

---

# Projeto Mecânico de um Robô Humanóide Futebol de Robôs – Humanoid League

## Relatório Final

Orientador: Flavio Tonidandel  
Departamento: Ciência da Computação  
Candidato: Milton Peres Cortez Junior  
Nº FEI: 11.107.777-2

---

## ÍNDICE

|                                       |        |
|---------------------------------------|--------|
| RESUMO .....                          | - 1 -  |
| CAPÍTULO 1 .....                      | - 2 -  |
| 1) Introdução.....                    | - 2 -  |
| 1.1) Objetivo.....                    | - 2 -  |
| 1.2) Justificativa.....               | - 2 -  |
| CAPÍTULO 2 .....                      | - 3 -  |
| 2) O Futebol de Robôs.....            | - 3 -  |
| 2.1) O Futebol de Robôs na FEI .....  | - 4 -  |
| 2.2) Equipe RoboFEI .....             | - 4 -  |
| 2.3) Humanoid League .....            | - 5 -  |
| 2.3.1) Dimensões dos Robôs .....      | - 5 -  |
| 2.3.2) Sensores .....                 | - 6 -  |
| 2.3.3) O Campo.....                   | - 7 -  |
| 2.3.4) Os Gols .....                  | - 9 -  |
| CAPÍTULO 3 .....                      | - 11 - |
| 3) Revisão Bibliográfica .....        | - 11 - |
| 3.1) Robôs Humanóides .....           | - 11 - |
| 3.2) Características Relevantes ..... | - 12 - |
| 3.2.1)Atuadores.....                  | - 13 - |
| 3.2.2)Estrutura .....                 | - 15 - |
| 3.2.3)Outras Equipes .....            | - 15 - |
| 3.3)Dinâmica Humanóide.....           | - 17 - |
| 3.3.1)Zero Moment Point.....          | - 18 - |
| 3.3.2)Equacionamento do ZMP.....      | - 19 - |
| 3.3.3) Center of Pressure.....        | - 21 - |

---

|   |        |
|---|--------|
| CAPÍTULO 4 .....                              | - 23 - |
| 4) O Projeto .....                            | - 23 - |
| 4.1) Servo Motor .....                        | - 23 - |
| 4.1.2) Especificações do Motor .....          | - 25 - |
| 4.2) Estrutura.....                           | - 25 - |
| 4.2.1) Graus de Liberdade .....               | - 25 - |
| 4.2.2) Disposição dos motores .....           | - 28 - |
| 4.3) Dimensionamento prévio dos motores ..... | - 31 - |
| 4.4) Projeto da estrutura metálica .....      | - 32 - |
| 4.4.1 Dimensionamento dos pés.....            | - 33 - |
| 4.4.2) Projeto das articulações.....          | - 34 - |
| CAPÍTULO 5 .....                              | - 36 - |
| 5)Modelagem 3D.....                           | - 36 - |
| CAPÍTULO 6 .....                              | - 42 - |
| 6)Propriedades de massa .....                 | - 42 - |
| CAPÍTULO 7 .....                              | - 44 - |
| 7)Simulações .....                            | - 44 - |
| 7.1)Centro de gravidade.....                  | - 44 - |
| 7.2)Elementos finitos .....                   | - 45 - |
| CAPÍTULO 8 .....                              | - 50 - |
| 8) Conclusão .....                            | - 50 - |
| CAPÍTULO 9 .....                              | - 51 - |
| 9) Referências Bibliográficas .....           | - 51 - |

## RESUMO

O presente trabalho consiste na descrição do projeto mecânico de um robô humanóide, destinado a aplicações em pesquisa e a participação 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], por esse motivo, além da descrição das etapas do desenvolvimento do projeto, realiza-se também uma breve descrição das regras da categoria e das restrições impostas à construção do robô, assim como, a apresentação de características de outras equipes participantes.

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.

Consta também a explicação quanto ao objetivo do futebol de robôs, como ele teve seu início na FEI e como está estruturada atualmente a equipe de competições robóticas *RoboFEI* [5].

## CAPÍTULO 1

### 1) Introdução

Robôs antropomórficos constituem apenas uma pequena parcela dos vários tipos de robôs já existentes, mas certamente, quando se pensa em robôs eles são a primeira imagem que vem à nossas mentes. Há muitos anos cientistas e engenheiros de diversas áreas buscam o desenvolvimento de máquinas pensantes semelhantes a nós, mas ainda hoje o mais comum de encontrar são robôs dedicados a algum tipo específico de serviço. Isso porque robôs humanóide apresentam uma grande complexidade construtiva pelo seu grande número de articulações e principalmente por sua locomoção sobre duas pernas.

#### 1.1) Objetivo

Nesta iniciação científica, tem-se como objetivo o desenvolvimento do projeto mecânico de um robô humanóide capaz de jogar futebol, dimensionado de forma a atender as restrições impostas pela *Robocup – Humanoid League*, categoria de competição robótica da qual pretendemos participar no futuro.

#### 1.2) Justificativa

É comum encontrar artigos sobre programação, eletrônica e técnicas de controle de robôs humanóides, contudo, ainda é muito difícil encontrar material dedicado exclusivamente ao projeto mecânico.

Além disso, o desenvolvimento do nosso próprio robô não estará apenas colocando a FEI como pioneira entre as faculdades brasileiras a participar da *Humanoid League*, o robô servirá também como plataforma para futuras pesquisas desenvolvidas pela equipe *RoboFEI*, e possíveis pesquisas de outras áreas além do futebol de robôs.

## CAPÍTULO 2

### 2) O Futebol de Robôs

O futebol de robôs é uma plataforma de pesquisa desenvolvida em diversas universidades do mundo inteiro. Tem como objetivo o desenvolvimento de robôs móveis autônomos, capazes de realizar tarefas sem a intervenção humana, entre elas, jogar futebol.

Existem diversas categorias de futebol de robôs, cada uma delas com regras específicas, como quantidade de jogadores, tamanho e tipo dos robôs. A principal organizadora das competições é a *ROBOCUP*, organização criada em 1993 com o objetivo de incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas a robótica.

Nas categorias organizadas pela *ROBOCUP*, durante os jogos não é permitida nenhuma intervenção humana, os robôs devem ser autônomos.

Vale ressaltar que o futebol é apenas uma forma de motivar e acelerar as pesquisas direcionando os pesquisadores a um objetivo comum. Uma importante meta desejada pela *ROBOCUP* é de que até o ano de 2050 existam robôs inteligentes capazes de jogar futebol contra o time campeão humano do mesmo ano. Sob a perspectiva de contribuir com a meta dita anteriormente no Centro Universitário da FEI iniciaram-se pesquisas acerca do futebol de robôs. Adiante, segue um breve histórico dessas atividades e seus resultados.

## 2.1) O Futebol de Robôs na FEI

O projeto do Futebol de Robôs e a equipe *RoboFEI* teve início em 2003 com a categoria Very-Small, em 2007 foi desenvolvido um time para outra modalidade mais complexa, o Small-Size da ROBOCUP. Desde o início até os tempos atuais foram desenvolvidos além dos times, *Sistemas de Visão, Controle e Estratégia* de alto nível, comparados aos dos melhores times.

A equipe RoboFEI possui um ótimo histórico de resultados, o vice-campeonato nos anos de 2003, 2007, 2008 e 2009, um terceiro lugar em 2005 e primeiro lugar em 2004 e 2006. Estando entre as melhores equipes desde o seu início [5].

Atualmente a equipe conta com um grupo dedicado de alunos dos cursos de Ciências da Computação, Engenharia Elétrica e Mecânica, sendo o desenvolvimento dos robôs realizado inteiramente por eles, sob a orientação do prof. Flavio Tonidandel. A divisão de tarefas e organização da equipe realiza-se da forma descrita no tópico 2.2.

## 2.2) Equipe RoboFEI

A atual equipe está dividida da seguinte forma [5]:

- Visão computacional, que capta a imagem de todo o campo de jogo e possibilita a localização e identificação dos jogadores e de cada elemento do jogo;
- Estratégia, parte de programação que utiliza as informações da visão para localizar e identificar a bola e cada um dos jogadores, sabendo as posições, avalia as possibilidades e toma uma determinada decisão tática;
- Sistema de trajetória, onde são utilizadas as informações da visão e estratégia, para definir a trajetória que cada jogador deve ter em determinada situação, de modo a desviar de obstáculos e interceptarem a bola com o menor caminho possível;
- Sistema de controle, que com as informações da trajetória, determina como cada robô deve ser acionado, controlando sua velocidade linear e angular de modo que este siga a trajetória previamente definida;

- Projeto mecânico, responsável pelo projeto e construção da estrutura de cada robô e seus componentes, conciliando o espaço e tecnologias necessárias de acordo com as restrições de tamanho do robô;
- Projeto eletrônico, responsável pelo projeto e construção da interface eletrônica de cada robô, necessária para que este receba as informações do controle, possa executá-las dentro do jogo.

Vale ressaltar a importância do trabalho em conjunto de todos esses subgrupos, pois cada um depende diretamente do outro.

### **2.3) Humanoid League**

A liga humanóide engloba duas categorias que se diferem pelo tamanho dos robôs, das traves e tipo de bola. Na categoria *TeenSize* a altura dos robôs pode variar de 100cm a 160cm e na *KidSize*, categoria que pretendemos participar, a altura varia de 30cm a 60cm [2]. Uma descrição mais detalhada quanto às dimensões dos robôs e do campo é delineada a seguir.

#### **2.3.1) Dimensões dos Robôs**

De acordo com as regras estabelecidas pela RoboCup, os robôs devem possuir características humanas, ou seja, possuir dois braços, duas pernas, cabeça, pescoço e tronco [2]. Além da capacidade de mover-se de forma ereta sobre as duas pernas. Referente a altura (H) dos robôs existem as seguintes restrições:



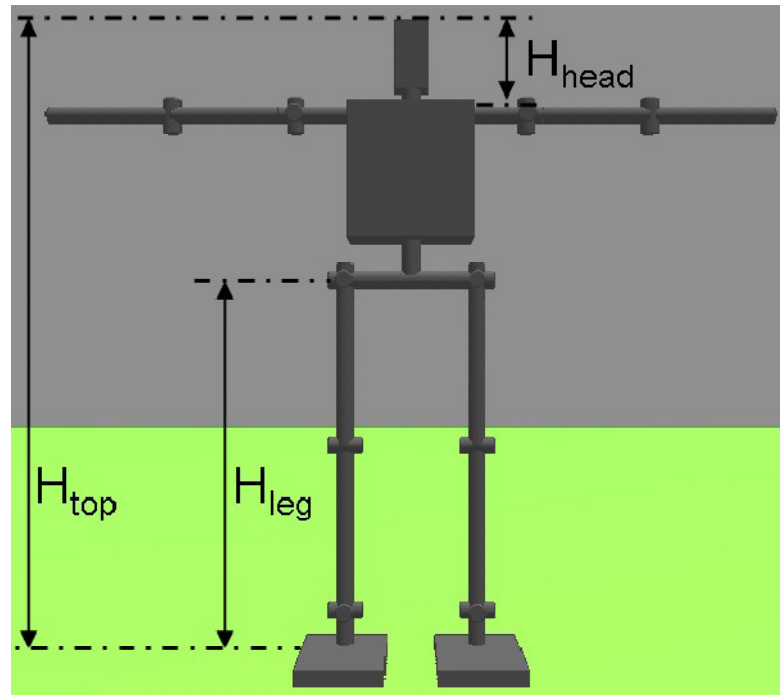


Figura 1 – Relação das alturas [2].

- Cada pé deve caber dentro de um retângulo de área  $H^2/28$ .
- A relação entre comprimento e largura dos pés não deve exceder 2,5.
- O robô precisa caber dentro de um cilindro de diâmetro  $0.55xH$ .
- Os braços em sua abertura máxima devem ser menores que  $1,2xH$ .
- O robô não deve possuir uma configuração onde seu tamanho ultrapasse  $1,5xH$ .
- O comprimento da perna  $H_{leg}$ , incluindo o pé, deve satisfazer a desigualdade  $0.35 \cdot H \leq H_{leg} \leq 0.7 \cdot H$ .
- A altura da cabeça  $H_{head}$ , incluindo o pescoço, deve satisfazer a desigualdade  $0.05 \cdot H \leq H_{head} \leq 0.25 \cdot H$ .

### 2.3.2) Sensores

Os sensores nos robôs devem ser equivalentes aos sentidos humanos [2]. Sensores de captação externa, como câmeras ou sensores de som, não podem ser

colocados nas pernas, braços ou tronco do robô, devem ser colocados na cabeça, acima do pescoço, como seriam respectivamente a visão e audição de um humano.

Sensores de toque, temperatura, força e sensores internos podem ser colocados em qualquer posição do robô.

O campo de visão máximo é limitado a uma semi-esfera ou 180 graus e a rotação do pescoço é limitada em 135 graus para cada um dos lados e 90 graus para cima ou para baixo. O limite do campo de visão pode ser visto na figura a seguir.

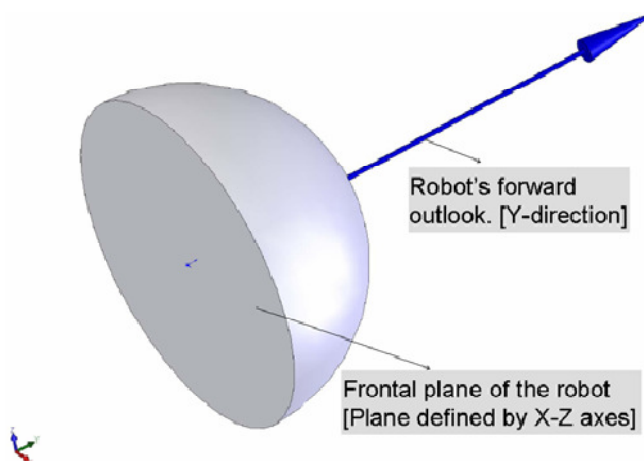


Figura 2 - Limite do campo de visão dos robôs [2].

### 2.3.3) O Campo

O campo é semelhante a um campo de futebol convencional, apresenta dois gols com suas respectivas áreas do goleiro, marcações de meio de campo, laterais e linhas de fundo, além de seis marcações, utilizadas para “restarts”, pênaltis e cobranças de faltas e dois pólos de referência, um em cada lateral, alinhados com a linha central. A superfície do campo é coberta por carpete verde e as linhas de marcação são brancas com 5cm de largura. Um desenho detalhado do campo e suas medidas podem ser vistos a seguir.

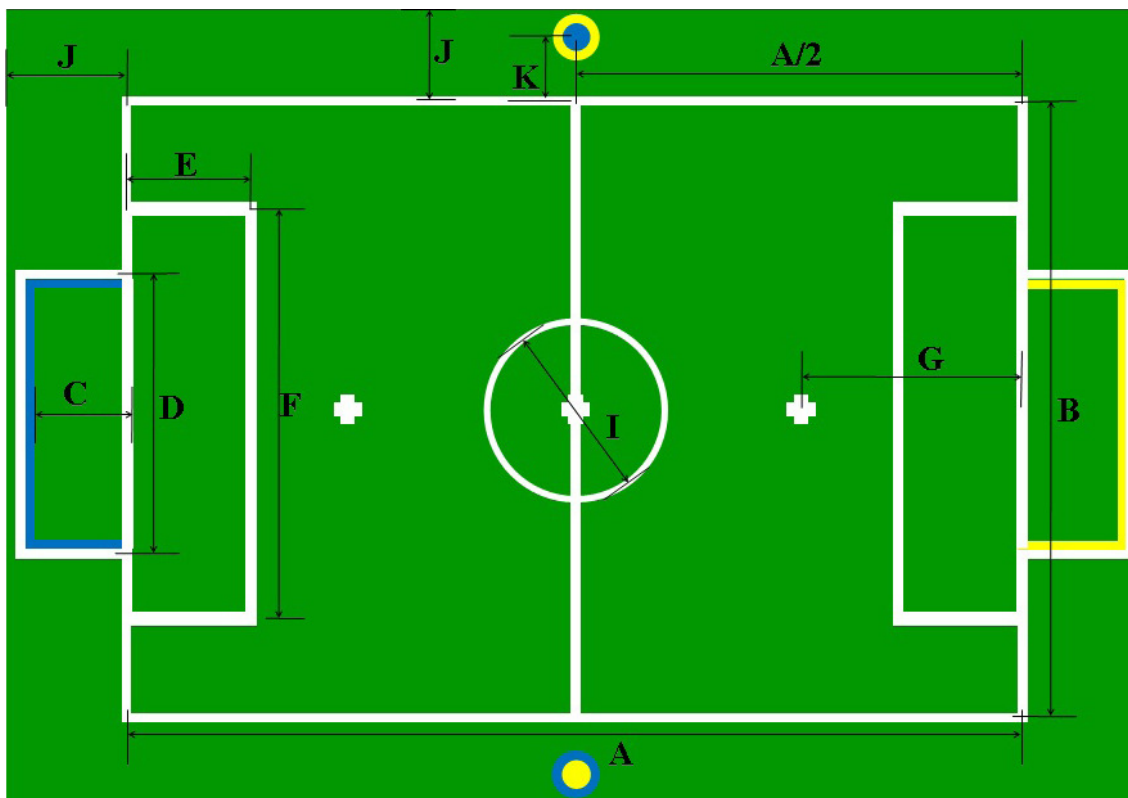


Figura 3 – Campo da *Humanoid League* [2].

Tabela 1 – Dimensões do Campo (cm)

|   | Descrição                         | KidSize | TeenSize |
|---|-----------------------------------|---------|----------|
| A | Comprimento                       |         | 600      |
| B | Largura                           |         | 400      |
| C | Profundidade do Gol               | 50      | 60       |
| D | Largura do Gol                    | 150     | 260      |
| E | Comprimento da Área               |         | 60       |
| F | Largura da Área                   |         | 300      |
| G | Marcação de Pênalti               |         | 180      |
| H | Marcação de Restart               |         | 100      |
| I | Círculo central                   |         | 120      |
| J | Largura da borda                  |         | 70       |
| K | Distância dos pólos de referência |         | 40       |

### 2.3.4) Os Gols

Os gols são compostos por três cilindros brancos de 10cm de diâmetro e três paredes que fecham seu fundo, sendo as paredes de um gol amarelas e do outro azuis. Para a categoria TeenSize a barra superior do gol fica a 180cm de altura e para a KidSize fica a 80 cm, como pode ser observado nas figuras 4 e 5 respectivamente.

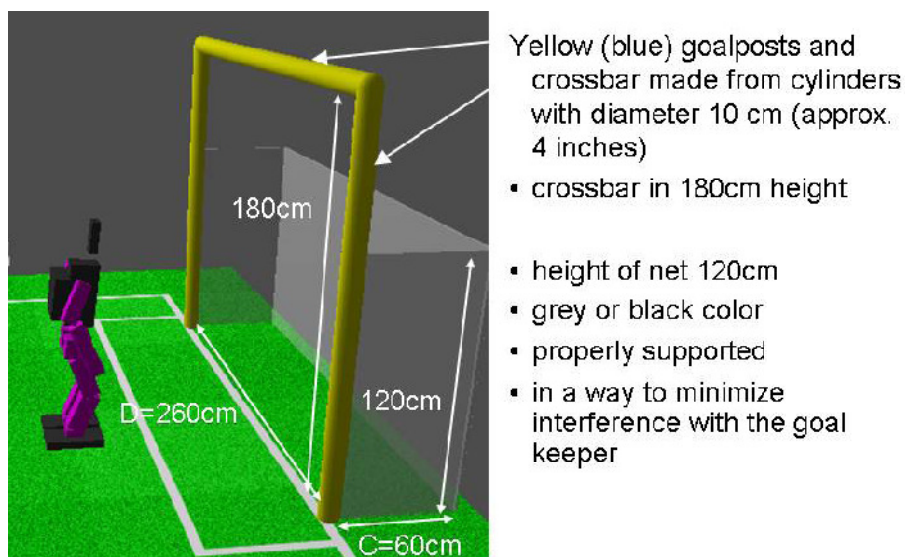


Figura 4 – Gol TeenSize [2].

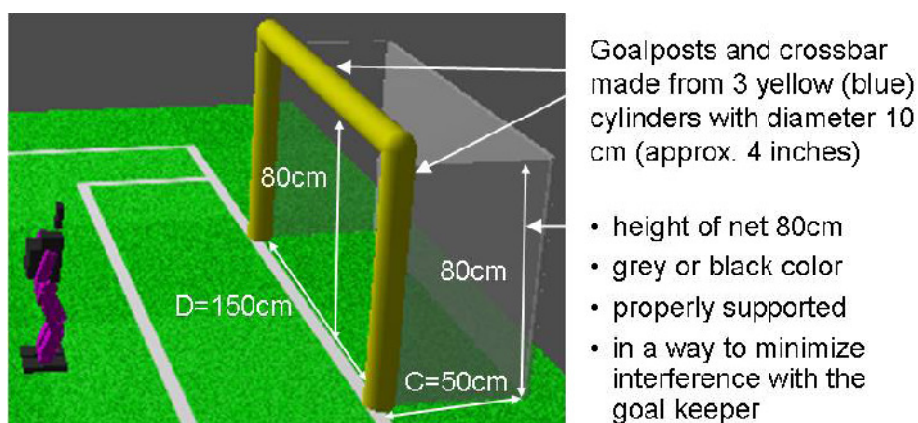


Figura 5 – Gol KidSize [2].

