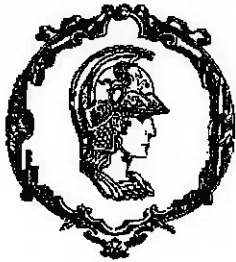


Nota: 10.0 (dez)

[Handwritten signature]



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto Mecânico e Construção de um Robô Bípede para a Reprodução da Marcha Humana Autônoma

Volume 1

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia
Mecânica

André Piñero Valle

Marcello Pagnotta

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Co-orientador: Dr. Luciano Luporini Menegaldo

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2002

FICHA CATALOGRÁFICA

Pagnotta, Marcello

Projeto mecânico e construção de um robô bípede para a reprodução da marcha humana autônoma – Vol. 1, por A. P. Valle e M. Pagnotta São Paulo: EPUSP, 2002.

45 P.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Robô Bípede 2. Marcha Humana 3. Robótica 4. Bioengenharia
5. Projeto Mecânico 6. Construção Mecânica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

Projeto Mecânico
Marcha
Robôs

Dedicamos este trabalho a todos que se
interessam pelo desenvolvimento de
conhecimento e tecnologia brasileiros

AGRADECIMENTOS

Por nos permitir dedicar com prioridade aos estudos, agradecemos sobretudo aos nossos pais e irmãos, fundamentais em nossas vidas.

Ao Vincent, Anderson e Christian, companheiros neste trabalho, que ajudaram a comprovar que em conjunto chega-se além.

Ao Luciano, nosso orientador, que nos abriu essa grandiosa oportunidade, conseguindo nos motivar a alcançar um difícil objetivo.

Ao Prof. Fleury, por conseguir sempre esclarecer e clarear os caminhos com sabedoria.

Não podemos deixar de agradecer a todos amigos, que ajudaram a manter nossos pensamentos abertos durante esses anos.

Ao grupo de desenvolvimento de caminhões pesados da DaimlerChrysler do Brasil e à Engenharia de Produto da ABB Óleo, Gás e Petroquímica, por nos mostrar a importância da engenharia brasileira e nos dar liberdade para desenvolver os trabalhos acadêmicos com tranquilidade.

RESUMO

O trabalho ora apresentado consiste no projeto e na construção dos membros inferiores de um robô bípede capaz de executar a marcha humana (tanto para pessoas normais como para portadoras de disfunções motoras) a um custo acessível, condizente aos recursos disponíveis à sua realização. A primeira parte do projeto inicia com um breve estudo da marcha humana e dos membros inferiores do corpo humano, de forma a proporcionar seu entendimento e sua simplificação. Assim são apresentadas a concepção e escolha dos diferentes mecanismos utilizados para as juntas do corpo. Em seguida, o modelo cinemático para o mecanismo escolhido é desenvolvido. Na segunda parte deste projeto, é feita a seleção de materiais e componentes para a estrutura corporal e para as juntas do robô. Por fim, são feitos os desenhos de conjunto e de montagem para se iniciar a construção do robô.

ABSTRACT

This project consists on the design and construction of a biped robot's lower limbs able to execute the human gait (either normal person's gait or anomalous owner's gait) with a low cost, accessible to the available budget for its creation. The first part of the project starts with a brief human gait and lower limbs of the human body research in order to get its understanding and simplifying. Then, the conception and choice of the different mechanisms used for the body links are showed. After that, the kinematics model for the chosen link is developed. In the second part of this project, it is made the material and components selection for the body structure and its joints. Finally, the building and assembly drawings are done in order to start de robot construction.

