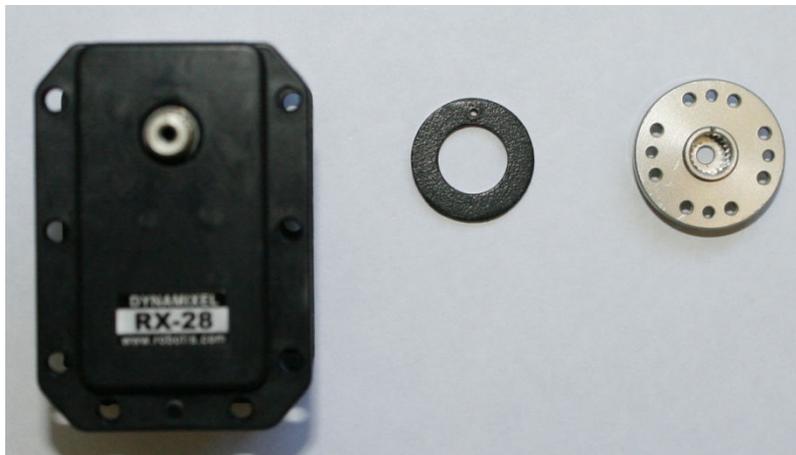


Figura 13 – Configuração com flange para carga axial.

Preparados os motores com seus respectivos flanges, iniciou-se a montagem de cada um dos subconjuntos. Vale ressaltar que para determinados conjuntos é necessário obedecer a uma ordem de montagem prevista ainda na fase de projeto, do contrário o local de fixação de algumas peças ficaria inacessível, ou ainda, seu posicionamento não seria possível.

Montaram-se cada um dos conjuntos de acordo com a ordem proposta anteriormente, conforme a usinagem de cada subconjunto era concluída.

O primeiro subconjunto montado foi o das pernas, figura 14, onde utilizaram-se seis motores com *flanges livres*, apoiados em ambos os lados (3 em cada perna).



Figura 14 – Pernas.

Posteriormente, montou-se o subconjunto do quadril, exibido na figura 15, composto por cinco motores, sendo um com *flange livre*, dois com *flange simples* e outros dois com *flange para carga axial*.

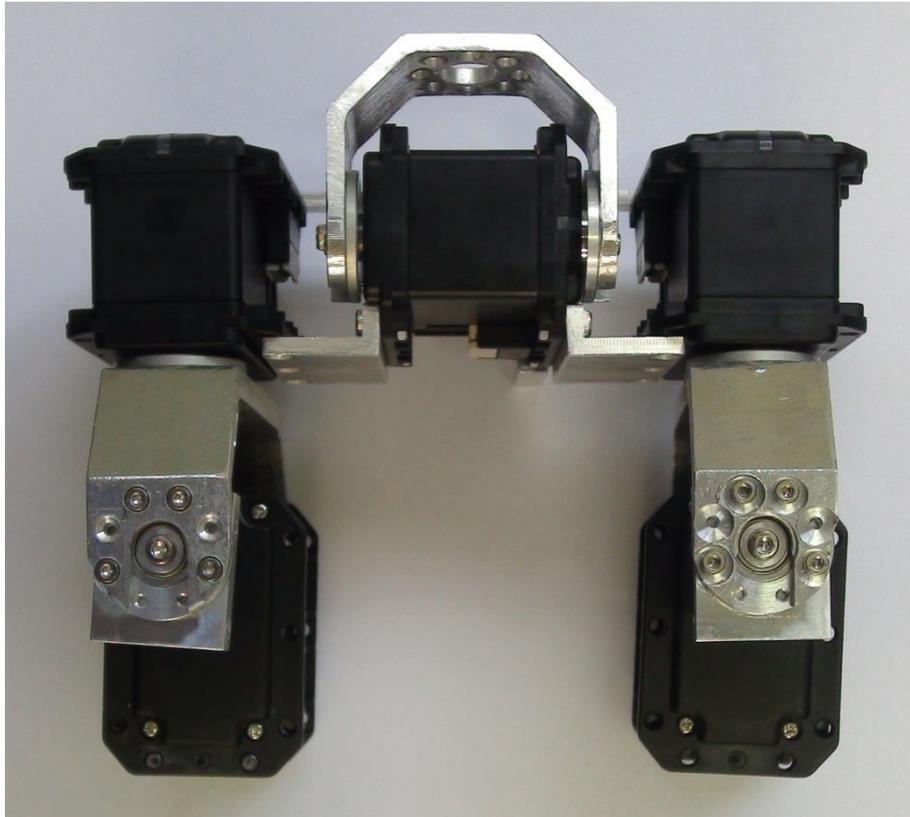


Figura 15 – Quadril.

Em seqüência, conforme apresentado na figura 16, montou-se o tronco, composto por mais quatro motores, três montados na configuração com *flange simples* e um montado com *flange para carga axial*.