Uma visão geral do campo com um robô é exibida a seguir para que se tenha uma melhor noção da proporção de tamanhos entre robô e campo. Representado na cor magenta tem-se um robô de estatura 60cm, as traves apresentadas, assim como o robô são da categoria KidSize, na qual deseja-se participar com o resultado deste projeto.



Figura 6 – Proporção Campo- Robô KidSize [2].

## CAPÍTULO 3

### 3) Revisão Bibliográfica

#### 3.1) Robôs Humanóides

A partir da década de 80, com o avanço da eletrônica aliado ao surgimento de processadores de alto processamento e pequeno tamanho físico, tem início o aparecimento de diversos projetos de robôs humanóides, o mais famoso entre eles é o ASIMO [6] (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.

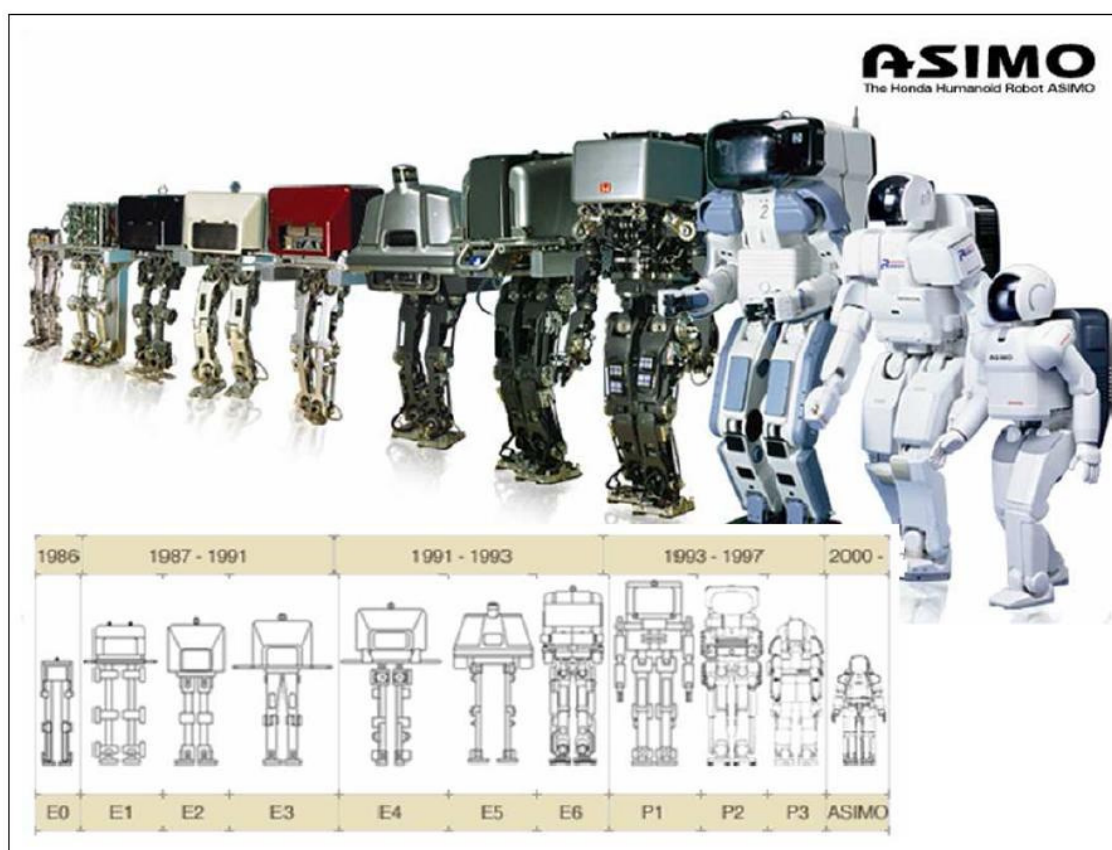


Figura 7 – Linha Cronológica do robô ASIMO [6].

Exemplos mais próximos do que se pretende desenvolver nesta iniciação científica são o Qrio fabricado pela Sony [7] e o NAO da Aldebaran Robotics [8]. 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 8 – Qrio da Sony [7] (a), NAO da Aldebaran Robotics [8] (b).

Variando de acordo com a aplicação ou objetivo, os robôs são construídos cada qual com suas singularidades, não obstante, existem características comuns que podem ser reconhecidas desde os robôs maiores, como o ASIMO até os menores como o QRIO, sendo assim, nos tópicos seguintes discute-se algumas dessas características.

### 3.2) Características Relevantes

Um robô humanóide, mesmo que pequeno e por mais simples que seja sua função é um projeto iterativo de grande complexidade, pois existem muitas variáveis interdependentes, por exemplo, peso, centro de massa e torque necessário nos motores. Qualquer um desses parâmetros quando alterado implica no ajuste de todos os outros, sendo assim, para obter uma convergência rápida é necessário avaliar todas as

características mínimas necessárias para atingir o objetivo proposto antes de fixar um parâmetro e dar início à iteração. Essencialmente, os parâmetros (massa, torque, dimensões, etc.) são regidos por duas características: tipos de atuadores, que representam a maior parte da massa do robô e estão diretamente ligados ao torque; e estrutura, que diz respeito à distribuição de massas e número de articulações necessárias [10]. Apresenta-se a seguir o detalhamento dessas características.

### 3.2.1) Atuadores

No robô, todos os atuadores são empregados no acionamento de articulações, por isso devem ser rápidos, possibilitar um bom controle de posicionamento e possuir força suficiente para mover a articulação e tudo o que estiver ligado a ela.

Por se tratar de um projeto móvel de pequeno porte, descarta-se a possibilidade de uso de atuadores pneumáticos. Solenóides, apesar da grande força e velocidade não nos permitem o controle de posição, são pesados e apresentam um período de latência entre os acionamentos, pois é necessário carregar os capacitores, por isso também são inadequados. Restam-nos então os motores elétricos.

Existem quatro possíveis opções de motores elétricos compatíveis com o projeto, motores DC com escova, motores DC sem escova, motores de passo e servo-motores.

Especificamente para esse projeto a melhor opção são os servo-motores, pois possuem internamente sistemas de redução e de controle de posicionamento, que lhes confere respectivamente torque e precisão no posicionamento. Além de apresentar uma geometria que favorece a montagem.

Servo-motores são atuadores de malha fechada, isto é, recebem um sinal de controle, verificam a posição atual e rotacionam até a posição desejada. Existem servo-motores de rotação contínua, onde os eixos podem girar indefinidamente e servo-motores de posição, onde a liberdade de rotação é inferior a uma volta.



Em articulações como as do corpo humano a rotação dificilmente excede  $180^\circ$  ( $200^\circ$  no pescoço e  $270^\circ$  nos braços aproximadamente), logo, servos de posição já atendem ao projeto.

Internamente os servo-motores de posição são constituído dos seguintes componentes:

- Motor elétrico – atuador responsável pelo movimento;
- Caixa de redução – acoplada ao motor promovendo um aumento do torque de saída;
- Sensor de posição – geralmente um potenciômetro acoplado ao eixo de saída que indica por meio do valor de sua resistência elétrica a posição do eixo;
- Circuito de controle – composto por um oscilador e um controlador PID (controle proporcional derivativo e integrativo) que recebe o sinal do sensor de posição e aciona o motor até o ângulo desejado.

Na figura a seguir é apresentado um esquema dos componentes de um servo-motor de posição.

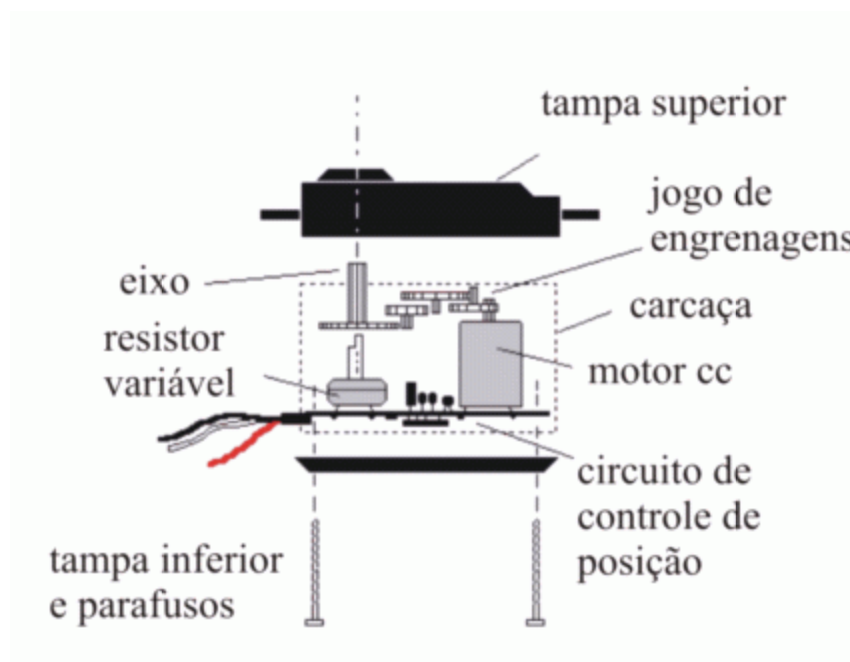


Figura 9 – Componentes de um servo-motor de posição.

Os atuadores têm forte relação com as características da estrutura, articulações e graus de liberdade do robô, pode-se compreender essas relações nos tópicos subsequentes

### 3.2.2) Estrutura

A estrutura do robô dá suporte aos motores e demais componentes, por isso controla a distribuição de massas e somente ela pode ser alterada para ajustar o centro de massa depois de definidos os motores, eletrônica e baterias.

O número de articulações da estrutura está correlacionado à quantidade de graus de liberdade, podendo cada articulação chegar a três graus de liberdade. Pode-se entender cada grau de liberdade como o deslocamento linear ou rotacional em torno de cada eixo cartesiano, no caso particular das juntas de articulação só existem movimentos rotacionais. Portanto, de uma forma específica a este projeto o número de graus de liberdade é igual ao número de motores do robô. Isso pode ser verificado mais à frente quando tratadas as características das outras equipes.

### 3.2.3) Outras Equipes

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um robô capaz de participar das competições organizadas pela *Robocup – Humanoid League*[1], por isso realizou-se uma pesquisa das características relevantes de todas as equipes existentes na categoria *KidSize*.

Com as características mecânicas importantes de cada equipe, tais como massa, graus de liberdade (GDL), altura, montou-se uma tabela para permitir uma visão geral e maior facilidade de comparação entre as equipes existentes.

Tabela 2 – Comparação das Equipes

| EQUIPE              | PAÍS      | ALTURA<br>(cm) | MASSA<br>(kg) | GDL <sup>1</sup> | MOTORES                               | SITE  |
|---------------------|-----------|----------------|---------------|------------------|---------------------------------------|---|
| ZJUDancer           | China     | 55,0           | 3             | 20               | RX-28                                 | <a href="http://www.nlict.zju.edu.cn/humanoid">http://www.nlict.zju.edu.cn/humanoid</a>   |
| RO-PE               | Singapura | 57,0           | 3,5           | 19               | RX-28 e<br>RX-64                      | <a href="http://guppy.mpe.nus.edu.sg/~legged_group/rope/index.htm">http://guppy.mpe.nus.edu.sg/~legged_group/rope/index.htm</a> |
| Kmutt               | Tailândia | 49,0           | 3,0           | 22               | RX-28 e<br>RX-64                      | <a href="http://fibo.kmutt.ac.th/teamkmutt/">http://fibo.kmutt.ac.th/teamkmutt/</a>   |
| Spirit              | Korea     | ?              | 4,27          | ?                | RX-28 e<br>RX-64                      | <a href="http://cafe.daum.net/RnD.SNUT">http://cafe.daum.net/RnD.SNUT</a>   |
| Cyberlords          | México    | 37,0           | 1,35          | 18               | 16 HSR-<br>8498HB<br>CS-12MG          | <a href="http://zeus.lci.ulsu.mx/lrm/">http://zeus.lci.ulsu.mx/lrm/</a>   |
| Persia              | Iran      | 38,0           | 1,6           | 20               |                                       | <a href="http://www.IranAdro.com/Humanoid_Index.htm">http://www.IranAdro.com/Humanoid_Index.htm</a>                             |
| TKU                 | Taiwan    | 46,0           | 3,6           | 26               | KRS-4014,<br>KRS-2350 e<br>KRS-788 HV | <a href="http://iclab.ee.tku.edu.tw/human/index.html">http://iclab.ee.tku.edu.tw/human/index.html</a>                           |
| SiTiK KIT           | Japão     | 59,0           | 5,0           | 20               | RX-28 e<br>RX-64                      | <a href="http://www2.kanazawa-it.ac.jp/robocup/">http://www2.kanazawa-it.ac.jp/robocup/</a>                                     |
| aiRobot             | Taiwan    | 55,0           | 3,2           | 21               | AX12, RX28<br>e RX64                  | <a href="http://ic2s.ee.ncku.edu.tw/ic2s/main.htm">http://ic2s.ee.ncku.edu.tw/ic2s/main.htm</a>                                 |
| Fumanoid            | Alemanha  | 60,0           | 4,32          | 22               | AX-28 e<br>RX-64                      | <a href="http://fumanoid.mi.fu-berlin.de/pmwiki/index.php">http://fumanoid.mi.fu-berlin.de/pmwiki/index.php</a>                 |
| Persian Gulf        | Iran      | 45,0           | 2,2           | 20               | AX-12                                 | <a href="http://persian-gulf-team.ir">http://persian-gulf-team.ir</a>   |
| Darmstadt Dribblers | Alemanha  | 57,5           | 3,34          | 21               | RX-28 e<br>RX-64                      | <a href="http://www.dribblers.de">http://www.dribblers.de</a>   |
| PUMAS-UNAM          | México    | 43,2           | 2,4           | 22               | ?                                     | <a href="http://biorobotics.fi-p.unam.mx">http://biorobotics.fi-p.unam.mx</a>   |
| Robo-Erectus Jr.    | Singapura | 52,0           | 3,3           | 18               | DX-117 e<br>DX-64                     | <a href="http://www.rob-erectus.org">http://www.rob-erectus.org</a>   |
| CIT Brains          | Alemanha  | 59,5           | 3,5           | 20               | DX117,<br>RX28, RX64                  | <a href="http://www.hayashibara.net/robocup">http://www.hayashibara.net/robocup</a>   |
| WF Wolves           | Alemanha  | 36,0           | 1,5           | 18               | wCK-1111K<br>wCK-1108K                | <a href="http://robocup.fh-wolfenbuettel.de">http://robocup.fh-wolfenbuettel.de</a>   |

| EQUIPE                                  | PAÍS     | ALTURA<br>(cm) | MASSA<br>(kg) | GDL <sup>1</sup> | MOTORES   | SITE  |
|---|----------|----------------|---------------|------------------|---|---|
| <b>UChile<br/>RoadRunners<br/>Campo</b> | Chile    | 52,3           | 3,3           | 18               | DX-117 e<br>RX-64                                 | <a href="http://www.robocup.cl/humanoid.htm">http://www.robocup.cl/humanoid.htm</a>                         |
| <b>NimbRo<br/>KidSize</b>               | Alemanha | 60,0           | 4,0           | 20               | RX-64 e<br>DX-117                                 | <a href="http://www.NimbRo.net">http://www.NimbRo.net</a>   |
| <b>VT Darwin</b>                        | USA      | 56,0           | 3,6           | 20               | EX-106,<br>RX-64 e<br>RX-28                       | <a href="http://www.me.vt.edu/Robocup">http://www.me.vt.edu/Robocup</a>                                     |
| <b>UofM<br/>Humanoids<br/>Kid</b>       | Canadá   | 41,0           |               | 19               | AX12  | <a href="http://buckeye.cs.umanitoba.ca">http://buckeye.cs.umanitoba.ca</a>                                 |
| <b>Bobogots<br/>TecMTY</b>              | México   | 43,26          | 2,1           | 21               | Hitec 18<br>HS5645MG e<br>2 HS55                  | <a href="http://homepage.cem.itesm.mx/aaceves/Bogobots/">http://homepage.cem.itesm.mx/aaceves/Bogobots/</a> |
| <b>PIONEROS<br/>Mexico</b>              | México   | ?              | ?             | 21               | RX10, RX28<br>e RX64                              | <a href="http://www.pionerosmexico.org">http://www.pionerosmexico.org</a>                                   |
| <b>RoboPatriots</b>                     | USA      | ?              | ?             | 20               | KRS-4024,<br>KRS-788HV,<br>HS-5085MG<br>e S3153MG | <a href="http://robo.irixmedia.com">http://robo.irixmedia.com</a>   |
| <b>Robo Noble</b>                       | Iran     | 58,0           | 4,9           | 28               | ?   | <a href="http://www.taherre.ir">http://www.taherre.ir</a>   |
| <b>TH-MOS</b>                           | China    | 58,8           | 3,0           | 21               | DX117 e<br>AX12                                   | <a href="http://www2.pim.tsinghua.edu.cn/robocup">http://www2.pim.tsinghua.edu.cn/robocup</a>               |
| <b>UChile<br/>RoadRunners</b>           | Chile    | 52,6           | 3,0           | 22               | RX28  | <a href="http://www.robocup.cl/humanoid.htm">http://www.robocup.cl/humanoid.htm</a>                         |

\*Campos com “?” correspondem a informação não disponível; <sup>1</sup> Graus de Liberdade

### 3.3) Dinâmica Humanóide

Se tratando de robôs móveis com quatro ou mais pernas, é possível garantir a estabilidade levando em consideração apenas critérios de equilíbrio estático, pois é possível realizar o movimento mantendo até três apoios em contato com o solo [9]. Em contra partida, nos robôs bípedes tem-se apenas um ponto de apoio durante a troca de pernas, sendo assim é necessário considerar as características dinâmicas do robô para

garantir estabilidade e equilíbrio durante a caminhada. Os critérios do equilíbrio estático regem a geometria construtiva do robô, enquanto que, de uma maneira comparativa, a dinâmica possui maior influência na forma e intensidade com que o robô realiza os movimentos, exercendo uma influência menor em suas características construtivas. Não obstante, deve-se conhecer as limitações oriundas da dinâmica para que não seja projetado um sistema incapaz de manter a estabilidade durante o movimento.

Existem diversas abordagens e métodos acerca do equilíbrio dinâmico em movimentação bípede, contudo a grande maioria é baseada nos conceitos do Zero Moment Point [3] e Center of Pressure [4]. A seguir descreve-se cada um desses conceitos.

### 3.3.1) 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, 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) [3].

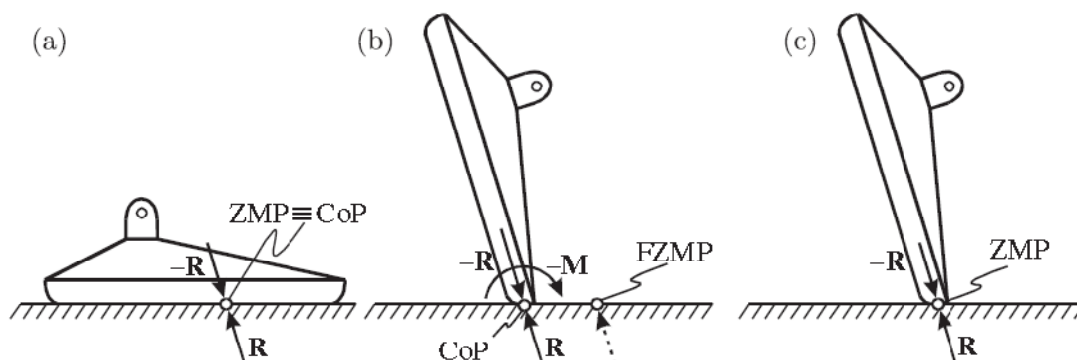


Figura 10 – Vínculo entre pé e solo / posição do ZMP [3].

(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 dificuldade 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 [3] 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 (sem motorização), além do vínculo entre o pé e o solo, é aplicável ao balanço livre dos braços durante a caminhada.

### 3.3.2)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:

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

Onde  $P_{ZMP}$  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  $P_{ZMP}$  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. 11(a)], que o pé encontra-se totalmente em contato com o solo e substitui-se os efeitos da estrutura acima do tornozelo pela força  $F_A$  e momento  $M_A$  [Fig. 11(b)].