SUMÁRIO DO VOLUME I

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	ESTUDO BIBLIOGRÁFICO	2
3	DESCRIÇÃO GERAL DO PROJETO	4
4	DESCRIÇÃO DO PROJETO: JUNTA DO TORNOZELO	8
4.1	Mecanismos estudados.....	9
4.1.1	<i>Mecanismo composto de uma biela-manivela e uma engrenagem.....</i>	<i>9</i>
4.1.2	<i>Mecanismo composto de duas biela-manivelas</i>	<i>11</i>
4.1.3	<i>Mecanismo composto por parafuso de movimento.....</i>	<i>13</i>
4.2	Escolha do mecanismo.....	13
4.3	Modelagem do Mecanismo.....	15
4.3.1	<i>Definição das Equações do Sistema.....</i>	<i>17</i>
4.3.2	<i>Resolução do Sistema de Equações.....</i>	<i>21</i>
4.3.3	<i>Determinação dos ângulos reais da marcha humana</i>	<i>28</i>
5	PROJETO DO MECANISMO	33
6	CONCLUSÃO E DISCUSSÕES.....	37
7	BIBLIOGRAFIA	38
	Anexo I.....	39
	Anexo II.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planos do corpo humano: Frontal, Sagital, Transversal.....	2
Figura 2 - Etapas da marcha humana.....	5
Figura 3 - Posições da perna esquerda no plano sagital.....	5
Figura 4 - Dimensões relativas do corpo humano	7
Figura 5 - Mecanismo com uma biela-manivela e engrenagem de corrente	10
Figura 6 - Vista lateral	10
Figura 7 – Detalhe das engrenagens e corrente	11
Figura 8 - Mecanismo com duas biela-manivelas.....	12
Figura 9 – Vista por trás.....	13
Figura 10 - Planos de rotação.....	14
Figura 11 – Sistema de coordenadas.....	16
Figura 12 - Vetores que compõem o sistema analisado.....	17
Figura 13 – Mecanismo no MatLab.....	21
Figura 14 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em um mesmo sentido...	25
Figura 15 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em um mesmo sentido...	26
Figura 16 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em sentidos diferentes...	27
Figura 17 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em sentidos diferentes...	28
Figura 18 – Flexão plantar/dorsal do pé direito	29
Figura 19 - Flexão plantar/dorsal do pé esquerdo.....	29
Figura 20 - Inversão/eversão do pé esquerdo	30
Figura 21 – Inversão/eversão do pé esquerdo.....	30
Figura 22 – Flexão/extensão da perna	31

Figura 23 – Abdução/adução da perna.....	31
Figura 24 - Software desenvolvido pela Frente Elétrica.....	32
Figura 25 - Desenho de conjunto do tornozelo	33
Figura 26 – Vista lateral do tornozelo.....	34
Figura 27 – Vista traseira do tornozelo.....	34
Figura 28 – Desenho de montagem do tornozelo	35
Figura 29 – Conjunto do tornozelo	36
Figura 30 – Protótipo do tornozelo.....	36
Figura 31 – Protótipo e desenho do conjunto completo.....	36

1 INTRODUÇÃO

Os objetivos deste trabalho são o projeto e a construção das juntas do tornozelo, pélvis e joelho de um robô bípede e conseqüente construção deste robô, cujas características dimensionais se assemelham às do corpo humano, capaz de caminhar com um padrão de marcha tão próxima quanto possível da normalmente observada em pessoas normais e em portadores de disfunções motoras.

Uma vez construído, o protótipo este pode ser aplicado no estudo clínico da marcha humana e na reprodução de padrões de marcha patológica, podendo ser utilizado também em testes de próteses.

Faz-se necessário levantar que o ponto forte deste trabalho é o desafio de construir um robô bípede para a simulação da marcha humana a um baixo custo, utilizando dispositivos simples (uma biela-manivela) e materiais de baixíssimo custo como servos de aeromodelismo, para a geração dos movimentos desejados, e perfis de alumínio, utilizadas na parte estrutural.

A principal motivação da escolha deste tema para o Projeto de Formatura deve-se à aplicação das diversas disciplinas estudadas ao longo do curso de Engenharia Mecânica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como o projeto de mecanismos, a fabricação dos mesmos, a modelagem cinemática e dinâmica e o projeto de um sistema de controle para o protótipo (a modelagem dinâmica e o projeto do sistema de controle estão sendo desenvolvidos simultaneamente por alunos do curso de Engenharia Elétrica, em um Projeto de Formatura). Trata-se, portanto, de um projeto que integra as várias áreas de atuação para um engenheiro mecânico.

Há uma descrição dos estudos bibliográficos realizados e uma apresentação geral do projeto, a fim de contextualizar o tema abordado por este trabalho. A seguir, entra-se nos detalhes das atividades desenvolvidas.