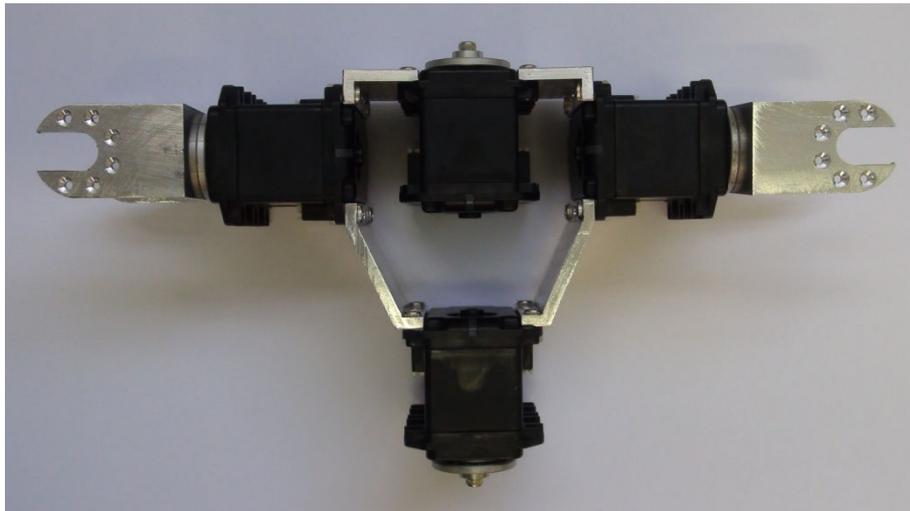


Figura 16 – Tronco.

Por fim, montou-se o último subconjunto, que compõe os braços do robô, constituído de dois motores com *flange livre* e as respectivas peças de alumínio, figura 17.

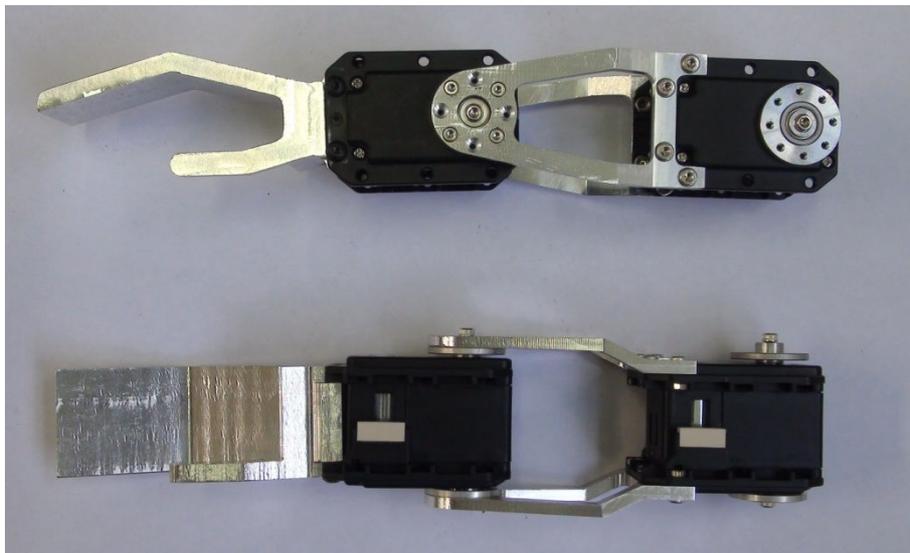


Figura 17 – Tronco.

Finalmente, com todos os subconjuntos montou-se o conjunto mecânico completo do robô, que pode ser observado nas figuras 18 e 19.