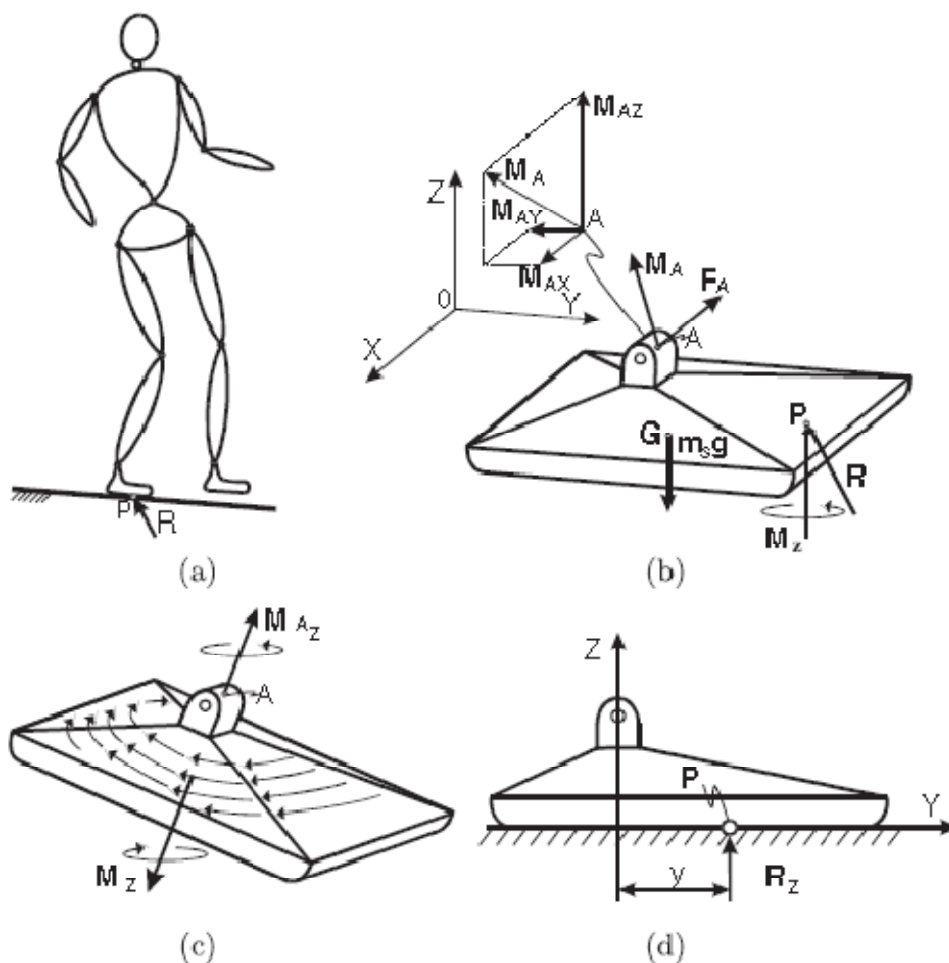


Figura 11 – Aproximação das forças agindo sobre mecanismo [3].

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. 11(c)] é o momento de fricção que faz oposição a  $\mathbf{M}_A$ , evitando o escorregamento.

Enquanto o robô está parado, o ponto **P** corresponde ao centro de gravidade do sistema, projetado sobre o polígono de suporte **S** por **F<sub>A</sub>** e **M<sub>A</sub>**, entretanto, sob os efeitos da dinâmica, o ponto **P** onde age **R** e **M<sub>Z</sub>** é deslocado de **y** [Fig. 11 (d)]. Se o polígono de suporte **S** não for grande o suficiente para suportar o deslocamento **y**, **R** atuará na borda do pé ocasionando a rotação [3]. Aplicando as equações da estática para a fase uni-apoiada:

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

$$\overrightarrow{OP} \times \vec{\mathbf{R}} + \overrightarrow{OG} \times \mathbf{m}_s \mathbf{g} + \mathbf{M}_A + \mathbf{M}_Z + \overrightarrow{OA} \times \mathbf{F}_A = \mathbf{0} \quad (3)$$

Onde **O** é a origem do sistema de vetores, **A** é a articulação do tornozelo, **m<sub>s</sub>** a massa do robô e **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

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

### 3.3.3) 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 [4]. 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

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

$$M_{CoP}^x = 0 ; \quad M_{CoP}^y = 0 \quad (7)$$

## CAPÍTULO 4

### 4) O Projeto

Neste capítulo são tratadas as etapas do desenvolvimento e a ordem em que foram realizadas, assim como escolhas de componentes e decisões tomadas no decorrer do projeto.

#### 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, nos braços e pernas, atuam como partes estruturais do robô, responsáveis pela sustentação dos demais componentes.

Pesquisou-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 da Dynamixel [11], uma empresa especializada em atuadores para o segmento de robótica. Mais adiante, depois de explanados os conceitos de graus de liberdade e disposição dos motores, apresenta-se a descrição dos cálculos prévios para a escolha dos motores.

Em comparação com os demais servo-motores o RX-28 apresenta diversas características que o tornam superior:

- Geometria que favorece a montagem e a distribuição de massa;



Figura 12 – Servo-motor Dynamixel RX-28 [11].

- Torque superior ao dos motores de mesmas dimensões devido a um sistema de redução mais eficiente e compacto;
- Controle de velocidade e posição com grande resolução (1024 pulsos);
- Controlador interno capaz de controlar simultaneamente com um único comando, torque, velocidade posição;
- Possibilidade de ligar os motores em série, diminuindo a quantidade de fios passando pelo robô;

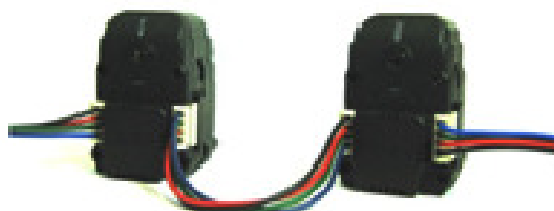


Figura 13 – Ligação de motores em série [11].

## 4.1.2) Especificações do Motor

Tabela 3 – 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                                |       |

## 4.2) Estrutura

A estrutura compreende duas partes distintas, uma delas constituída pelos motores, que além da produção de movimento têm função estrutural e a outra, composta por peças de alumínio, que têm por função unir os motores e demais componentes ao mesmo passo que posiciona o centro de massa.

### 4.2.1) Graus de Liberdade

Como explicado anteriormente (item 3.2.2), neste projeto os graus de liberdade são as rotações que as juntas do robô são capazes de executar em torno de cada eixo cartesiano, por isso cada uma das juntas pode apresentar até três graus de liberdade. Cada um desses movimentos é realizado por um servo-motor, sendo assim é necessário

definir a quantidade de graus de liberdade para definirmos o número de motores necessários.

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 necessária de graus de liberdade para um caminhar semelhante ao humano [12], assim como, a quantidade para os 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, assim como, a quantidade empregada por outras equipes, disponível na tabela 2.

A seguir pode-se observar graficamente o padrão do caminhar bípede, resultado de simulação realizada no *Locomotion Laborator - University of Jena, Germany* [12].

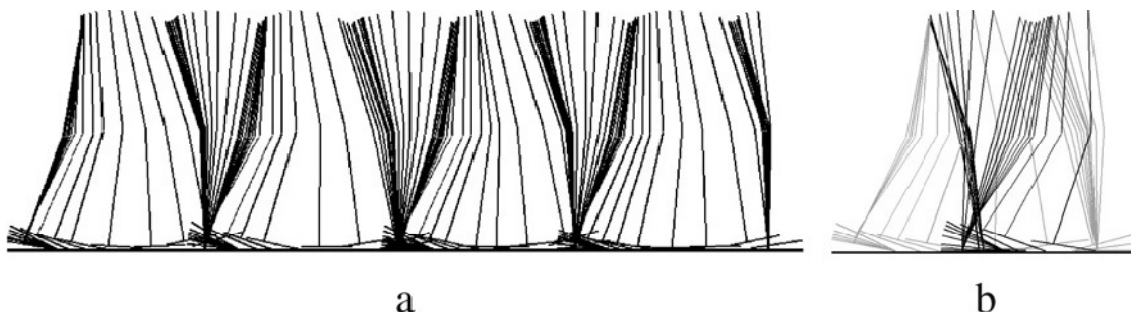


Figura 14 – Modelo de arames do comportamento na caminhada.

(a) Comportamento de uma perna em quatro passos e (b) Comportamento de duas pernas em um único passo [12].

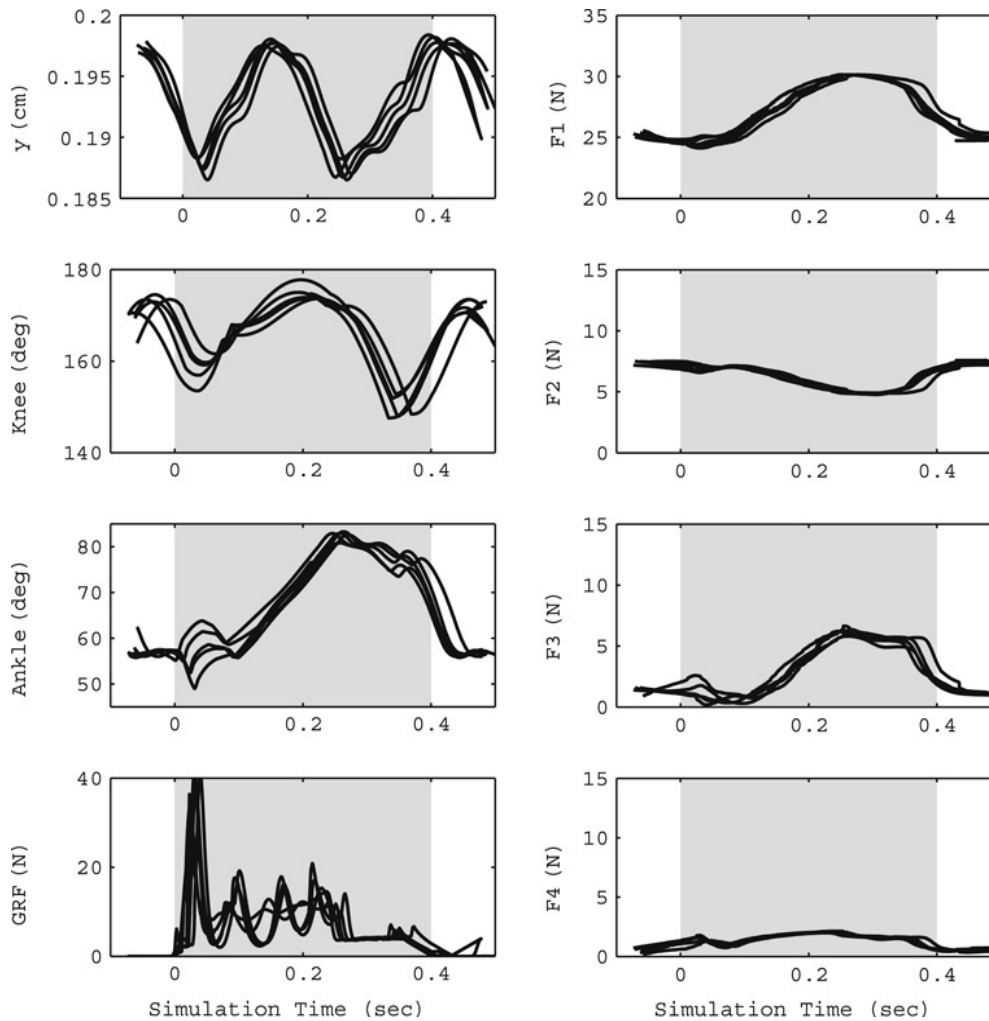


Figura 15 – Trajetória das juntas e forças verticais atuantes (respectivamente da esquerda para a direita) durante a simulação de caminhada. De cima para baixo: movimento vertical do corpo; trajetórias angulares do joelho e junta do tornozelo; forças de reação do solo [12].

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). Por isso reduziu-se em quatro o número de graus de liberdade (dois a menos em cada perna), chegando ao valor de 22 graus de liberdade.

Os 22 graus de liberdade estarão distribuídos da seguinte forma: seis em cada uma das pernas, três em cada braço, dois no tronco e dois no pescoço. Na figura a seguir é possível compreender a disposição dos graus de liberdade em cada uma das partes do robô.

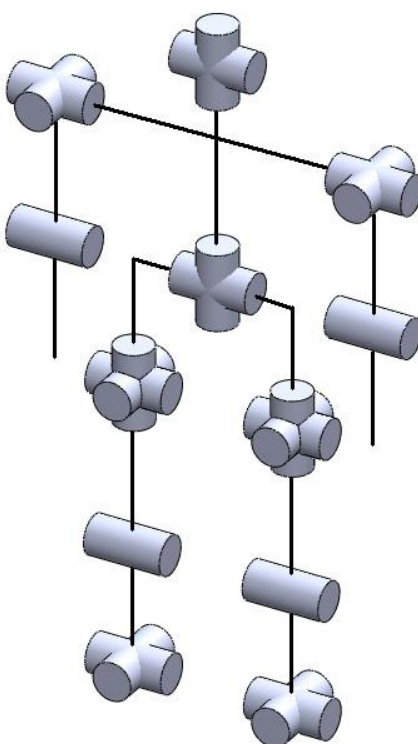


Figura 16 – Desenho Esquemático dos Graus de liberdade

#### 4.2.2) Disposição dos motores

Esta etapa precede o projeto da estrutura de alumínio, pois existem limitações geométricas na disposição dos motores, diferente da idéia esquemática dos graus de liberdade, aqui não é possível haver intersecções entre os eixos de rotação, pois obviamente um motor não pode invadir o espaço físico do outro, em adição, deve haver

espaço suficiente para que a articulação possa realizar seu movimento sem colidir com outras partes do robô e não menos importante, os motores devem respeitar os limites geométricos da forma humanóide. Neste momento não há ainda uma preocupação com distâncias entre os motores e posição do centro de massa, realiza-se apenas um arranjo dos motores respeitando as limitações citadas anteriormente, as distâncias serão devidamente calculadas no projeto da estrutura de alumínio, pois esta, ao contrário dos motores é possível moldar de forma a atender os cálculos do centro de massa.

A seguir encontra-se uma ilustração com a disposição dos motores, vale lembrar que embora se tenha obedecido a uma proporção, as distâncias entre motores são passíveis de mudança e por isso são apenas qualitativas (espera-se que a orientação dos motores sofra apenas pequenas mudanças ou continue a mesma).



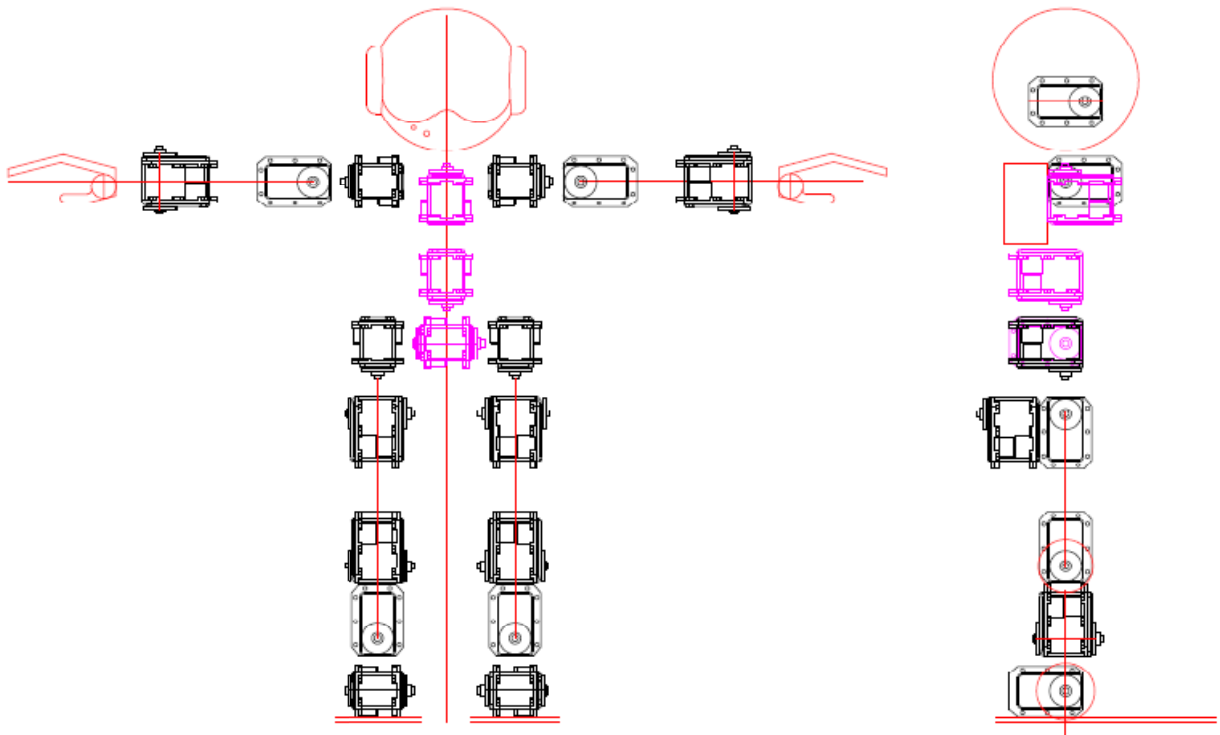


Figura 17 – Disposição dos motores

### 4.3) Dimensionamento prévio dos motores

Conhecido o arranjo dos motores é possível identificar as formas de solicitação mecânica e o motor sujeito ao maior esforço. Dessa forma constatou-se que tal motor localiza-se na articulação do pé.

Para o cálculo do torque necessário no motor de maior solicitação considerou-se uma inclinação de  $60^\circ$  em relação ao plano horizontal, valor bastante acentuado, podendo ser considerado o máximo desenvolvido pelo robô durante a caminhada. A representação do robô na referida inclinação é exibida na figura 18.

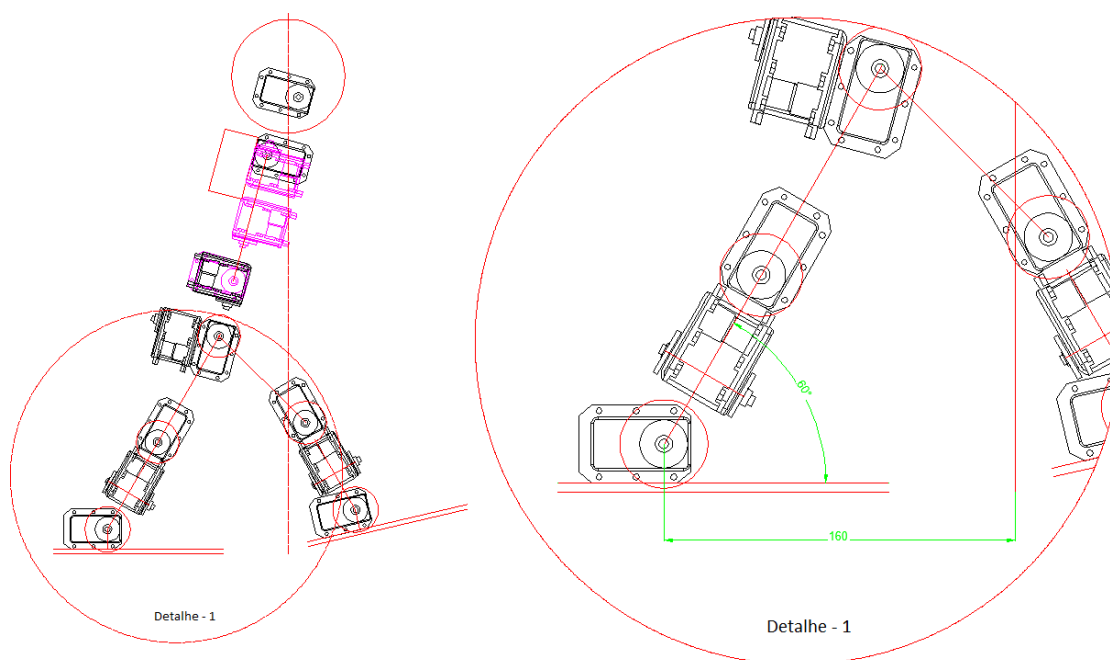


Figura 18 – Detalhamento do robô inclinado em  $60^\circ$

A massa dos motores se distribui de maneira desuniforme ao longo do plano horizontal, entretanto, para o dimensionamento prévio do motor é uma aproximação bastante segura considerar a massa dos demais motores concentrada sobre a linha vertical que desce do centro da cabeça até o plano horizontal. Sendo assim, considerou-

se a distância da linha vertical até o eixo de rotação como sendo o braço do momento que atua sobre o motor do pé.

$$F = (m_u \cdot n) \cdot g \quad (8)$$

$$T = F \cdot b \quad (9)$$

Onde:

$F$  : Força oriunda do peso dos motores;

$m_u$ : Massa unitária do motor;

$n$  : Número de motores;

$b$  : Braço de atuação da força;

$g$  : Aceleração da gravidade.

Substituindo os valores numéricos nas equações (8) e (9) respectivamente, tem-se:

$$F = (0,072 \cdot 21) \cdot 9,8 = 14,82 \text{ N}$$

$$T = 14,82 \cdot 0,160 = 2,37 \text{ Nm}$$

Procurando por um motor de torque igual ou superior ao calculado anteriormente encontrou-se o modelo RX-28, já descrito.

#### 4.4) Projeto da estrutura metálica

No projeto da estrutura metálica é necessário garantir a mobilidade necessária para o movimento de cada uma das articulações, evitando colisões e interferências de movimentos simultâneos, para tanto, uma vez que é possível usar a estrutura metálica da forma que se preferir, projetou-se geometrias adaptadas a cada especificidade dos movimentos, diferente dos motores onde foi possível alterar apenas a disposição, sem a possibilidade de alteração em sua forma. Por esse motivo definiu-se previamente o tipo e arranjo geométrico dos motores e só então iniciou-se o projeto da estrutura.

#### 4.4.1 Dimensionamento dos pés

A tarefa de equilibrar o robô torna-se menos difícil ao passo que se aumenta o tamanho dos pés mantendo uma dada altura, por isso, com o objetivo de incentivar o progresso das pesquisas e manter as proporções coerentes a Humanoid League estipulou a regra de os pés do robô devem caber em um retângulo de área  $H^2/28$ , onde H é a altura do robô.

Sabe-se que a altura do robô projetado não ultrapassará 535mm e futuramente pretendem aumentar o denominador da relação  $H^2/28$ , diminuindo gradualmente a área permitida para os pés, por isso, projetou-se os pés de forma a atender uma relação menor conforme é apresentado na figura 19 e nos cálculos conseguintes.

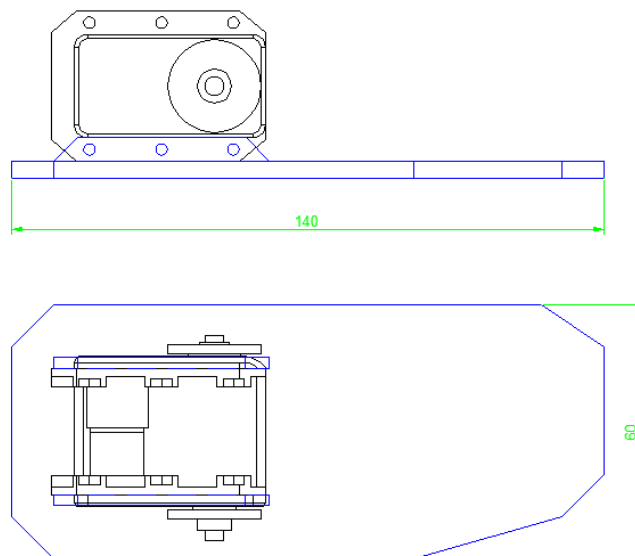


Figura 19 – Elevação e planta do pé junto ao motor

$$A = 140 \cdot 60 = 8400 \text{ mm}^2$$

$$8400 = \frac{H^2}{cte} = \frac{535^2}{cte} \Rightarrow cte = 34,07 \therefore A = \frac{H^2}{34} \quad (10)$$

#### 4.4.2) Projeto das articulações

No projeto das articulações é necessário avaliar a possibilidade de colisões como dito anteriormente, para isso utilizou-se dos conceitos de geometria descritiva [13] motivo pelo qual realizou-se o dimensionamento inicial em 2D, utilizando-se *Autocad* [14]. Procedeu-se da seguinte maneira. Desenhou-se os motores e avaliou-se o movimento relativo entre eles, na seqüência definiu-se as distâncias de forma a manter coerentes a anatomia e funcionamento do robô. Para cada um dos motores desenhou-se linhas de construção em vermelho delimitando a região livre necessária aos seus movimentos e assegurando que não haja intersecção entre essas regiões garantiu-se o funcionamento sem colisões. Posteriormente analisou-se as possíveis formas de fixação aos motores e desenhou-se cada uma das peças buscando a forma mais simples e conveniente ao seu funcionamento.

Nas figuras 20 e 21 é ilustrado o procedimento descrito anteriormente, em preto representou-se as linhas do motor, em vermelho delimitou-se a região do movimento e em azul desenhou-se as peças.

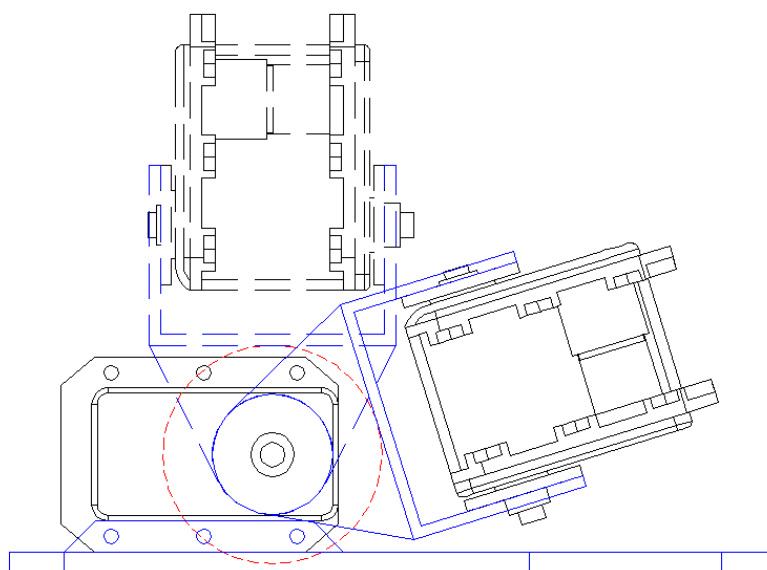


Figura 20 – Articulação do pé

Na seqüência têm-se a representação da perna flexionada. Cada perna é composta por cinco motores, dois respectivamente, para a articulação frontal e lateral do pé, um para o joelho e mais dois para a elevação frontal e lateral da coxa. Como descrito anteriormente, os círculos tracejados em vermelho representam a região livre necessária para que não haja colisão durante o movimento translacional dos motores.

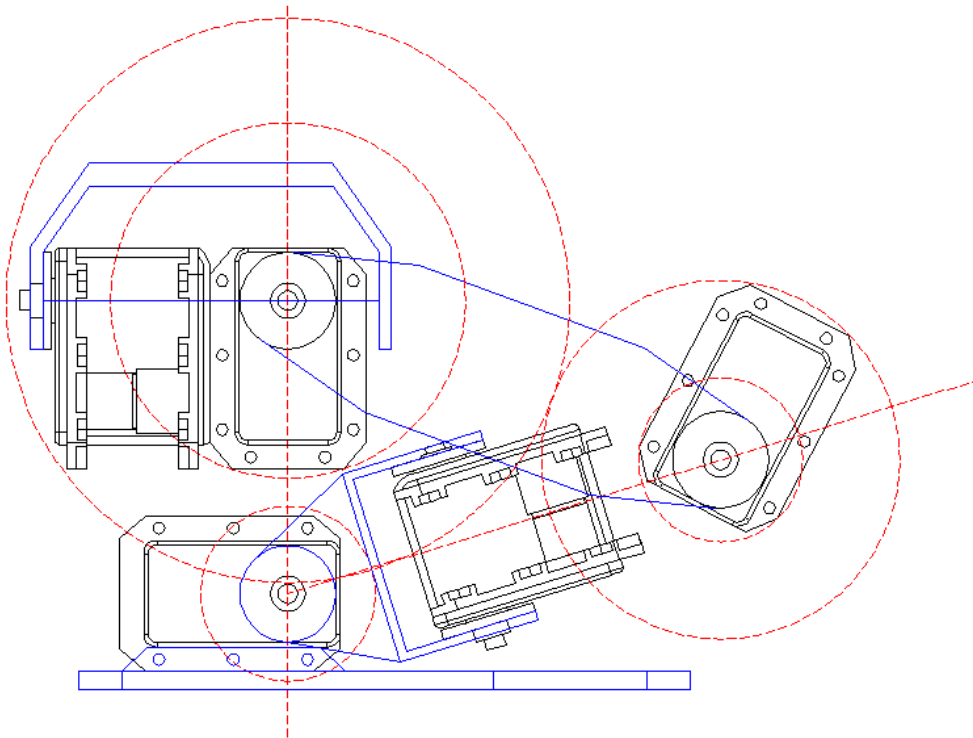


Figura 21 – Articulações do joelho e pé

## CAPÍTULO 5

### 5) Modelagem 3D

Posteriormente ao dimensionamento em CAD 2D iniciou-se o modelagem das peças em 3D. Com os modelos em 3D é possível validar e averiguar que não existem erros no projeto, além de permitir a simulação de tensões, funcionamento das peças e cálculo do centro de massa. De forma prosseguir com a explanação anterior, nas figuras de 22 a 24 tem-se a representação 3D da perna utilizou-se para descrever a metodologia do projeto em 2D.

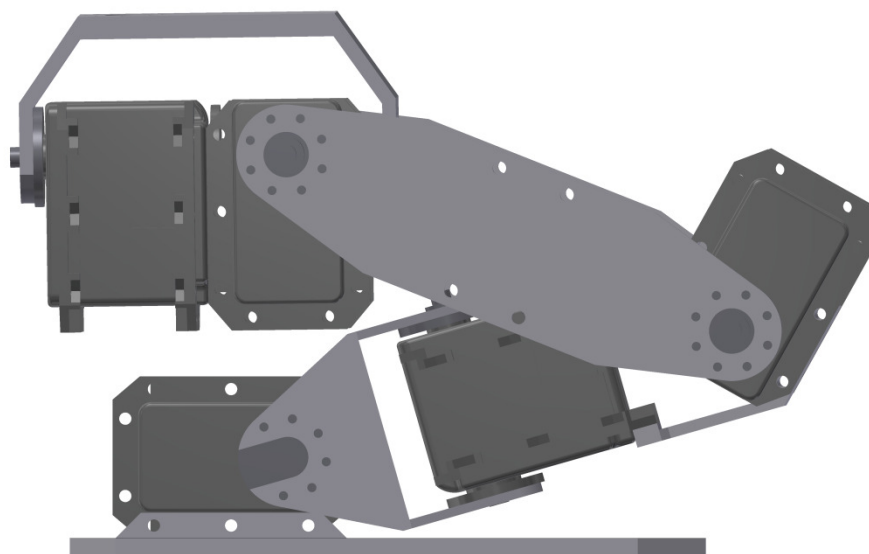


Figura 22 – Modelo 3D da perna flexionada – Vista lateral

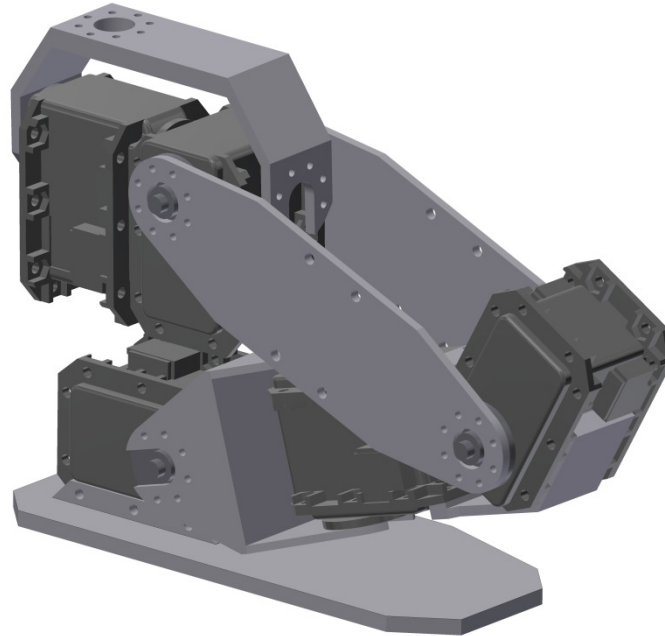


Figura 23 – Modelo 3D da perna flexionada – Perspectiva

Montou-se cada uma das peças e utilizando-se das ferramentas de movimentação e análise do software simulou-se os movimentos de extensão e flexão máximos do robô.



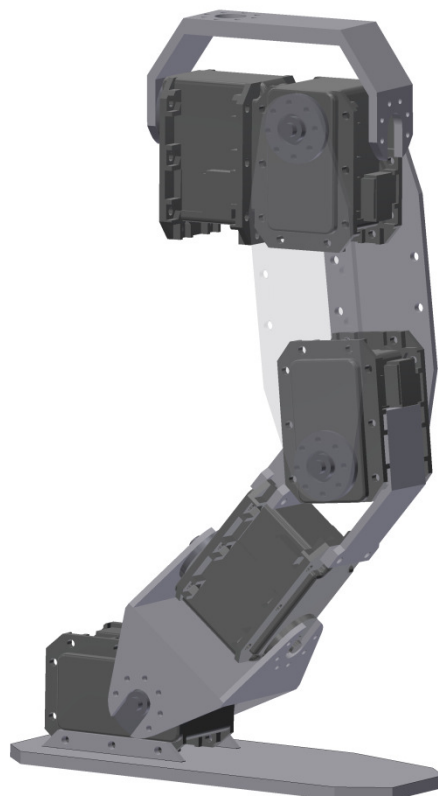


Figura 24 – Modelo 3D da perna estendida

\*Nota: Para os desenhos e simulações utilizou-se de softwares com licenças educacionais concedidas pela Autodesk [14]

Na seqüência, são exibidos desenhos da montagem completa do robô em 3D, assim como, a representação dos componentes em vista explodida, para que sua montagem seja melhor compreendida.

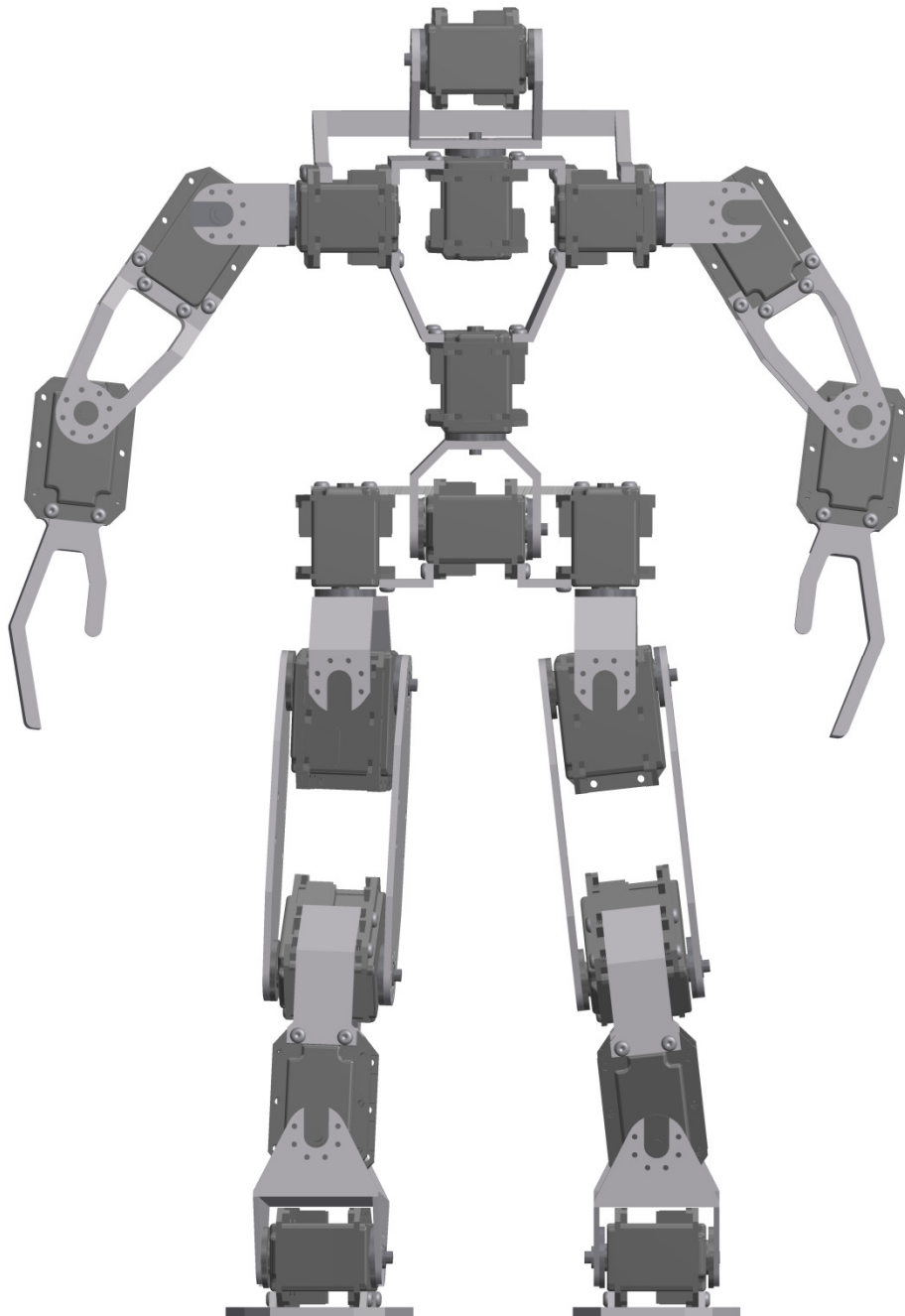


Figura 25 – Montagem do robô – Vista frontal



Figura 26 – Montagem do robô – Perspectiva

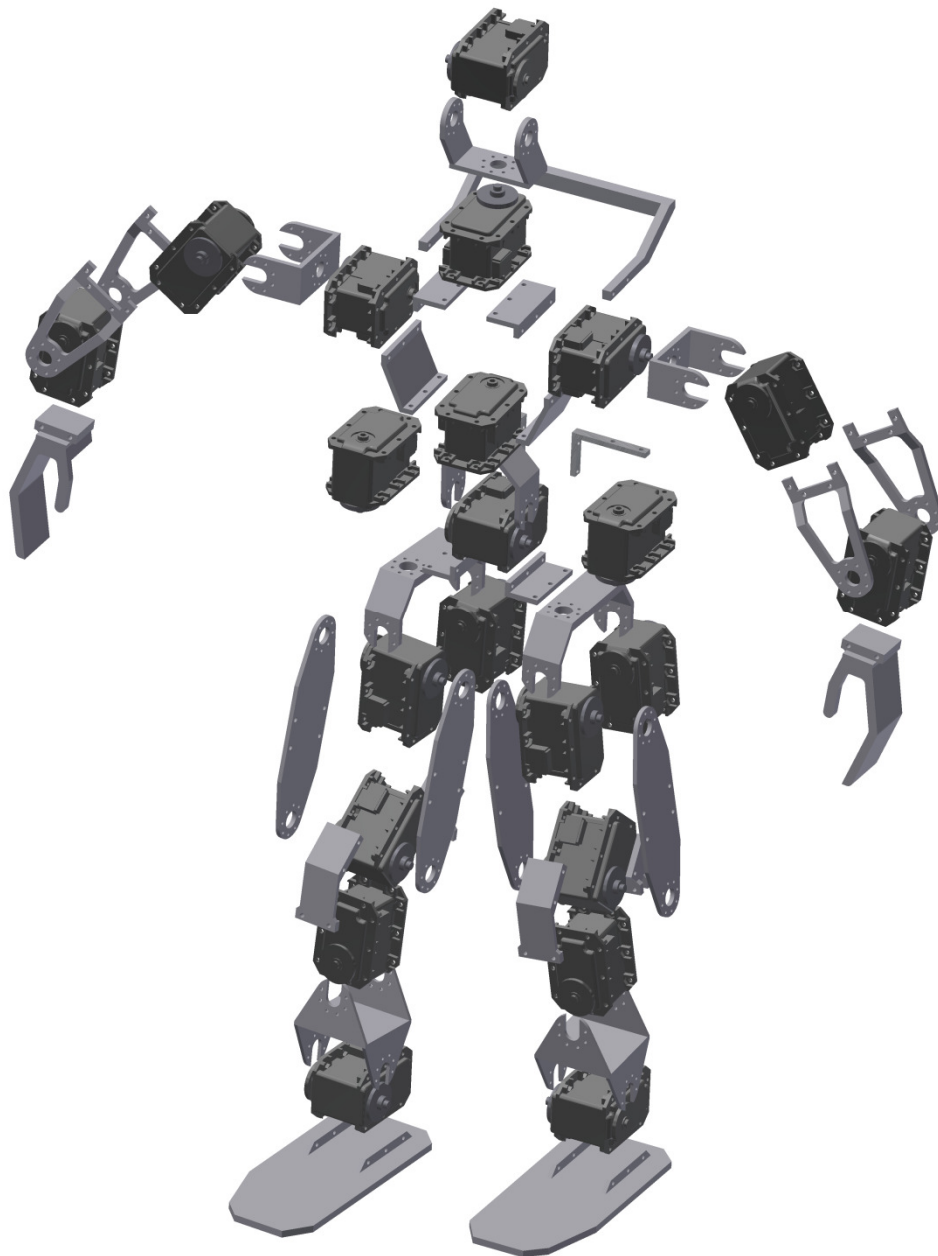


Figura 27 – Vista explodida

## CAPÍTULO 6

### 6) Propriedades de massa

Realizada a montagem coletou-se informações acerca da massa, momentos de inércia e centro de massa do robô. Tais informações foram obtidas do *Inventor* e constam na figura 28.