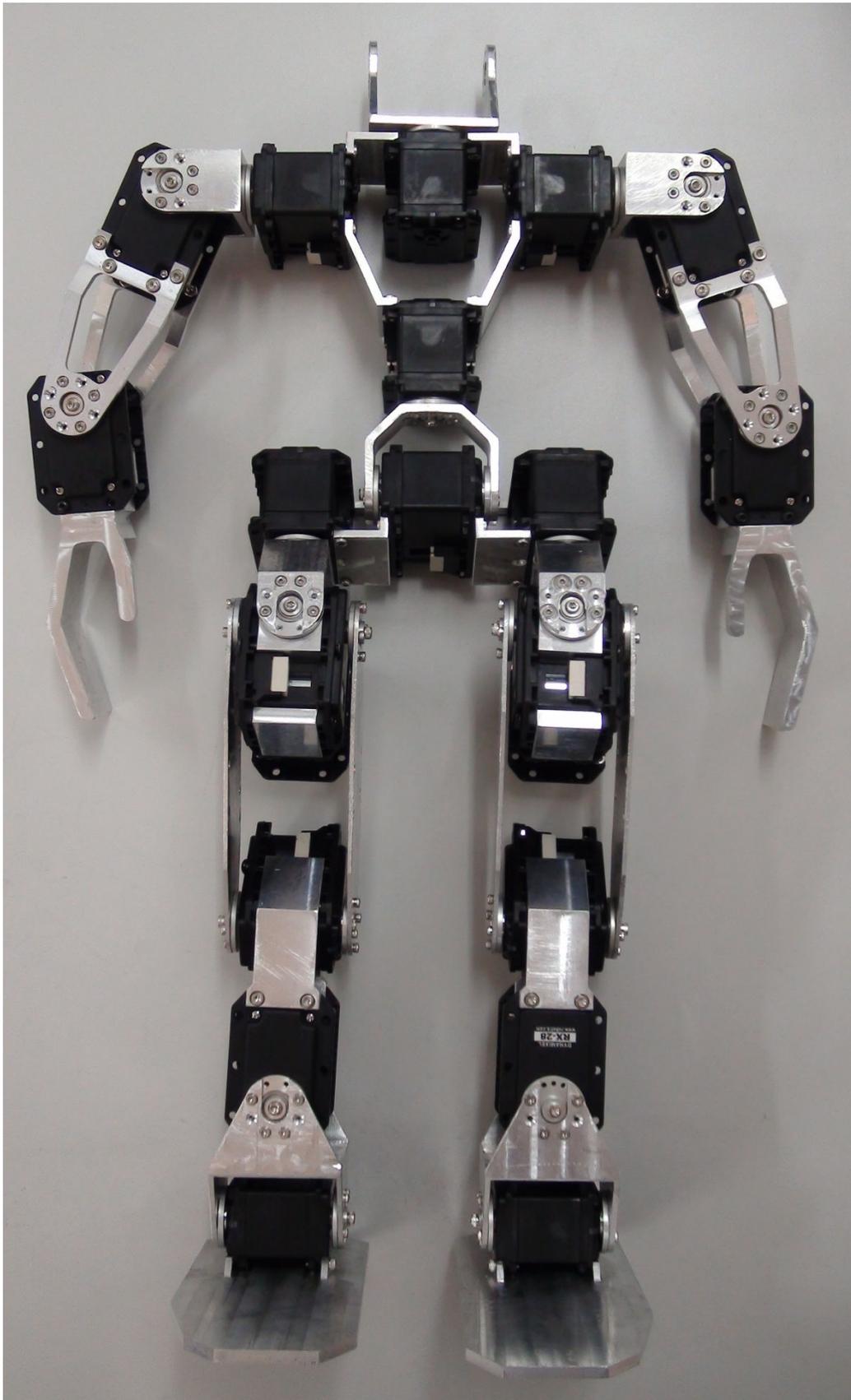


Figura 18 – Montagem completa da mecânica do robô.

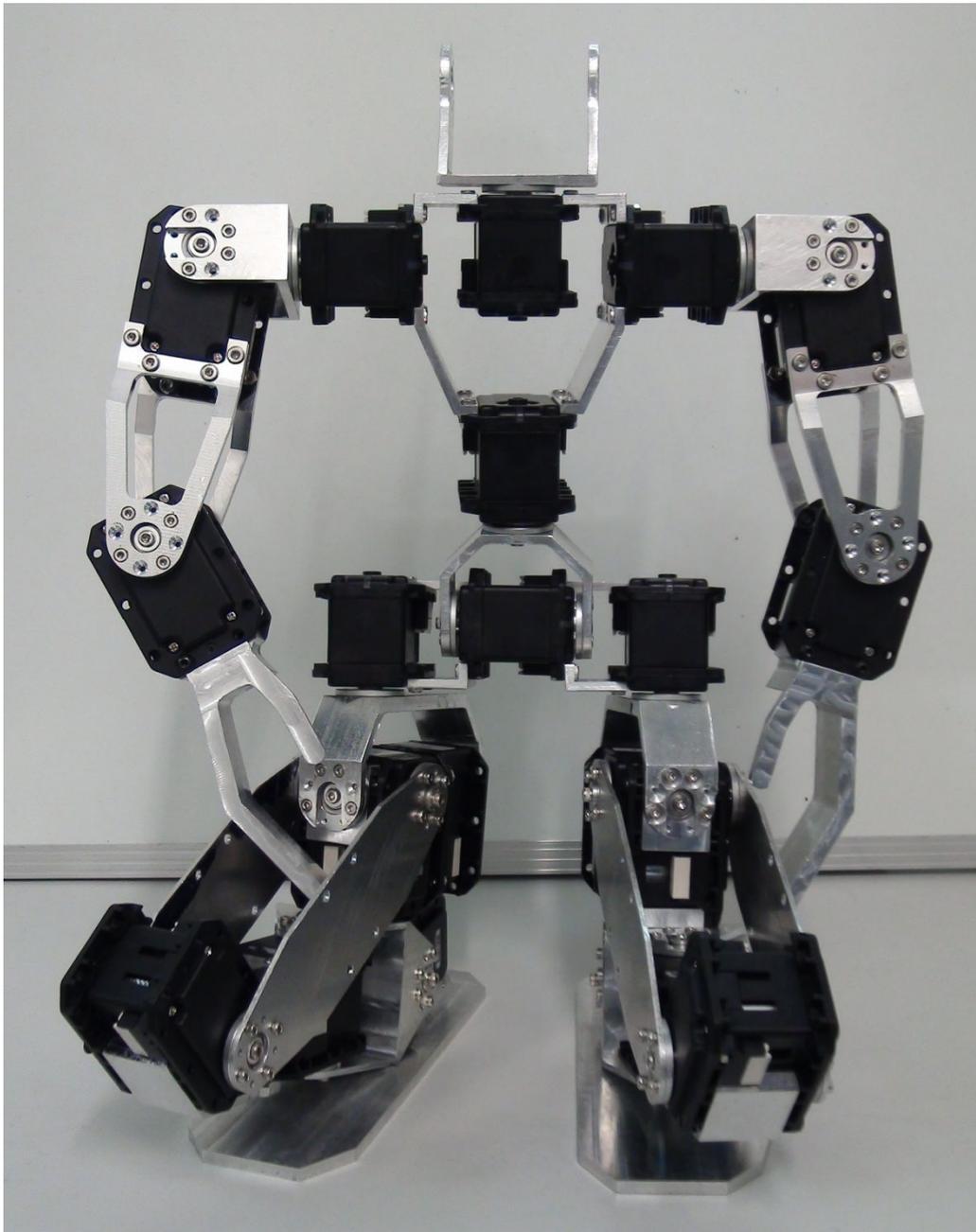


Figura 19 – Robô apoiado nos calcanhares.

#### 4) Eletrônica

Com o auxílio do aluno de engenharia elétrica Eduardo Mello, selecionaram-se as baterias e eletrônica necessária para o controle dos motores.