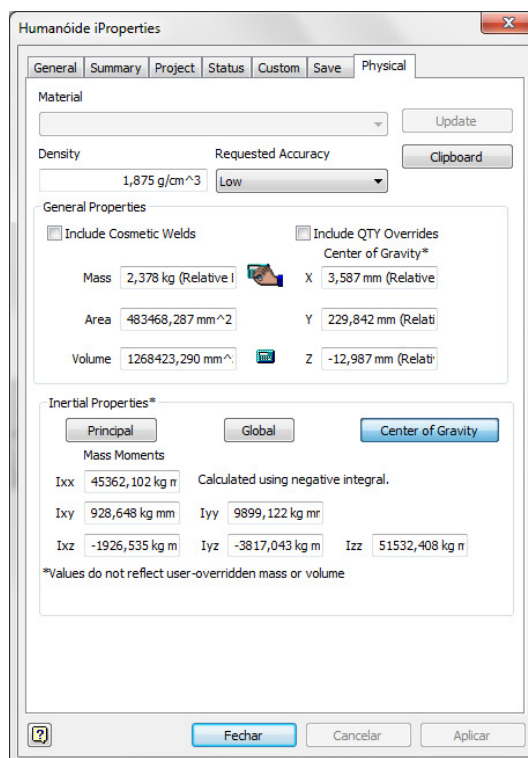


Figura 28 – Painel de Propriedades – Autodesk Inventor

Utilizando-se dessas informações verificou-se os cálculos de dimensionamento dos motores tratados no tópico 4.3. Para isso, posicionou-se o modelo do robô inclinado a 60°, assim como realizado no dimensionamento prévio com o desenho 2D.

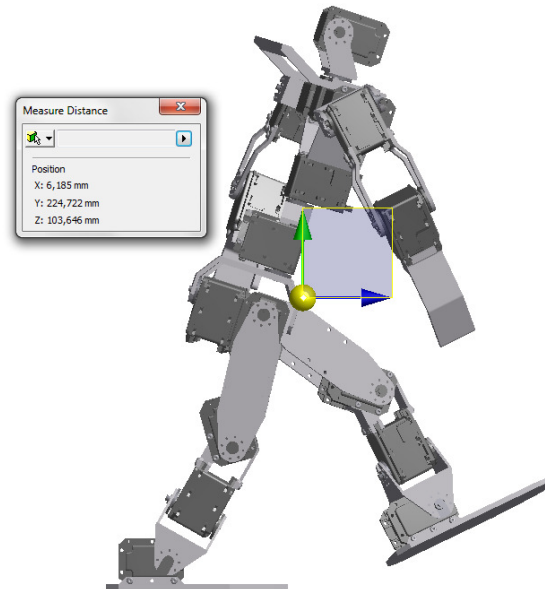


Figura 29 – Coordenadas do centro de massa para uma inclinação de 60°

Para os valores obtidos do modelo 3D posicionado recalculou-se o torque necessário utilizando as equações (8) e (9) respectivamente:

$$F = 2,38 \cdot 9,8 = 23,32 \text{ N}$$

$$T = 23,32 \cdot 0,114 = 2,66 \text{ Nm}$$

O motor escolhido com base nos cálculos prévios suporta um torque de até 2,83Nm, portanto seu dimensionamento está coerente.

## CAPÍTULO 7

### 7) Simulações

#### 7.1) Centro de gravidade

Uma simulação dinâmica do robô exigiria além de um software especializado, a sua modelagem matemática, o que por si demandaria tanto tempo quanto utilizou-se nesta iniciação científica fugindo do real escopo, o projeto da mecânica do robô. Contudo, realizou-se uma análise do posicionamento do centro de gravidade do robô durante o seu deslocamento. Para efeito de equilíbrio, essa análise tem validade apenas estática, pois a aceleração do centro de massa do robô tem grande influência em seu equilíbrio dinâmico conforme visto na teoria proposta por *Vukobratović* [3]. Pode-se considerar o robô estaticamente estável desde que a projeção do centro de gravidade incida sobre a região de contato entre seu pé apoiado e o solo.

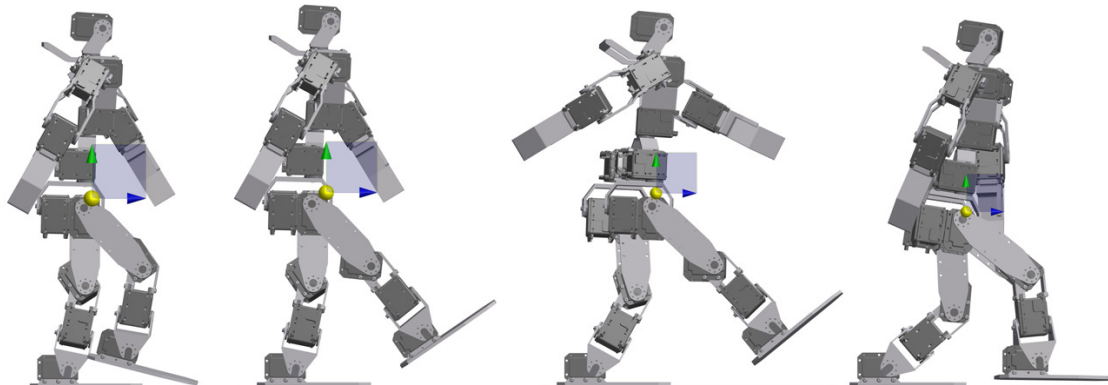


Figura 30 – Variação do posicionamento do centro de gravidade durante a caminhada

## 7.2) Elementos finitos

Para verificar a resistência mecânica, utilizando-se as ferramentas de elementos finitos do *Autodesk Inventor*, simulou-se as tensões e deformações à que as peças estarão sujeitas. Existem softwares mais precisos, dedicados exclusivamente à análise de elementos finitos, entretanto, para as exigências do presente projeto os recursos disponíveis no *Autodesk Inventor* são suficientes.

A malha de elementos gerada pelo software é exibida na figura 31, pode-se observar que uma malha mais refinada foi gerada nas regiões de concentração de tensão para uma maior precisão nos cálculos.

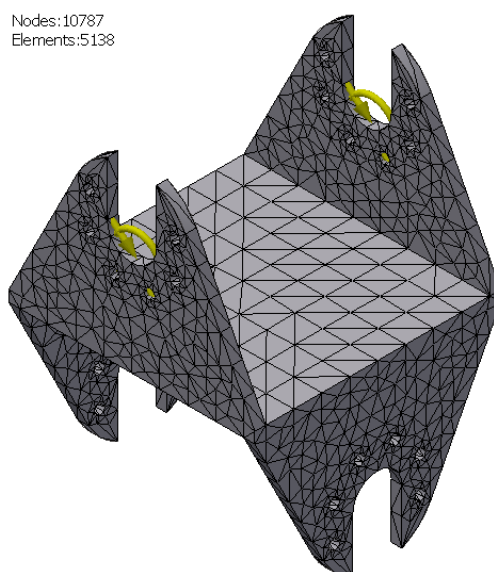


Figura 31– Malha de elementos finitos

Nas figuras a seguir são exibidos em mapas de cores os resultados das análises de tensões e deformações. Vale ressaltar que as deformações podem parecer grandes, mas na verdade têm sua representação propositalmente exagerada pelo software pelo fato de serem muito pequenas, suas reais dimensões são indicadas na cor correspondente na escala ao lado da figura.



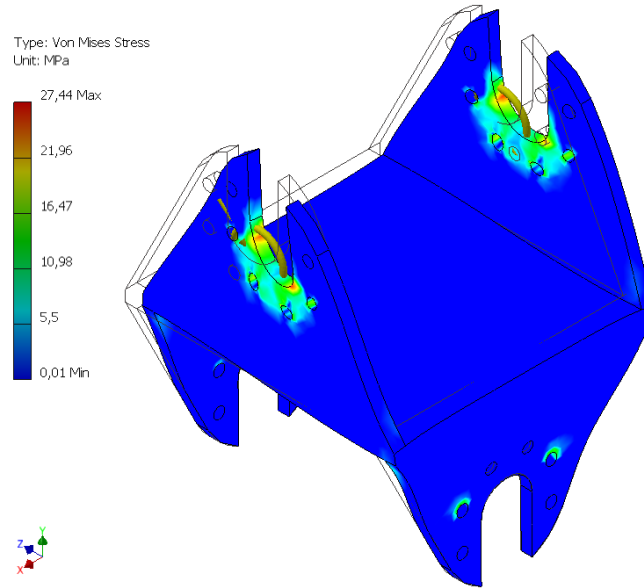


Figura 32– Tensões de Von Mises - Ankle

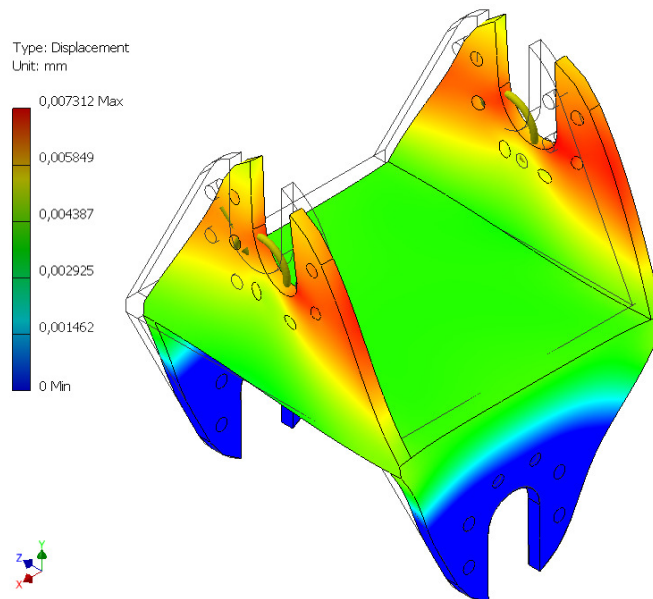


Figura 33 – Deformação - Ankle

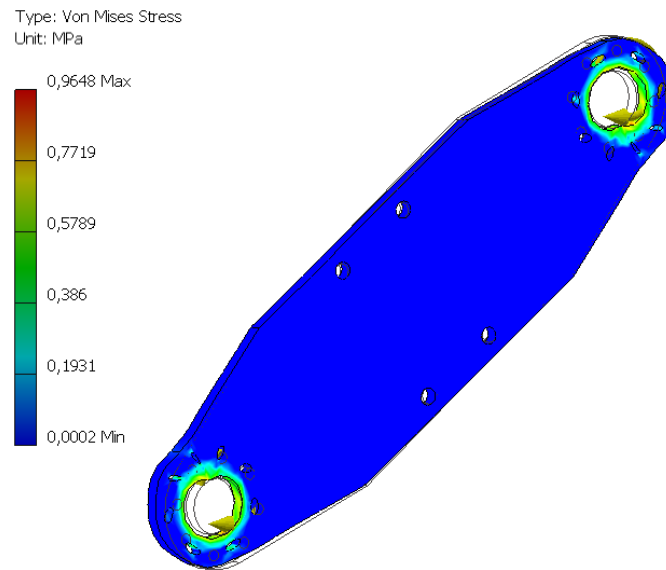


Figura 34 – Tensões de Von Mises - Thigh

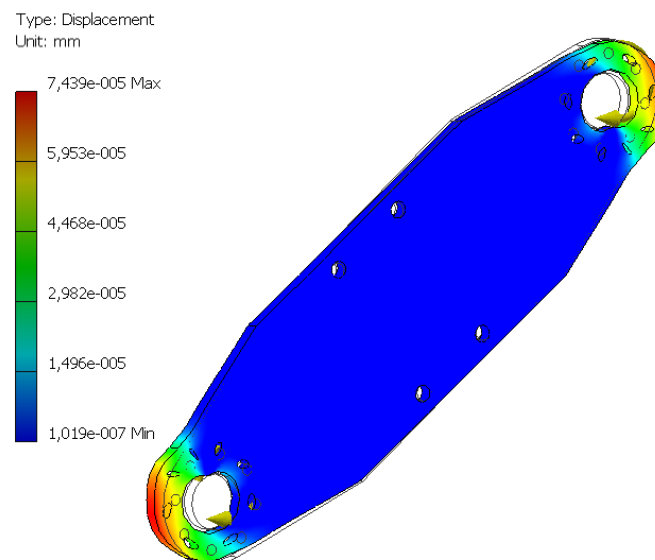


Figura 35 – Deformação - Thigh

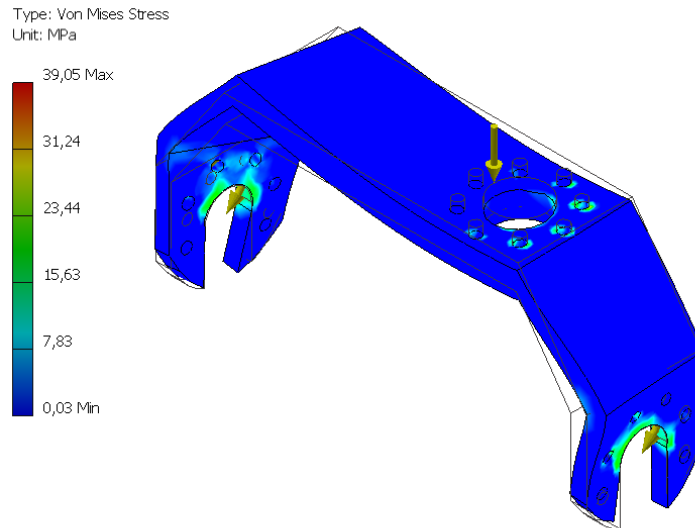


Figura 36 – Tensões de Von Mises – Hips

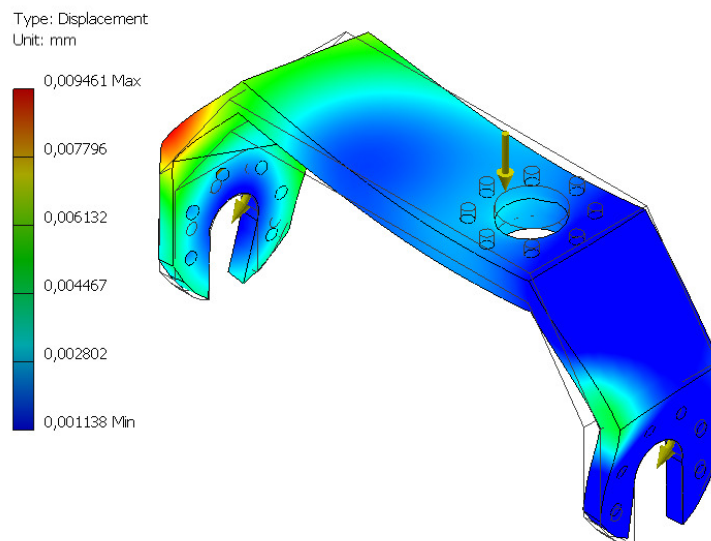


Figura 37 – Deformação – Hips

Nesta última figura é mostrado o resultado da análise de deformação do robô sob o efeito do peso de sua própria estrutura. Como dito anteriormente os deslocamentos podem parecer exagerados, mas sua real magnitude está na indicada na legenda da esquerda.

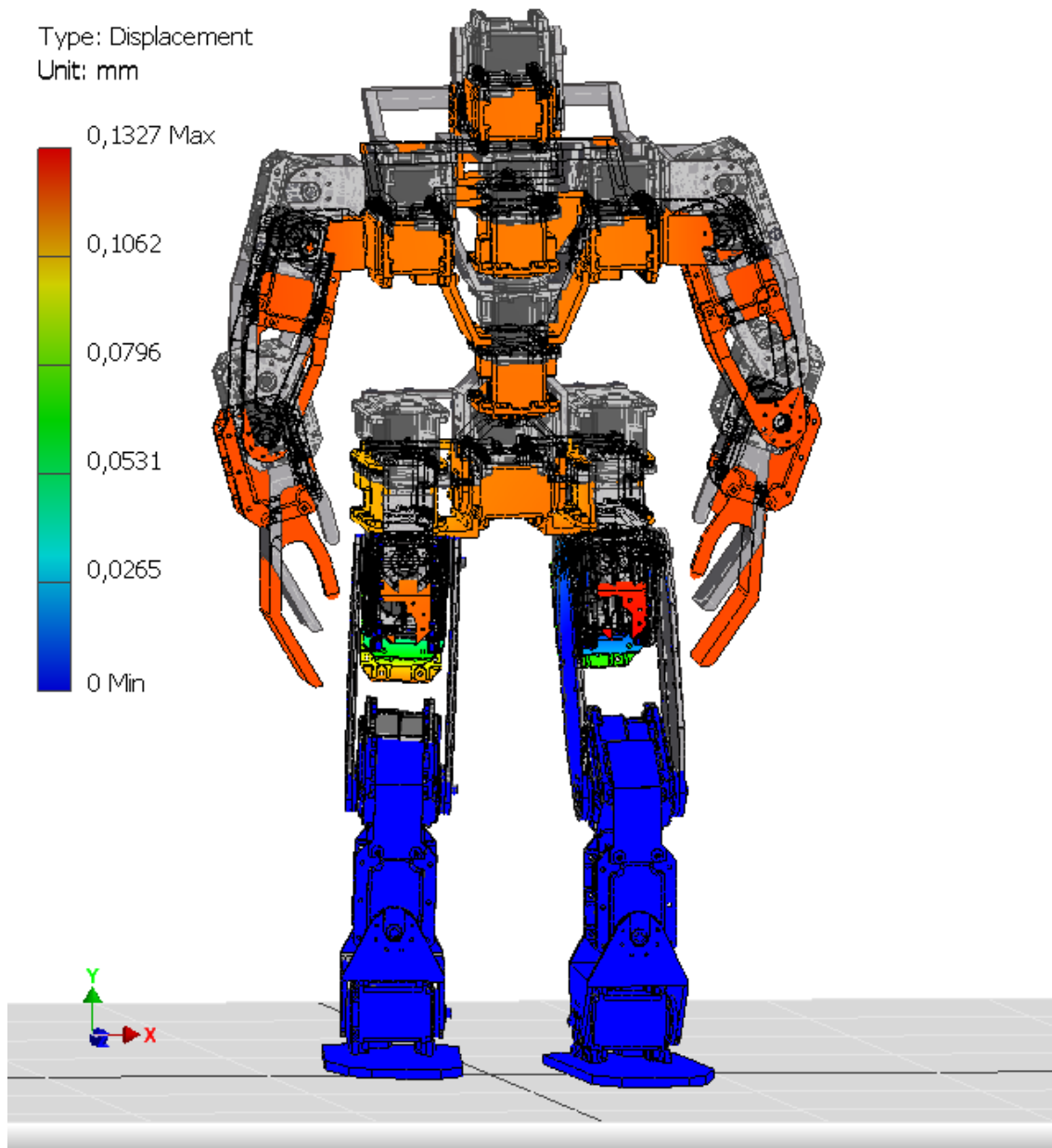


Figura 38 – Análise de deformação do modelo completo

## CAPÍTULO 8

### 8) Conclusão

Neste trabalho desenvolveu-se o projeto mecânico do robô possibilitando futuras pesquisas em locomoção bípede e visão embarcada, assim como a posterior construção de um robô apto a participar da *Humanoid League da Robocup* [2].

Contemplou-se como proposto, o desenvolvimento mecânico com principal atenção ao dimensionamento de motores, graus de liberdade e projeto estrutural, levando-se em consideração atender às limitações impostas no regulamento da categoria *Kid Size* [2] ao mesmo passo em que buscou-se atingir o máximo de mobilidade de movimentos do robô.

Não obstante, buscando conhecer ao menos suas implicações construtivas, pesquisou-se acerca da dinâmica e modelagem matemático de robôs bípedes, tendo como objetivo projetar uma estrutura que favorecesse posteriores trabalhos de controle, contudo, não abordou-se tais temas mais a fundo por se tratarem de assuntos de grande complexidade e que merecem a atenção de um trabalho de pesquisa exclusivo.

Por fim, constatou-se por meio das simulações, que apesar de esbeltas, as peças que compõem a estrutura apresentam boa resistência e poderiam ser ainda mais esguias, entretanto, optou-se por não reduzir as espessuras pois é conveniente que as peças tenham material para permitir ajustes na ocasião em que forem realizados testes com o protótipo.

## CAPÍTULO 9

### 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.

[3] – VUKOBRATOVIĆ ,MIOMIR; BOROVIAC, BRANISLAV; “**Zero-Moment Point — Thirty Five Years Of Its Life**”; International Journal of Humanoid Robotics;Vol. 1, No. 1 (2004) 157–173.

[4] – 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

[5] – Equipe de competições robóticas da FEI – RoboFEI . Disponível em:

<http://www.fei.edu.br/robo/default.htm>. Acesso em 2 de fevereiro de 2010.

[6] – ASIMO – Honda Motors. Disponível em:

<http://www.asimo.com.br/>. Acesso em 2 de fevereiro de 2010.

[7] – 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

[8] – NAO – Aldebaran Robotics. Disponível em:

<http://www.aldebaran-robotics.com/>

Acesso em 2 de fevereiro de 2010

[9] – NICHOLLS, ELLIOT; **“Bipedal Dynamic Walking in Robotics”**; Honours Thesis - The University of Western Australia; Department of Electrical and Electronic Engineering; October 26, 1998

[10] – SIEGWART, ROLAND; NOURBAKHS, ILLAH R; **“Introduction To Autonomous Mobile Robots”**; MIT Press, 2004 p24-27.

[11] – Dynamixel RX-28 User’s Manual; ROBOTIS CO.,LTD.

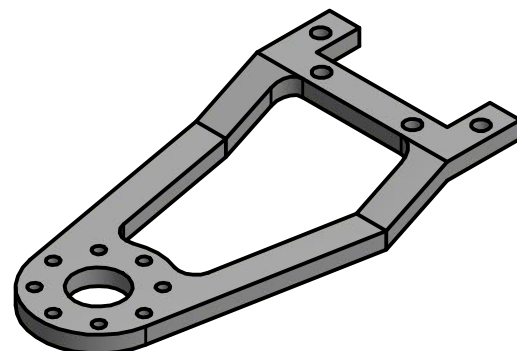
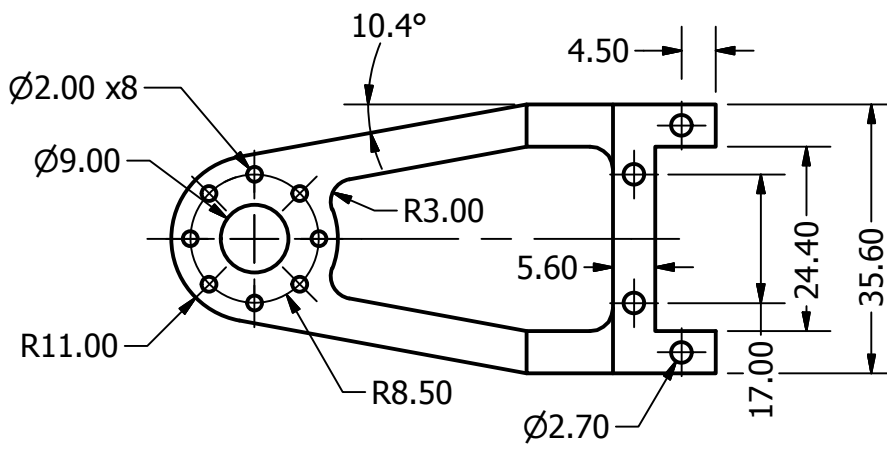
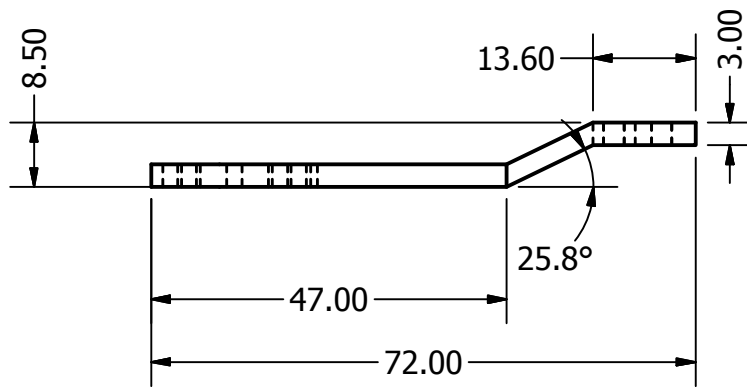
Disponível em: [www.robotis.com](http://www.robotis.com); Acesso em 5 de novembro de 2010

[12] – 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.

[13] – Nagibe M. dos Santos, Fernando A. Flandoli; **“Geometria Descritiva”**; São Bernardo do Campo [s. n.], 2008

[14] – Autodesk – Autodesk Inventor Professional 2011

Disponível em: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com); Acesso em 5 de novembro de 2010



Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide

Anexo 1 - Arm

Quantidade:

4

Responsável:

Milton Cortez

Material:

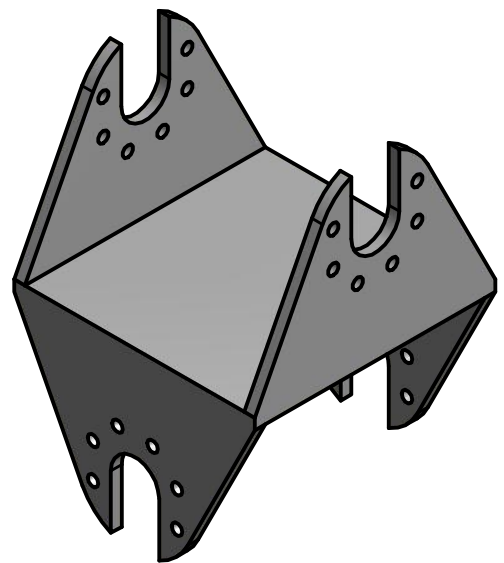
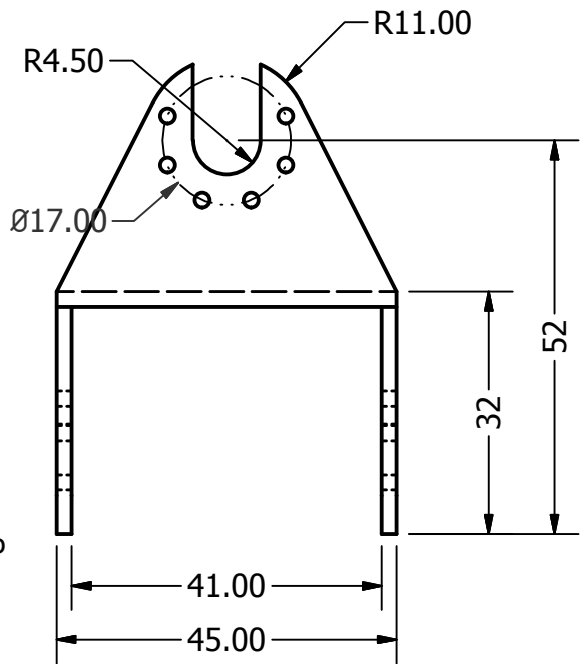
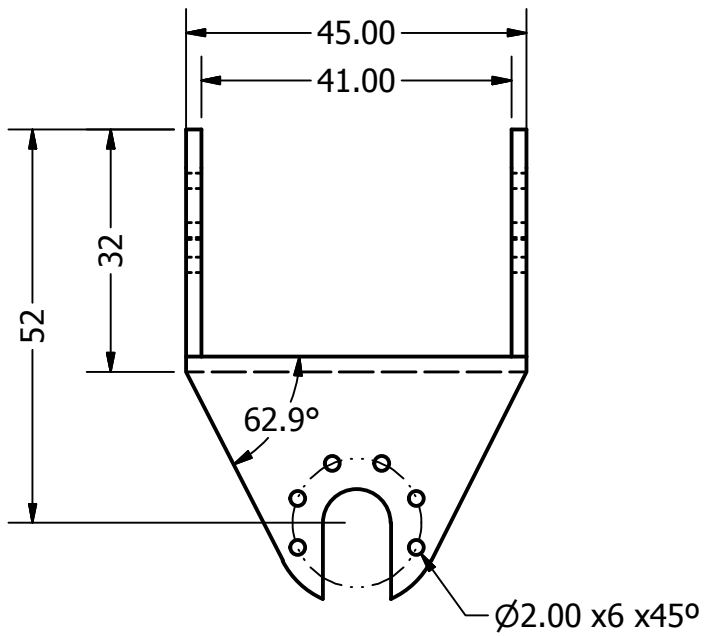
Alumínio

Escala:

1:1



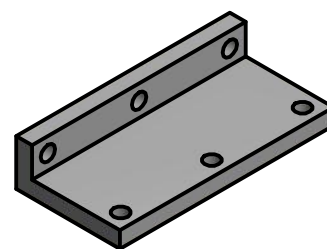
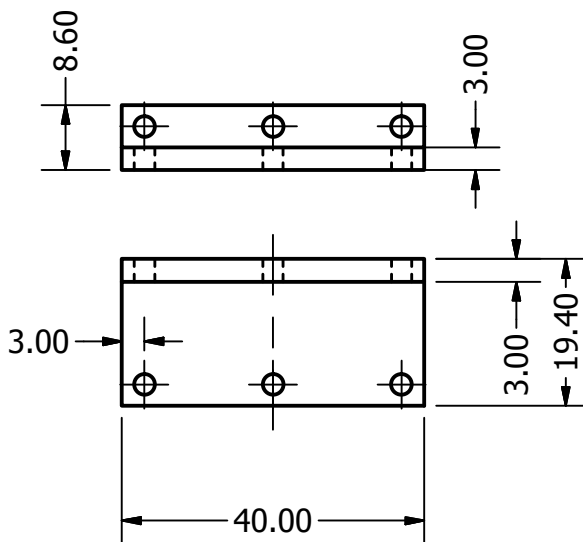




PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

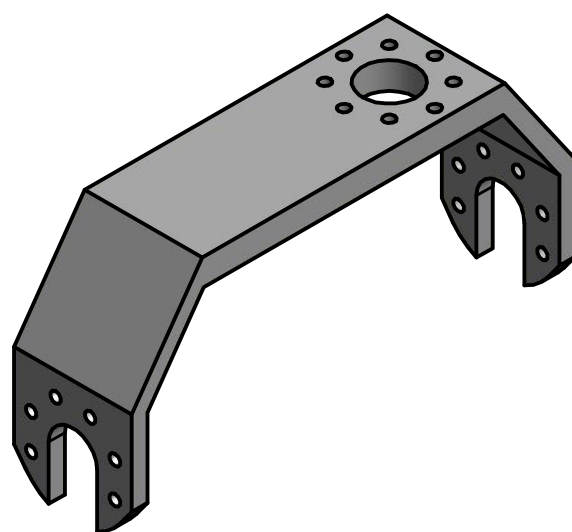
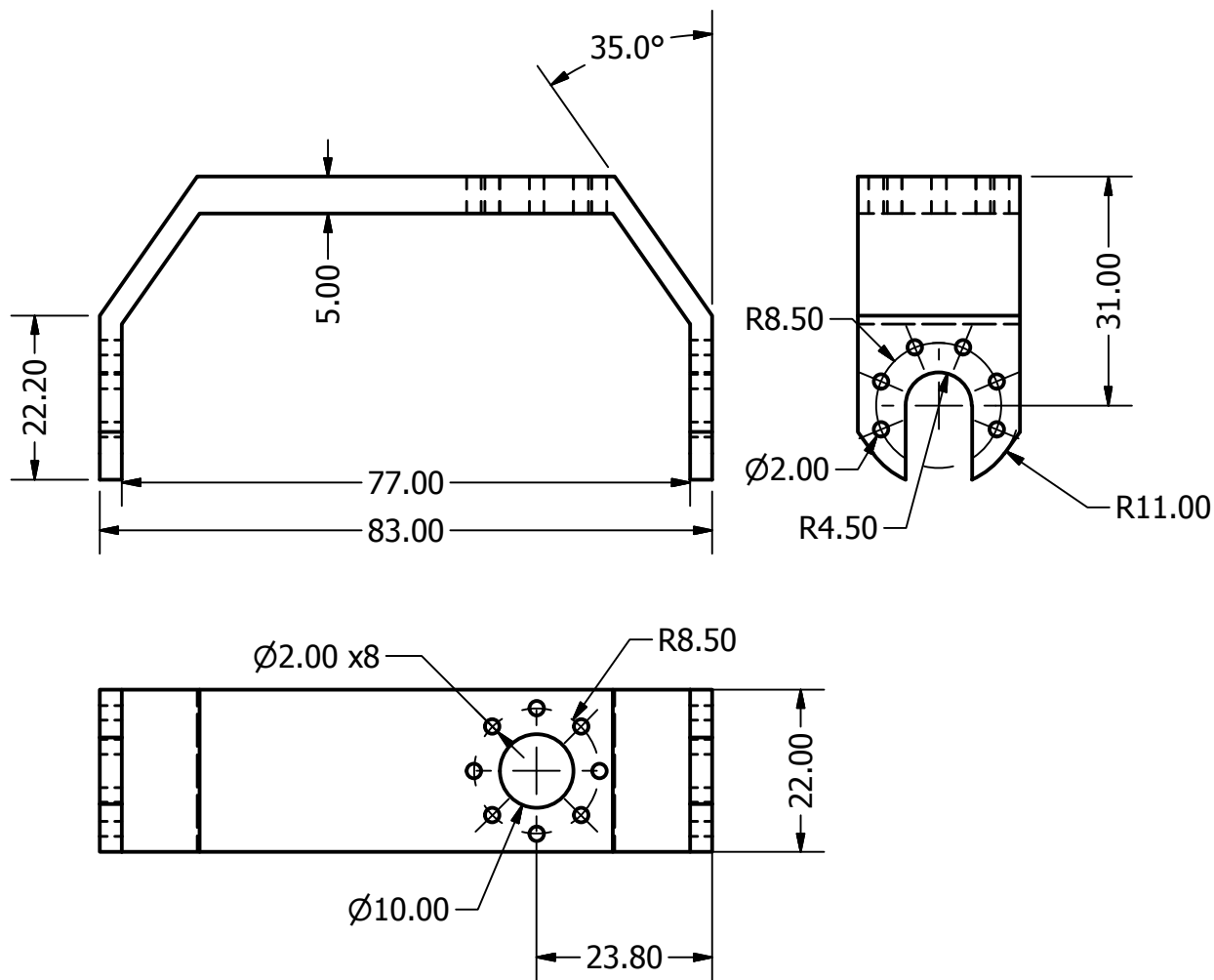
|  |   |             |   |         |
|--|---|-------------|---|---------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |             |  |         |
|  | Anexo 2 - Ankle   | Quantidade: |   | 2       |
|  | Responsável:  | Material:   |   | Escala: |
|  | Milton Cortez   | Alumínio    | 1:1   |         |



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

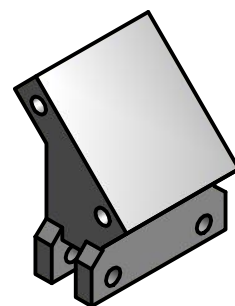
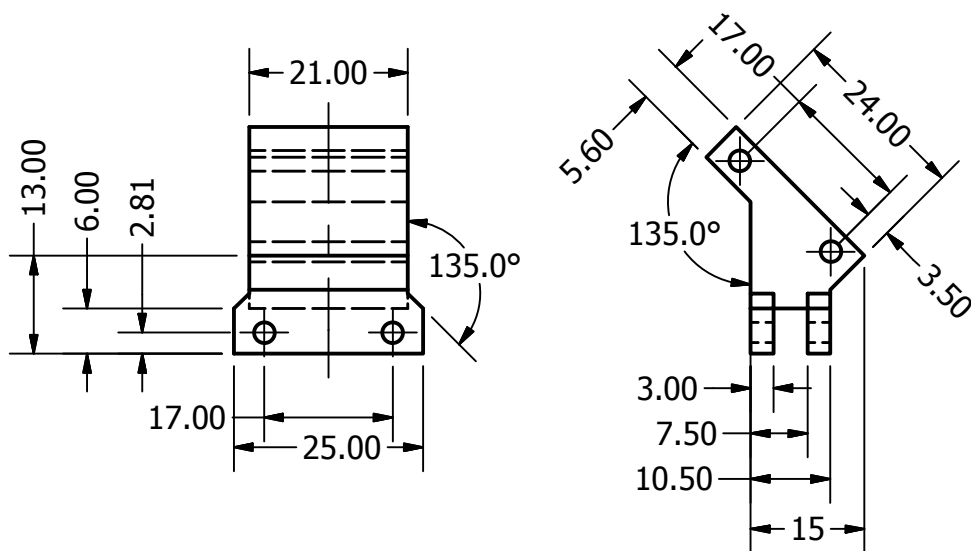
|  |   |                       |                  |   |
|--|---|-----------------------|------------------|---|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |                  |  |
|  | Anexo 3 - Groin   |                       | Quantidade:<br>2 |   |
|  | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio | Escala:<br>1:1   |   |





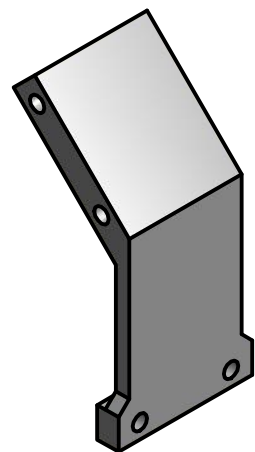
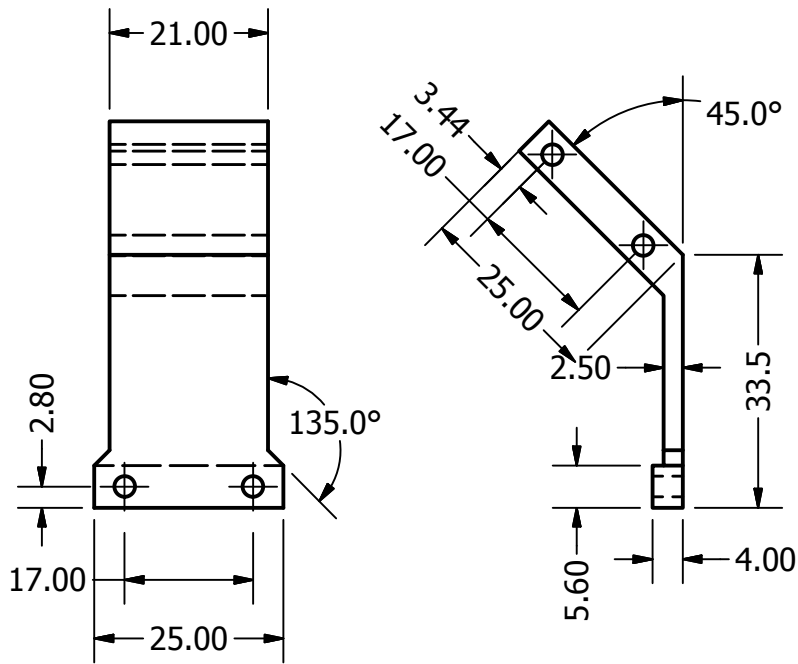
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

|  |   |             |   |         |
|--|---|-------------|---|---------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |             |  |         |
|  | Anexo 4 - Hips  | Quantidade: |   | 2       |
|  | Responsável:  | Material:   |   | Escala: |
|  | Milton Cortez   | Alumínio    |   |         |



|  |   |                       |   |                  |
|--|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|  | Anexo 5 - Knee back                                       |                       |   | Quantidade:<br>2 |
|  | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |



Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide

Anexo 6 - Knee Front

Quantidade:

2

Responsável:

Milton Cortez

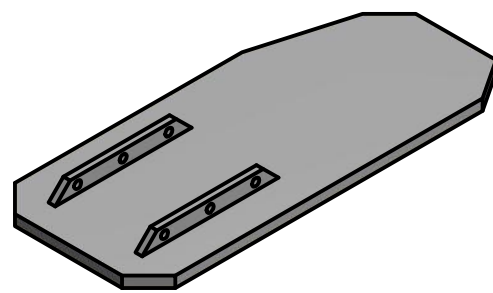
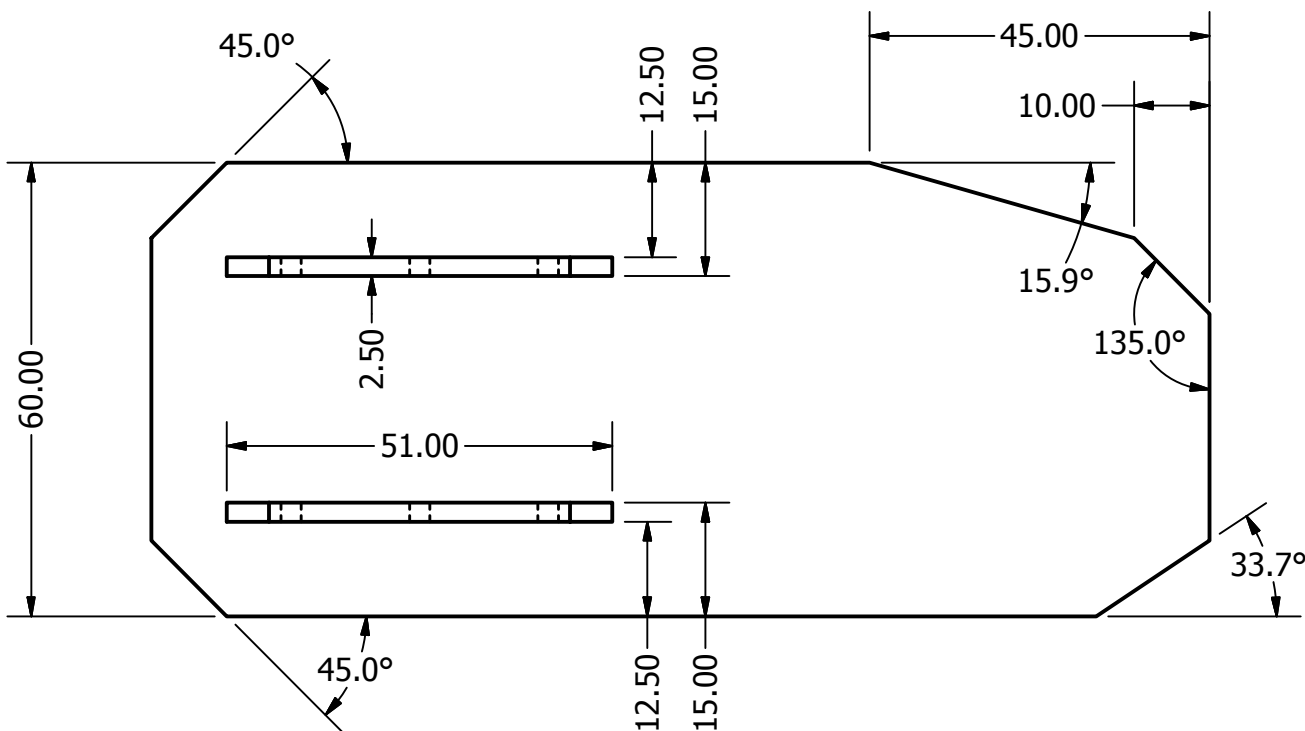
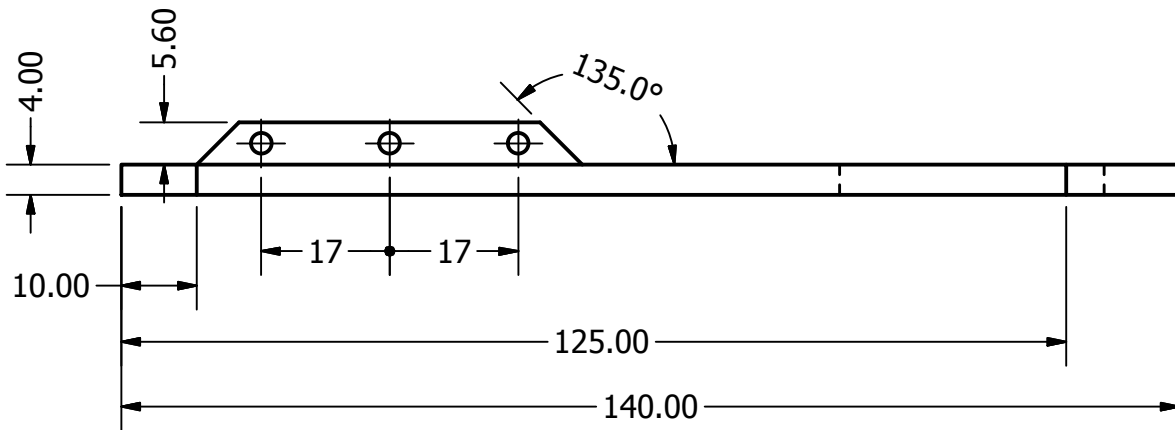
Material:

Alumínio

Escala:



1:1

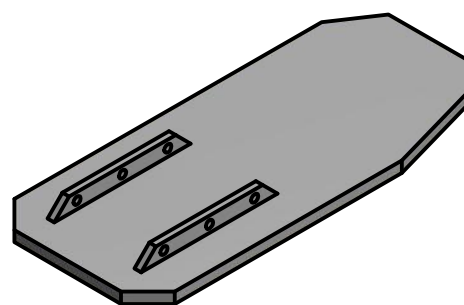
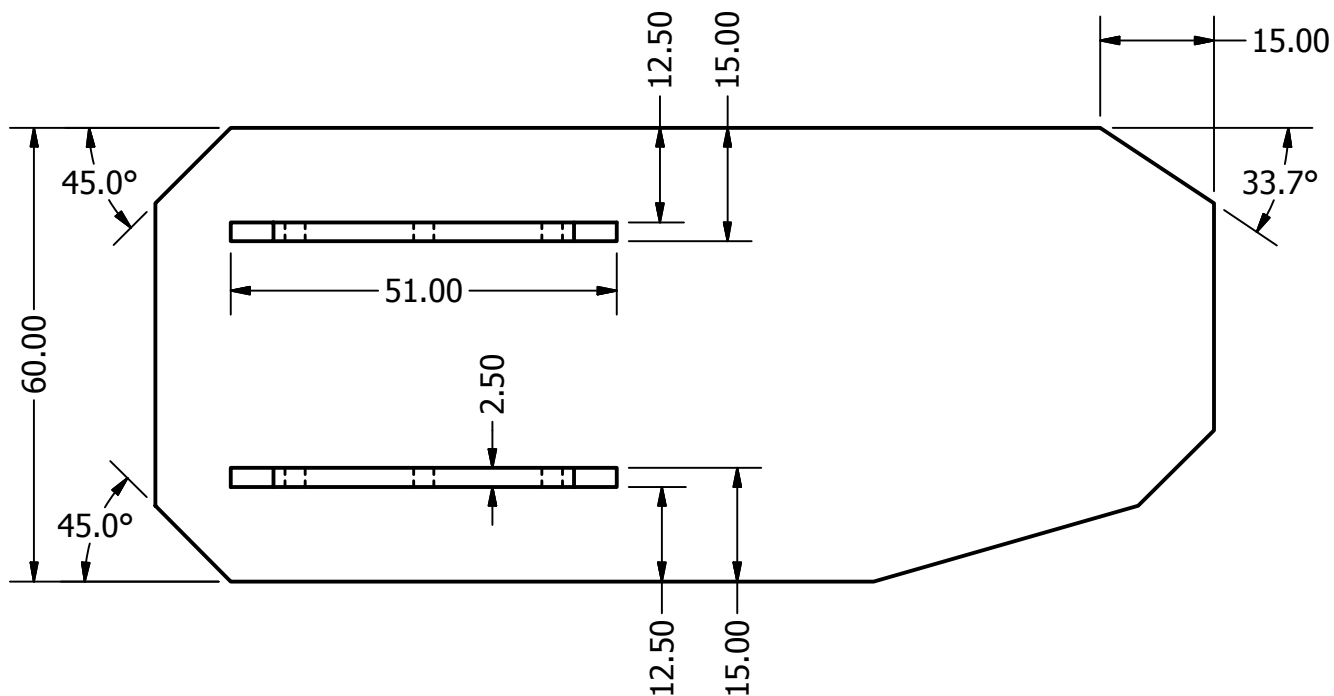
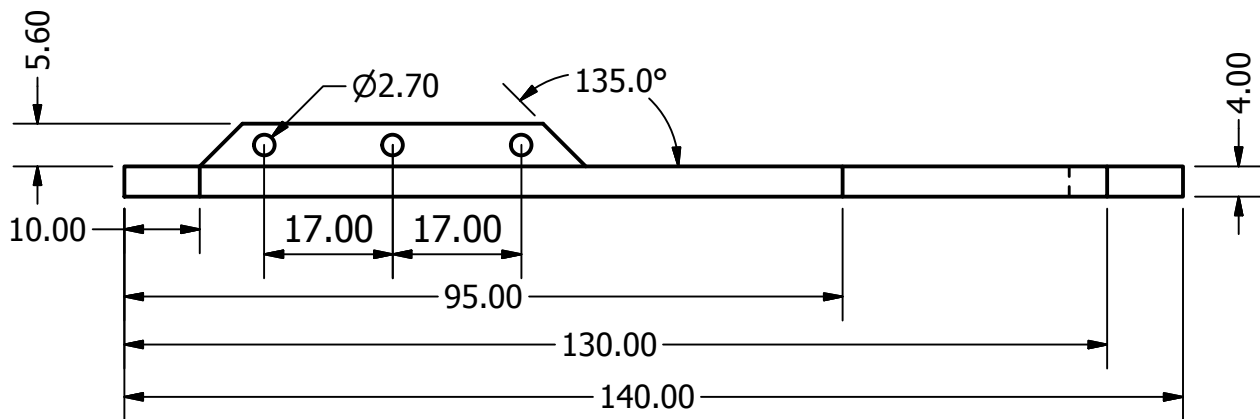




PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

|   |   |                       |   |                  |
|---|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|   | Anexo 7 - Left Foot                                       |                       |   | Quantidade:<br>2 |
|   | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |



Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide

Anexo 8 - Right Foot

Quantidade:

2

Responsável:

Milton Cortez

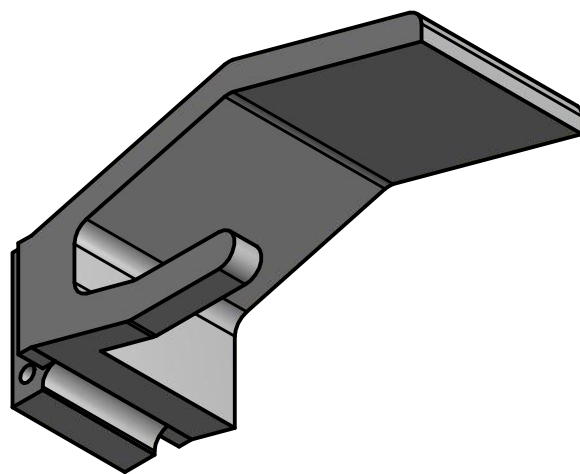
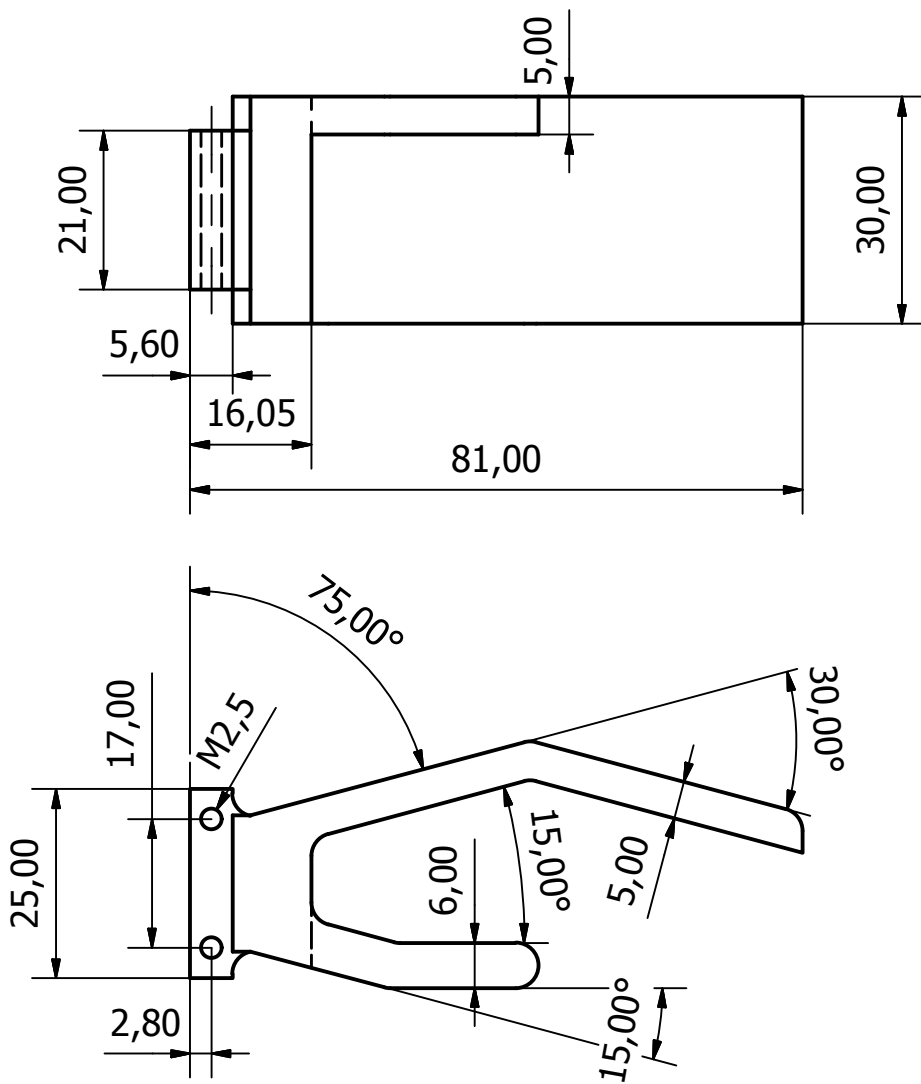
Material:



Alumínio

Escala:

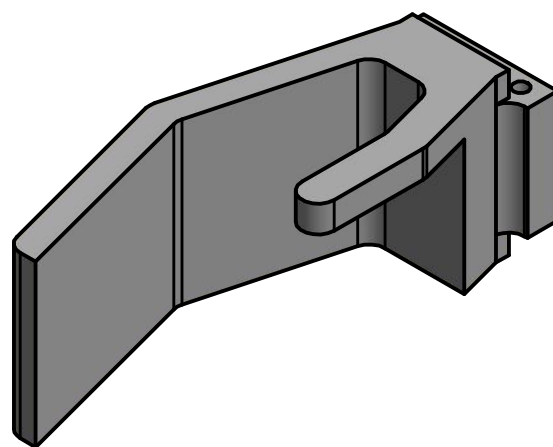
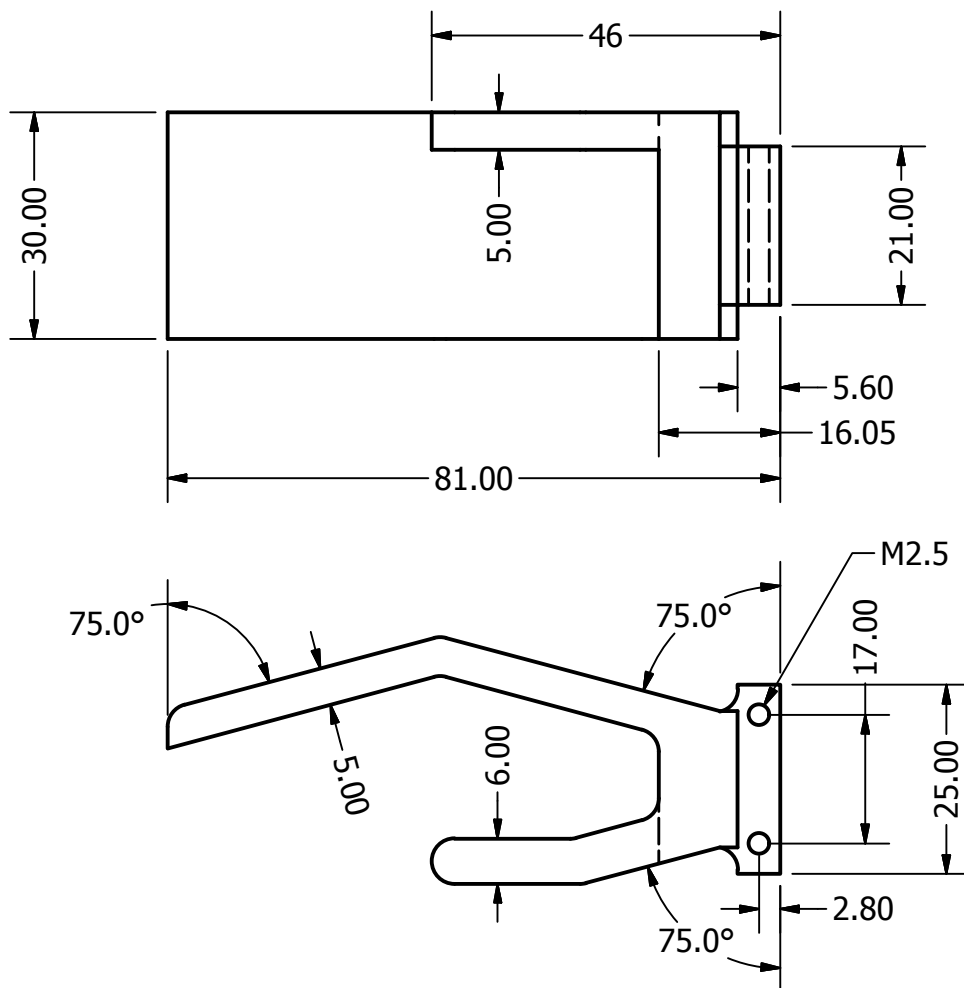
1:1





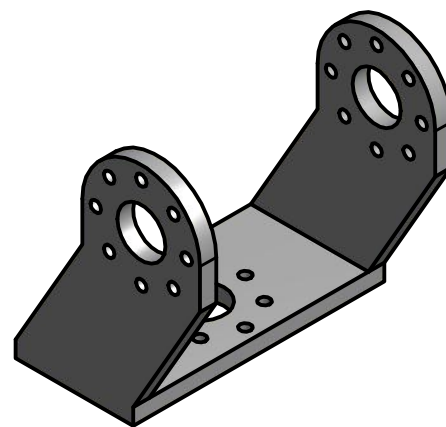
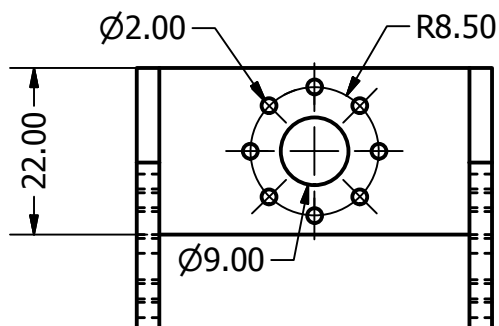
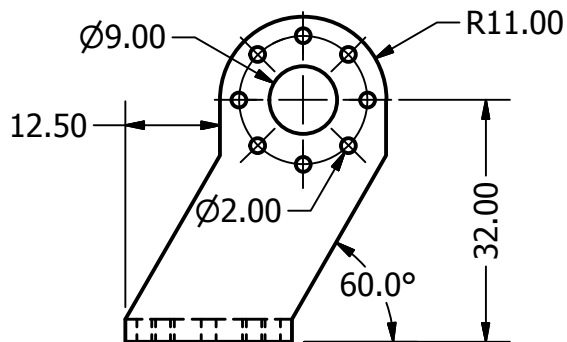
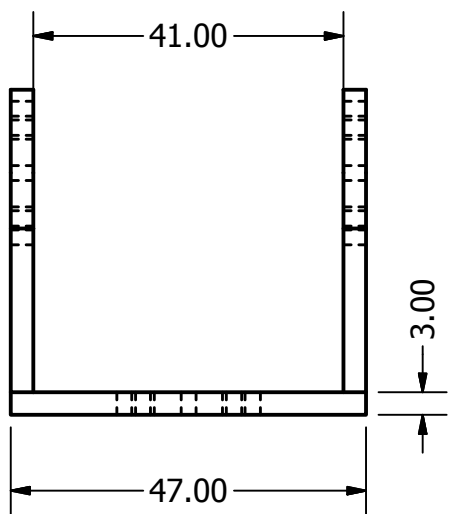


|   |   |                    |   |               |
|---|---|--------------------|---|---------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                    |  |               |
|   | Anexo 9 - Left Hand                                       |                    |   | Quantidade: 1 |
|   | Responsável: Milton Cortez                                | Material: Alumínio |   | Escala: 1:1   |