As baterias selecionadas são de polímero de lítio, sendo necessários dois conjuntos de baterias de 14.8 volts e 850 mAh, para prover energia ao o robô por aproximadamente 15 min (a duração dos tempos de jogo não é superior a 10 min), cada uma das baterias possui massa de 99g e dimensões 56x31x33 mm. Selecionaram-se tais dimensões, para que fosse possível aloca-las na região lateral do torso do robô, logo abaixo dos braços, conforme pode-se observar na Figura 20.

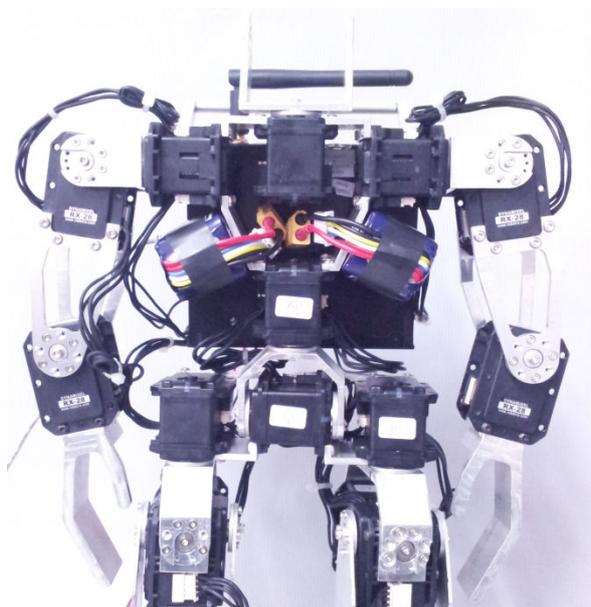


Figura 20 – Alocação das baterias no robô.

Para o controle dos motores e o futuro processamento de imagens, caso sejam incorporadas câmeras ao robô, selecionou-se o computador fit-PC2 (Figura 21), cujas especificações constam na tabela 3. Durante essa seleção, analisou-se também, as dimensões do computador, que deveriam ser compatíveis com a lacuna reservada na região posterior do torso do robô, assim, alocou-se o computador nessa região, conforme exibido na Figura 22.

Tabela 3 – Especificações do computador

| Especificações – fit-PC2 |   |
|--------------------------|---|
| <b>Processador</b>       | 1.6GHz Intel Atom Z530                                    |
| <b>Memória</b>           | 2GB de DDR2 RAM   |
| <b>Armazenamento</b>     | 160Gb B hard disk drive, ou SSDs de 8GB a 16GB            |
| <b>Comunicação</b>       | WLAN - 802.11b/g/n; 2 x gigabit Ethernet                  |
| <b>Portas</b>            | 1 x DVI; 1 x RS232; 4 x USB 2.0 on PC2i; mic in, line in, |
| <b>Sist. Operacional</b> | Windows 7; Windows Xp; Linux                              |
| <b>Massa</b>             | 330g  |
| <b>Dimensões</b>         | 11.5 x 10.1 x 2.7cm                                       |



Figura 21 – Computador fit-PC2.

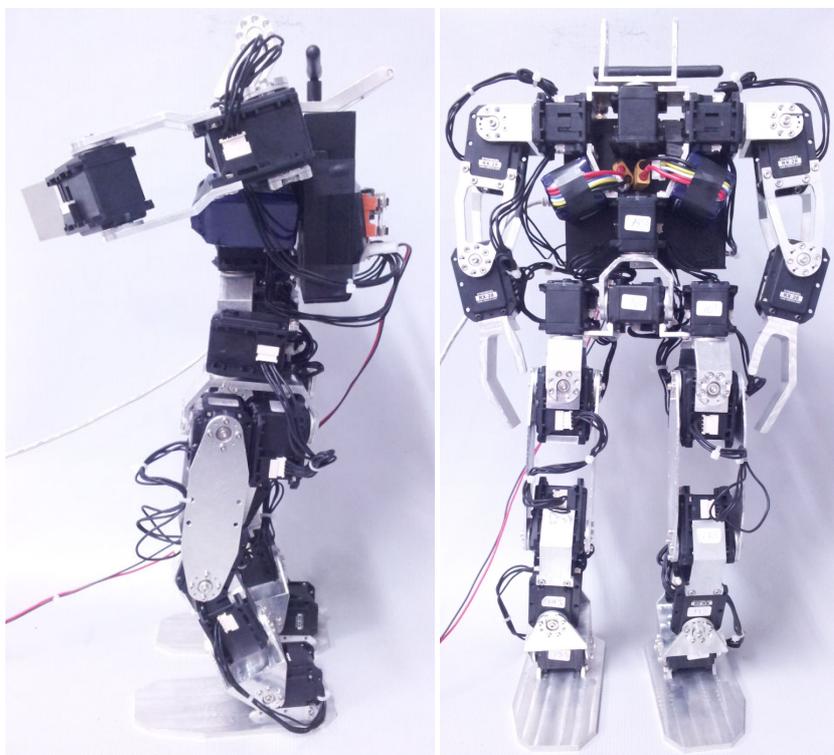


Figura 22 – Computador montado às costas do robô.

## 5) Testes

Baterias e computador possuem uma massa significativa quando comparados ao restante do robô, a montagem desses itens desloca sensivelmente o centro de gravidade do sistema, assim, sua montagem era imprescindível para que se realizassem os testes.

Conduziram-se os testes com o objetivo, mensurar os valores máximos de inclinação e distensão dos membros do robô, possíveis de se obter mantendo-se o equilíbrio estático do sistema. Conhecendo-se tais valores máximos, é possível delinear as posições dos membros do robô ao longo de sua movimentação.

### 5.1) Notação

Antes do início dos testes, definiu-se uma notação para que fosse possível identificar cada uma das juntas. Adotou-se o seguinte critério, designou-se para cada junta, um número composto de dois algarismos, onde o primeiro define a que parte do corpo pertence e o segundo, em ordem crescente, define o quão próximo a junta está da cabeça, diferenciando-se ainda, por meio desse segundo algarismo, números pares para membros do lado direito e números ímpares para membros do lado esquerdo. A notação pode ser melhor compreendida na figura 23.

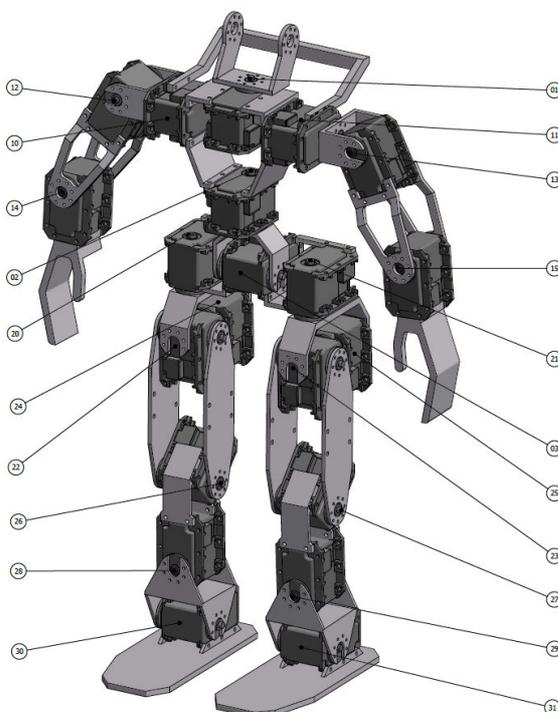


Figura 23 – Numeração das juntas.

## 5.2) Metodologia de Teste

Para os testes procedeu-se da seguinte forma, posicionava-se o robô em uma determinada postura, inicialmente ereta, travavam-se os motores nessa posição e posteriormente, variavam-se os ângulos das juntas, buscando-se a máxima distensão possível, até o momento de iminência de tombamento, nesse momento realizava-se a medição das inclinações e ângulos das juntas, utilizando-se de um goniômetro (instrumento para medir ângulos) e também, da própria odometria dos motores.

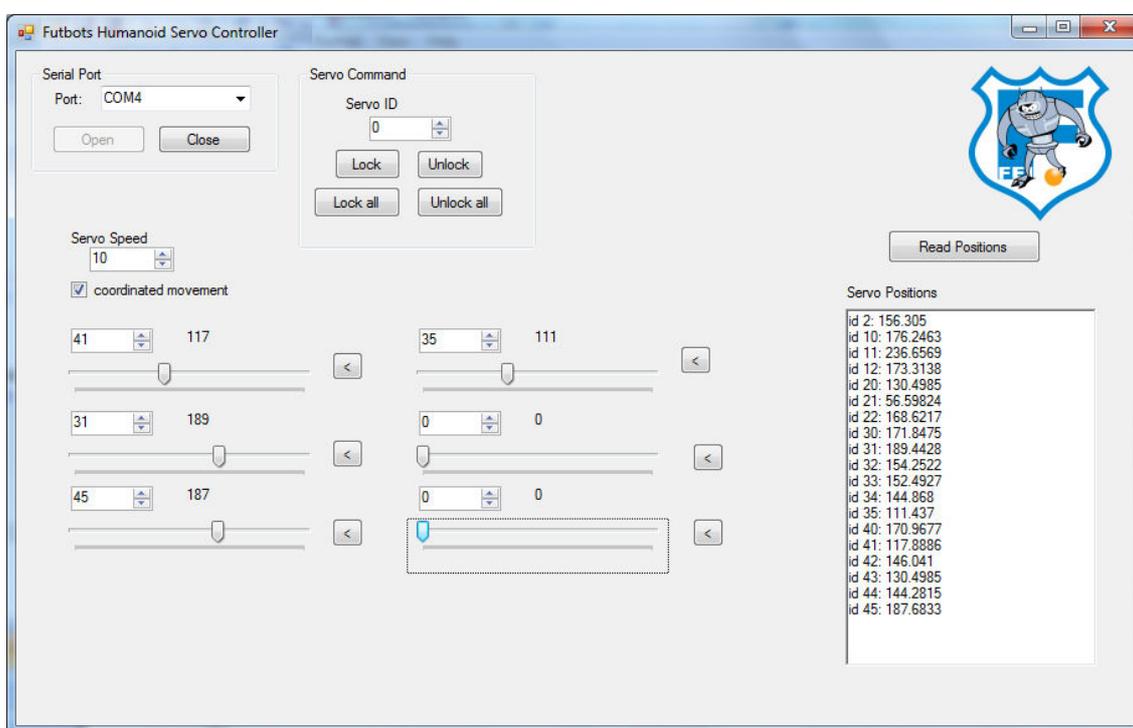


Figura 24 – Software de posicionamento dos motores.

Para o controle de posicionamento dos motores durante os testes utilizou-se o software exibido na figura 24, desenvolvido pelo integrante da equipe RoboFEI, Angelo Gurzoni.

Vale ressaltar, que os testes possuem duração superior ao tempo provido pelas baterias, dessa forma, manteve-se as baterias fixas ao robô, apenas por sua influência na posição do centro de massa e utilizou-se energia de uma fonte de alimentação.