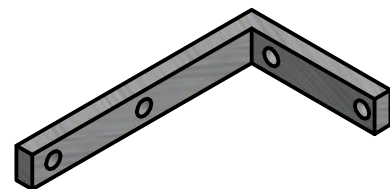
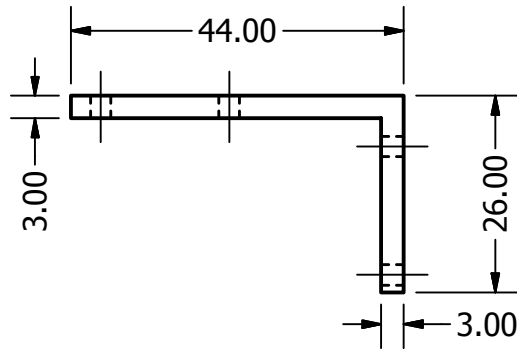
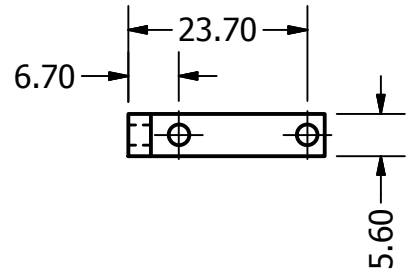
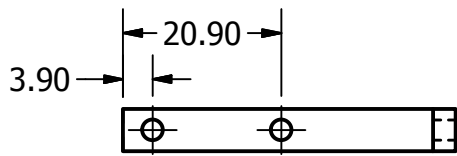
|   |   |                       |   |                  |
|---|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|   | Anexo 10 - Right Hand                                     |                       |   | Quantidade:<br>1 |
|   | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |



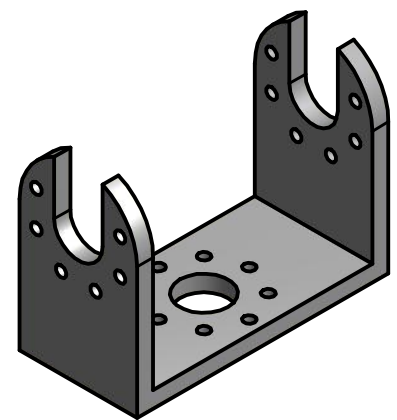
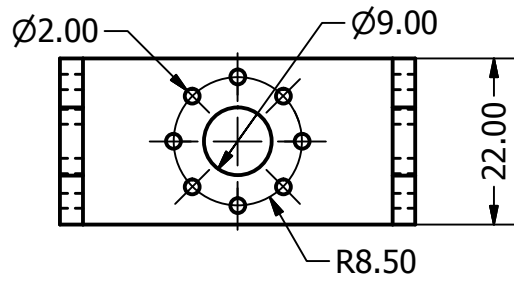
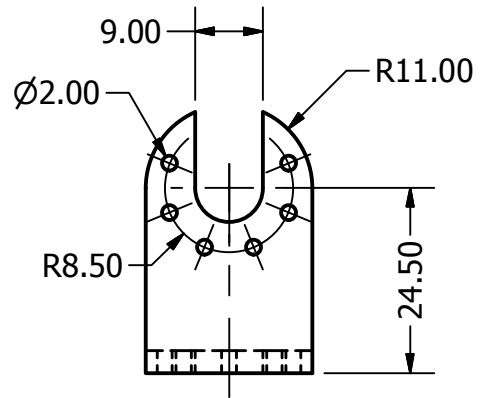
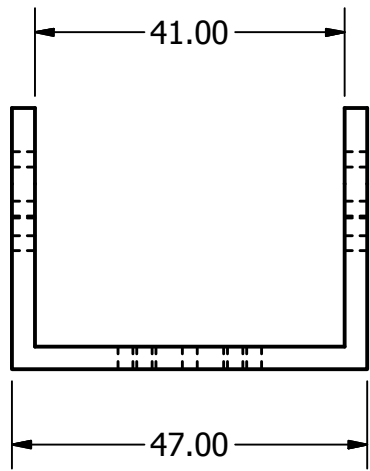
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

|  |   |                       |   |                  |
|--|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|  | Anexo 11 - Neck   |                       |   | Quantidade:<br>1 |
|  | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |





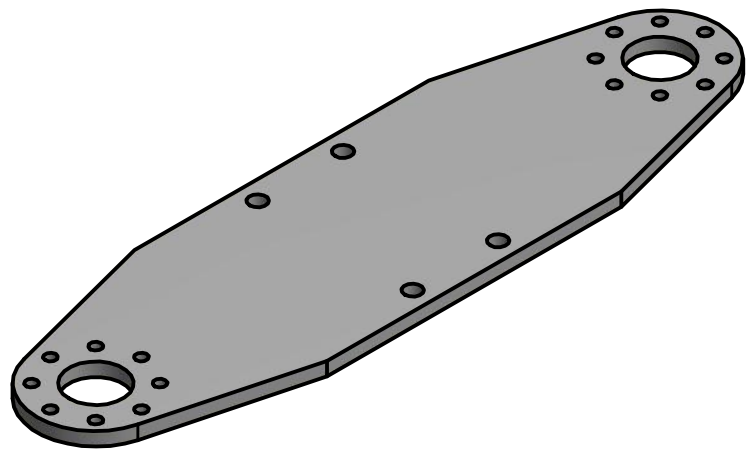
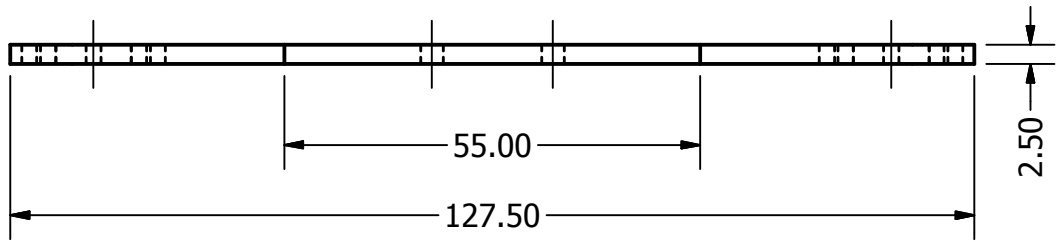
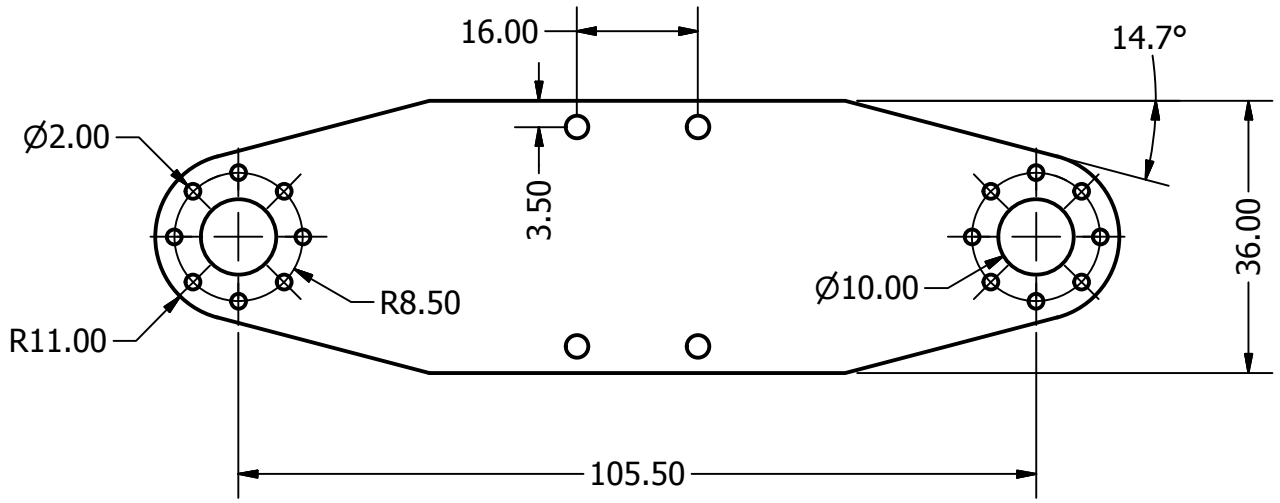
|   |                       |                  |   |
|---|-----------------------|------------------|---|
| Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |                  |  |
| Anexo 12 - Pelvis   |                       | Quantidade:<br>2 |   |
| Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio | Escala:<br>1:1   |   |



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

|  |   |                       |   |                  |
|--|---|-----------------------|---|------------------|
|  | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|  | Anexo 13 - Shoulder                                       |                       |   | Quantidade:<br>2 |
|  | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |



Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide

Anexo 14 - Thigh

Quantidade:

4

Responsável:

Milton Cortez

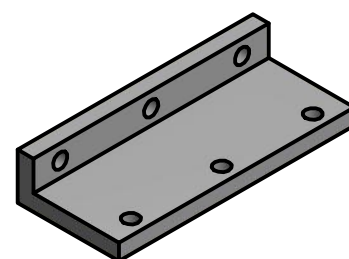
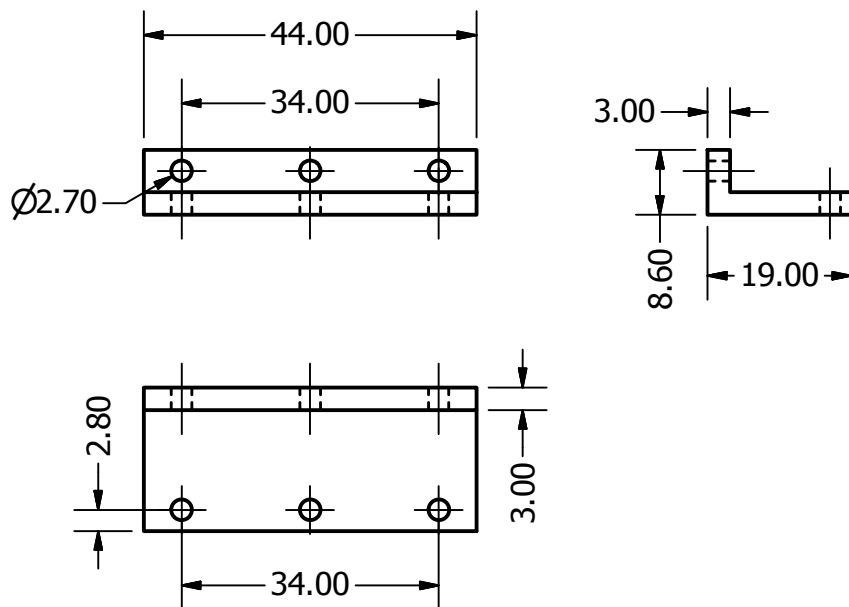
Material:



Alumínio

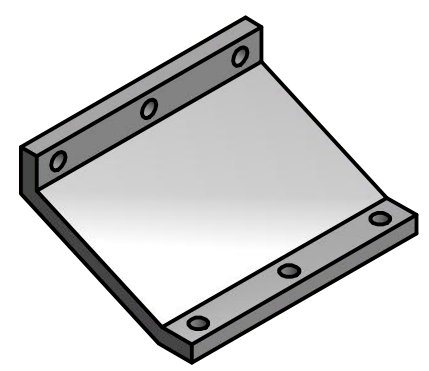
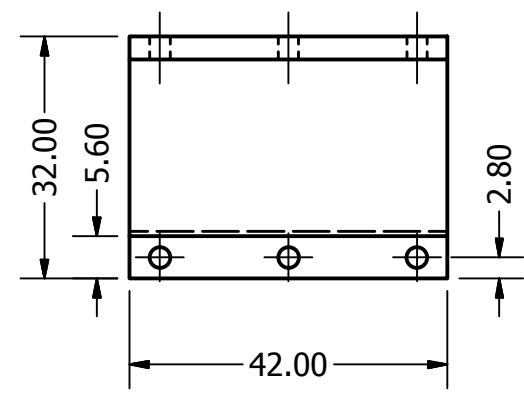
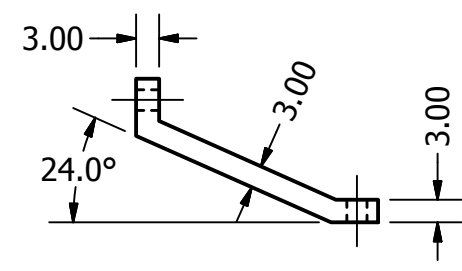
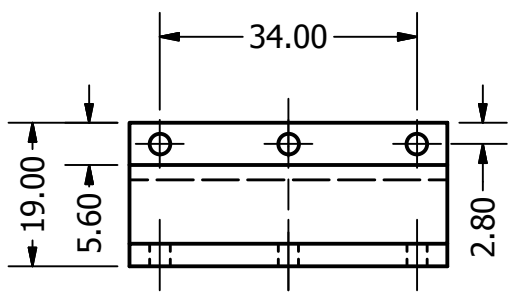
Escala:

1:1





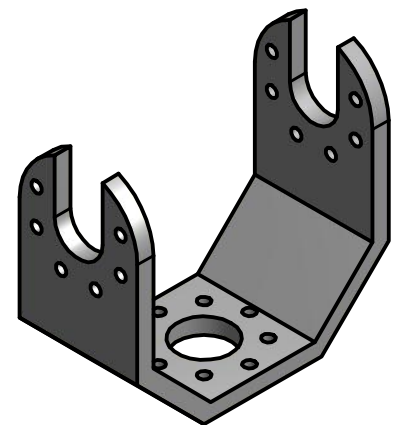
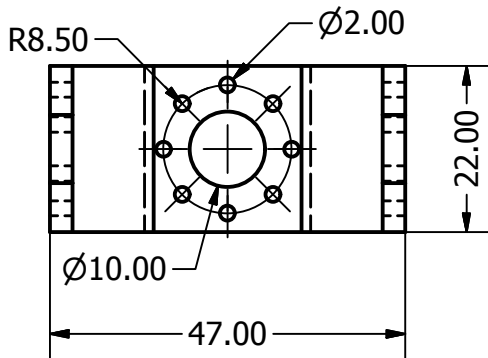
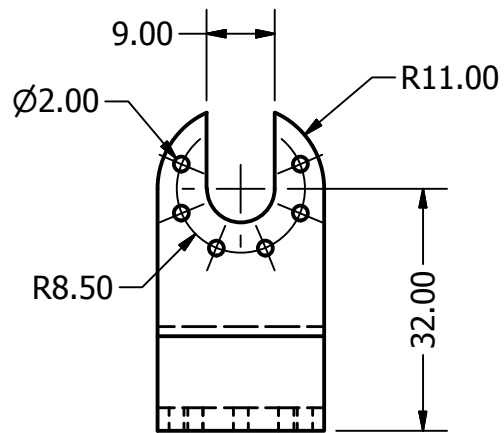
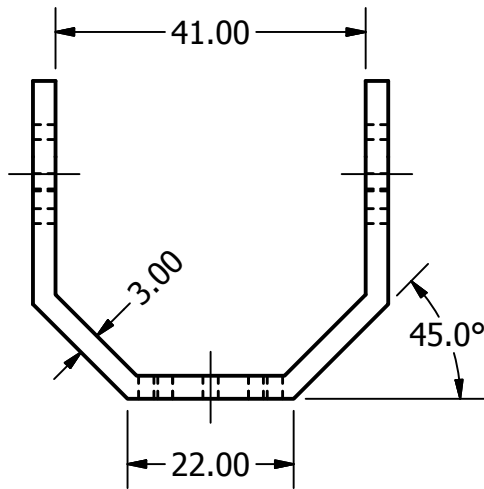
|  |   |                       |                  |   |
|--|---|-----------------------|------------------|---|
|  | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |                  |  |
|  | Anexo 15 - Trapezium                                      |                       | Quantidade:<br>2 |   |
|  | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio | Escala:<br>1:1   |   |





PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

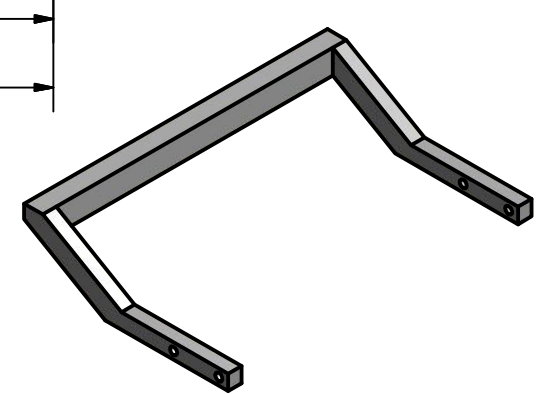
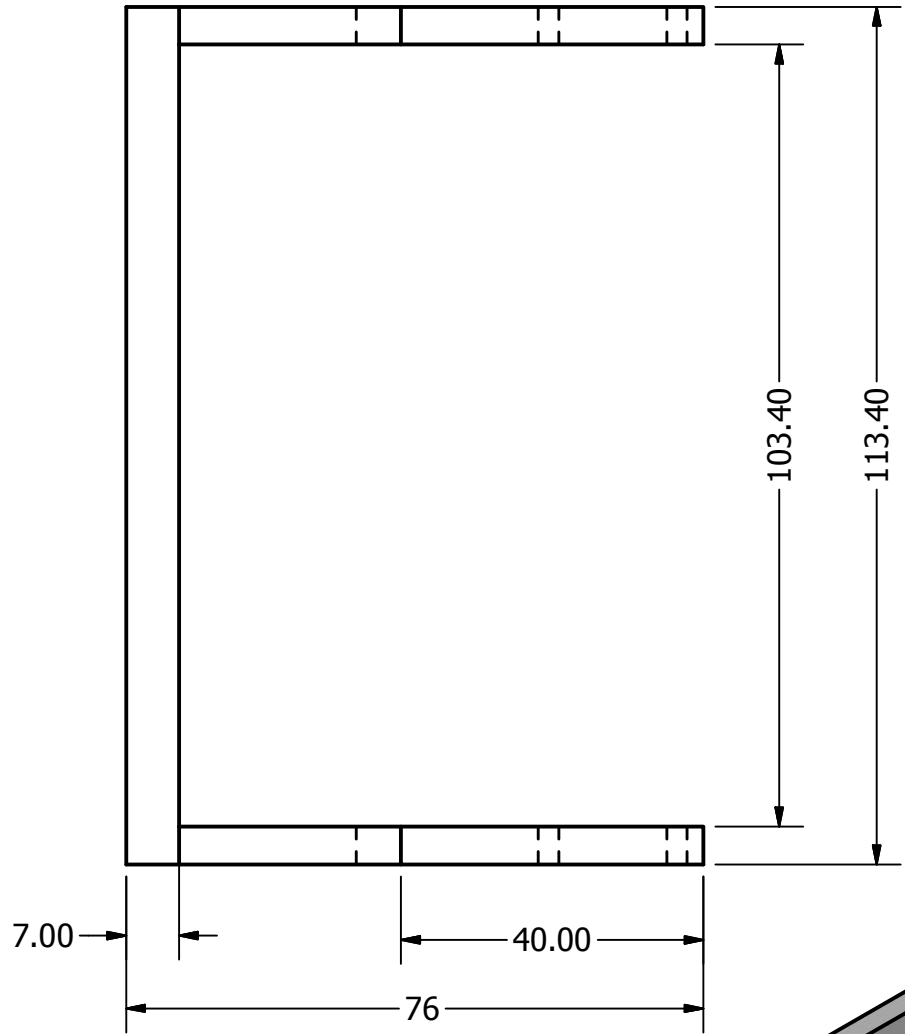
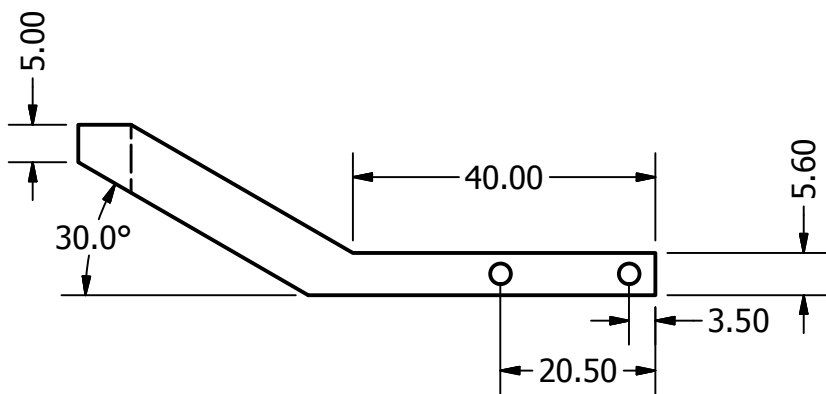
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

|   |   |                       |   |                  |
|---|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|   | Anexo 16 - Trunk  |                       |   | Quantidade:<br>2 |
|   | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |





|  |   |                       |   |                  |
|--|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|  | Anexo 17 - Waistline                                      |                       |   | Quantidade:<br>1 |
|  | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |





PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

|   |   |                       |   |                  |
|---|---|-----------------------|---|------------------|
|  <p>UniFEI<br/>Centro Universitário da FEI</p> | Projeto de Iniciação Científica - Mecânica Robô Humanóide |                       |  |                  |
|   | Anexo 18 - Alça   |                       |   | Quantidade:<br>1 |
|   | Responsável:<br>Milton Cortez                             | Material:<br>Alumínio |   | Escala:<br>1:1   |