### 5.3) Referências de Medição

No robô, existem motores posicionados em diversas orientações, assim, de forma a criar uma referência única para os testes, posicionou-se o robô de forma ereta, com braços e pernas paralelos ao corpo, então, estabeleceu-se essa posição como inicial para todos os motores.

Mediam-se os ângulos obtidos, paralelamente aos planos, frontal ou sagital (descritos na figura 25), tomando-se sempre como origem, o plano horizontal.

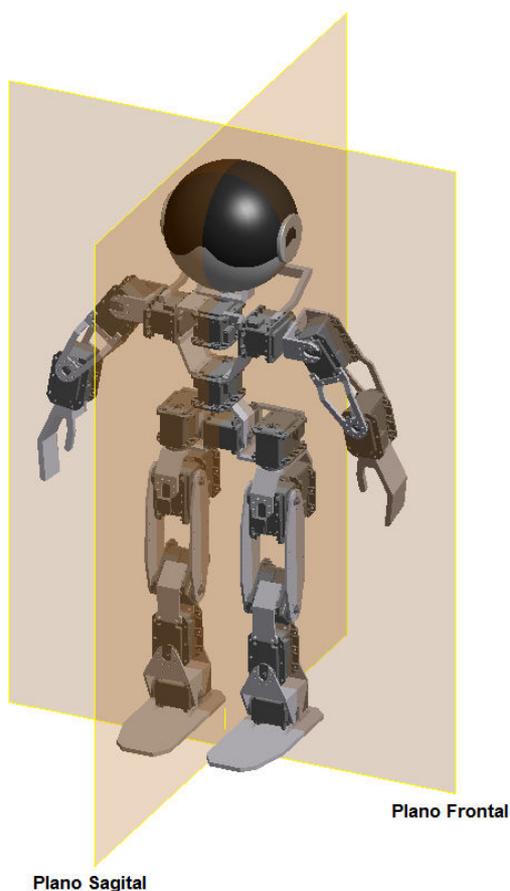


Figura 25 – Planos de referência.

#### 5.4) Teste de Inclinação no Plano Frontal

Neste teste, buscou-se avaliar o máximo deslocamento lateral do centro de massa, mantendo-se ambos os pés apoiados e o tronco na vertical. Variaram-se os ângulos das juntas 24, 25, 28 e 29, até o momento em que o pé direito do robô esboçou a iminência de descolamento do solo, obtendo-se a seqüência exibida na figura 26.

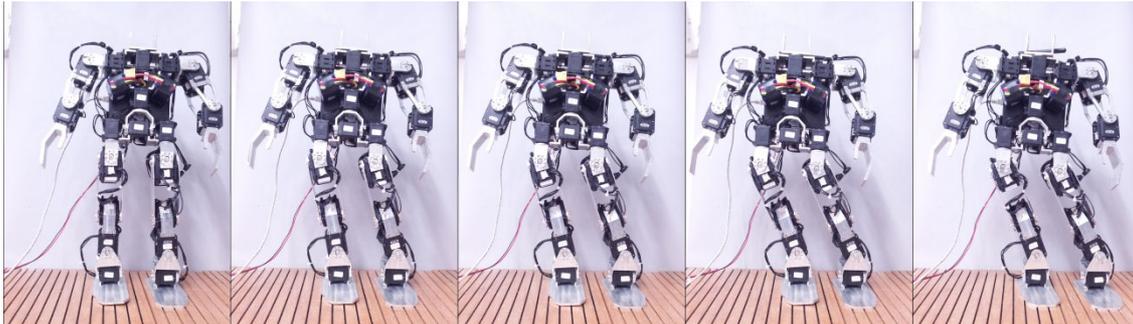


Figura 26 – Deslocamento lateral do centro de massa.

#### 5.5) Teste de Inclinação no Plano Sagital

Nos testes ilustrados pelas seqüências de fotos das figuras 27 e 28, avaliou-se a máxima inclinação do tronco, respectivamente, para trás e para frente. Em um último teste, exibido na figura 29, constatou-se o máximo deslocamento frontal do centro de massa, mantendo-se o tronco na vertical, para isso, utilizaram-se as juntas 22, 23, 30 e 31.

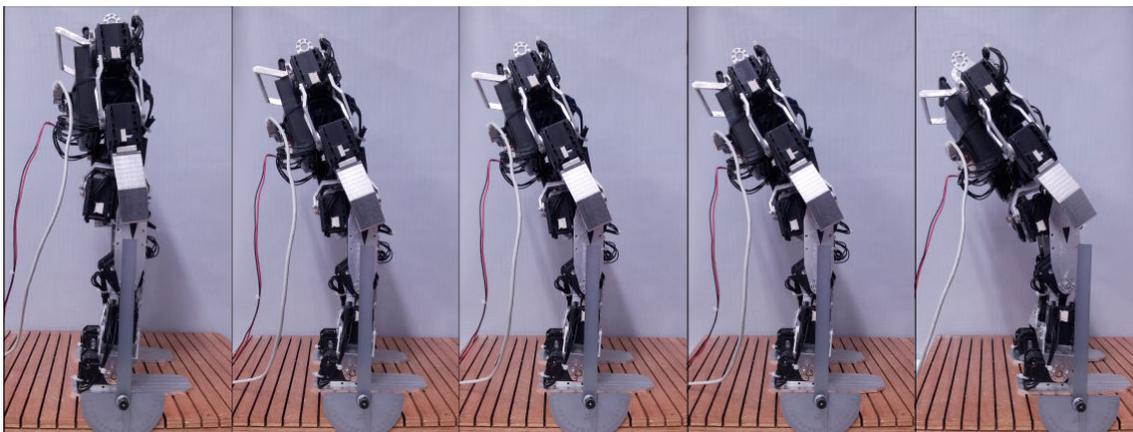


Figura 27 – Inclinação do tronco para trás.

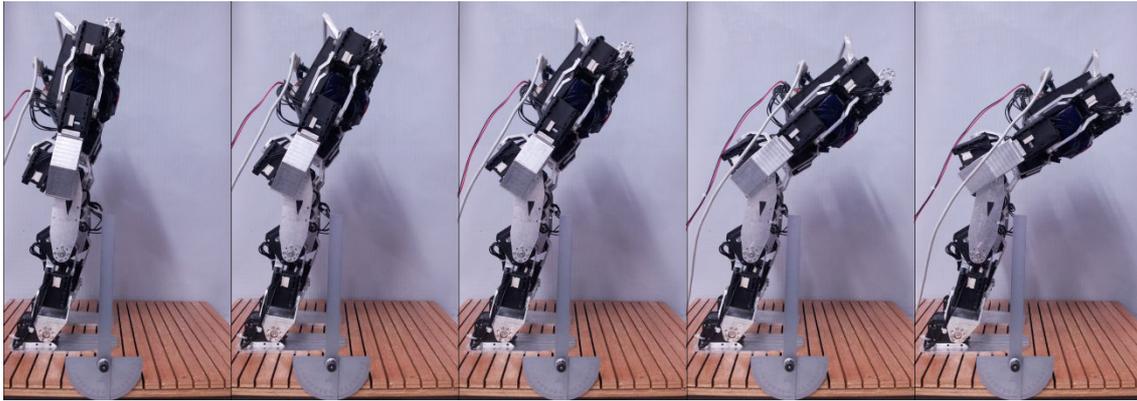


Figura 28 – Inclinação do tronco para frente.

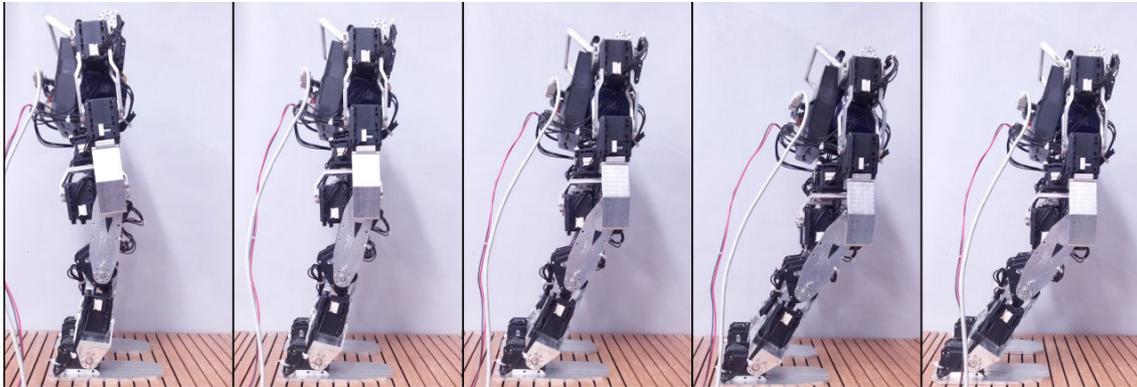


Figura 29 – Deslocamento frontal do centro de massa mantendo-se o troco vertical.

## 6) Resultados

### 6.2) Teste de Inclinação no Plano Frontal

Na seqüência, nas tabelas de 4 a 7, são exibidos de acordo com a notação adotada, os resultados dos ângulos, verificados para cada uma das juntas do robô ao longo dos testes.

Tabela 4 – Valores obtidos no teste de deslocamento lateral do centro de massa

| Pernas |        |       |        | Tronco |        | Braços |        |       |        |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo |
| 20     | 0°     | 21    | 0°     | 00     | -      | 10     | 0°     | 11    | 0°     |
| 22     | 0°     | 23    | 0°     | 01     | 0°     | 12     | 0°     | 13    | 0°     |
| 24     | 7°     | 25    | 7°     | 02     | 0°     | 14     | 0°     | 15    | 0°     |
| 26     | 0°     | 27    | 0°     | 03     | 0°     |        |        |       |        |
| 28     | 6°     | 29    | 7°     |        |        |        |        |       |        |
| 30     | 0°     | 31    | 0°     |        |        |        |        |       |        |

Tabela 5 – Valores obtidos no teste de inclinação do tronco para trás.

| Pernas |        |       |        | Tronco |        | Braços |        |       |        |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo |
| 20     | 0°     | 21    | 0°     | 00     | -      | 10     | 0°     | 11    | 0°     |
| 22     | 12°    | 23    | 12°    | 01     | 0°     | 12     | 0°     | 13    | 0°     |
| 24     | 0°     | 25    | 0°     | 02     | 0°     | 14     | 0°     | 15    | 0°     |
| 26     | 0°     | 27    | 0°     | 03     | 0°     |        |        |       |        |
| 28     | 0°     | 29    | 0°     |        |        |        |        |       |        |
| 30     | 1°     | 31    | 0°     |        |        |        |        |       |        |

Tabela 6 – Valores obtidos no teste de inclinação do tronco para frente.

| Pernas |        |       |        | Tronco |        | Braços |        |       |        |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo |
| 20     | 0°     | 21    | 0°     | 00     | -      | 10     | 0°     | 11    | 0°     |
| 22     | 21°    | 23    | 22°    | 01     | 0°     | 12     | 0°     | 13    | 0°     |
| 24     | 0°     | 25    | 0°     | 02     | 0°     | 14     | 0°     | 15    | 0°     |
| 26     | 0°     | 27    | 0°     | 03     | 0°     |        |        |       |        |
| 28     | 0°     | 29    | 0°     |        |        |        |        |       |        |
| 30     | 8°     | 31    | 6°     |        |        |        |        |       |        |

Tabela 7 – Valores obtidos no teste de deslocamento frontal do centro de massa.

| Pernas |        | Tronco |        | Braços |        |       |        |       |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| Junta  | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta  | Ângulo | Junta | Ângulo | Junta | Ângulo |
| 20     | 0°     | 21     | 0°     | 00     | -      | 10    | 0°     | 11    | 0°     |
| 22     | 27°    | 23     | 28°    | 01     | 0°     | 12    | 0°     | 13    | 0°     |
| 24     | 0°     | 25     | 0°     | 02     | 0°     | 14    | 0°     | 15    | 0°     |
| 26     | 0°     | 27     | 0°     | 03     | 0°     |       |        |       |        |
| 28     | 0°     | 29     | 0°     |        |        |       |        |       |        |
| 30     | 27°    | 31     | 27°    |        |        |       |        |       |        |

## 7) Conclusão

Em continuidade ao projeto realizado em 2010, “*Projeto Mecânico de um Robô Humanóide – Futebol de Robôs Humanoid League*” [13], teve-se por objetivo neste trabalho de iniciação científica, a fabricação do protótipo do robô projetado.

Adquiriram-se os componentes, usinaram-se as peças, realizando os ajustes necessários e finalmente realizou-se a montagem. Obtendo-se assim, conforme proposto, o protótipo de um robô humanóide, com graus de liberdade suficientes para atender às aplicações desejadas, respeitando as restrições da *Humanoid League* e dessa forma, permitindo que a equipe RoboFEI, participe em breve das competições da liga.

Conduziram-se alguns testes para verificar a estabilidade estática do protótipo, no entanto, para uma melhor compreensão e verificação dos limites do robô, é recomendável realizar testes de natureza dinâmica. Tais testes possuem complexidade maior do que o esperado e não foram possíveis de se realizar dentro do tempo de projeto. Dessa forma, recomenda-se para próximos trabalhos a utilização dos resultados encontrados, como ponto de partida para análises dinâmicas que permitam a modelagem matemática do robô e a implementação de um sistema de controle.

## 8) Agradecimentos

Agradeço aos professores Reinaldo Bianchi e Flavio Tonidantel, não só pela orientação ao longo dos trabalhos de IC, mas também, pela oportunidade de participar das atividades do laboratório de robótica e por todo incentivo que recebi nas escolhas, referentes à minha vida acadêmica.

Um agradecimento especial ao meu grande amigo Angelo Gurzoni, quem fez o software utilizado para a coordenação dos motores, sem o qual não seria possível a realização dos testes.

## 9) Referências Bibliográficas

- [1] – RoboCup. Disponível em:  
<http://www.robocup.org>. Acesso em 5 de novembro de 2010
- [2] – RoboCup – *Humanoid League* . Disponível em:  
<http://www.tzi.de/humanoid/bin/view/Website/WebHome>.  
Acesso em 5 de novembro de 2010.
- [5] – ASIMO – Honda Motors. Disponível em:  
<http://www.asimo.com.br/>. Acesso em 2 de fevereiro de 2010.
- [6] – QRIO – Sony. Disponível em:  
[http://news.sel.sony.com/en/press\\_room/corporate\\_news/release/9212.html](http://news.sel.sony.com/en/press_room/corporate_news/release/9212.html).  
Acesso em 2 de fevereiro de 2010
- [7] – NAO – Aldebaran Robotics. Disponível em:  
<http://www.aldebaran-robotics.com/>  
Acesso em 2 de fevereiro de 2010.
- [8] – Iida, Fumiya; Minekawa, Yohei; Rummel, Jürgen; Seyfarth, André; **“Robotics and Autonomous Systems 57 - Toward a human-like biped robot with compliant legs”** ; (2009) 139-144; Disponível no ScienceDirect.
- [9] – VUKOBRATOVIĆ ,MIOMIR; BOROVIĆ, BRANISLAV; **“Zero-Moment Point — Thirty Five Years Of Its Life”**; International Journal of Humanoid Robotics;Vol. 1, No. 1 (2004) 157–173.
- [10] – SARDAIN, PHILIPPE; BESSONNET, GUY; **“Forces Acting on a Biped Robot. Center of Pressure - Zero Moment Point”**; IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, VOL. 34, No. 5, September 2004.
- [11] – NICHOLLS, ELLIOT; **“Bipedal Dynamic Walking in Robotics”**; Honours Thesis - The University of Western Australia; Department of Electrical and Electronic Engineering; October 26, 1998.
- [12] – Dynamixel RX-28 User’s Manual; ROBOTIS CO.,LTD.  
Disponível em: [www.robotis.com](http://www.robotis.com); Acesso em 5 de novembro de 2010.
- [13] – Cortez, Milton ;**“Projeto Mecânico de um Robô Humanóide – Futebol de Robôs Humanoid League”**; trabalho de iniciação científica Centro Universitário da FEI 2010.