2 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

A bibliografia estudada e apresentada no item 5 é composta essencialmente por artigos retirados pela internet através de periódicos encontrados em bibliotecas “virtuais” ^{[1] - [6]}. Todas essas referências apresentam diversos modos de análises cinemática e dinâmica e de controle de um robô bípede, como por exemplo, através do ZMP (ponto de momento zero ^[6]) ou da trajetória do tornozelo e da bacia ^[2].

O artigo do periódico da ASME ^[7], a pesar de apresentar um robô bípede com uma estrutura diferente a de um ser humano (o joelho é modelado por uma junta de um grau de liberdade prismático, ou seja, que transmite uma translação que permite encurtar ou alongar a perna, enquanto que o normal seria uma junta de um grau de liberdade de revolução, permitindo a flexão e extensão do joelho), ele apresenta um modelo do robô no plano frontal, enquanto que os outros artigos se limitam apenas em desenvolver o modelo no plano sagital.

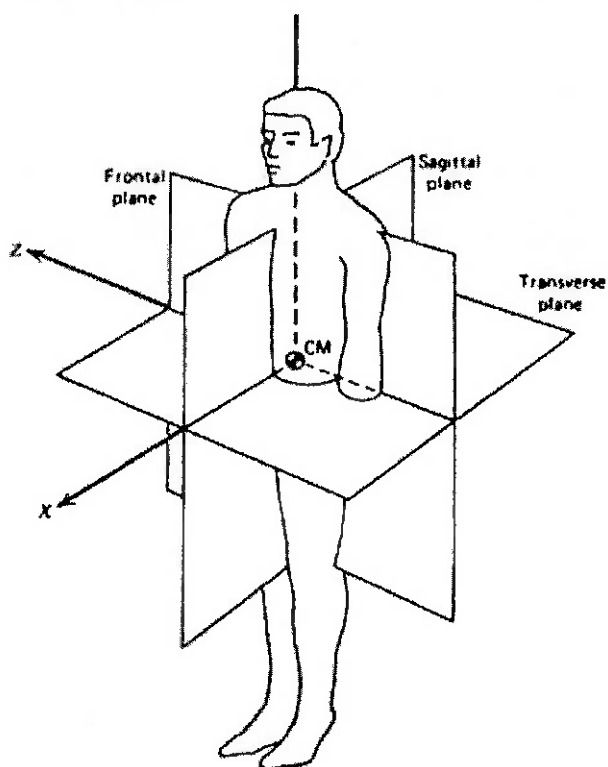


Figura 1 - Planos do corpo humano: Frontal, Sagital, Transversal

Os mecanismos das juntas que serão elaborados durante o projeto (apresentados posteriormente) foram inspirados de mecanismos estudados no livro [8] e no artigo [4] levando em consideração a praticidade, a eficiência, o tamanho e número de graus de liberdade de cada um deles.

Toda a teoria de modelagem, tanto cinemática quanto dinâmica, está apresentada na referência [10], onde também está desenvolvida toda a teoria de controle de robôs.

O estudo bibliográfico foi muito importante na fundamentação teórica do problema, na geração de soluções e na modelagem do problema. A partir deste estudo foi possível dimensionar o robô considerando as dimensões médias de um ser humano conforme explicitadas na referência [9] e ainda melhorar mecanismos já propostos, adaptando-os à realidade deste problema.

3 DESCRIÇÃO GERAL DO PROJETO

Como forma de atingir o objetivo proposto, a construção de um robô bípede, considerando projeto, montagem, modelagem e controle, foi realizada uma divisão de trabalho. Esta divisão fez-se necessária devido à complexidade do assunto abordado, e está composta em três frentes de trabalho:

- **Frente Mecânica:** desenvolvida nos trabalhos de formatura dos alunos de mecânica, os quais ficaram responsáveis pelo projeto e modelagens do robô, das juntas da bacia, do joelho e tornozelo, bem como pela sua montagem, o que exige o projeto das pernas, pés e pélvis.
- **Frente Elétrica:** desenvolvida nos trabalhos de formatura dos alunos de elétrica, os quais ficaram responsáveis por todo o projeto do controle.
- **Frente Mecatrônica:** desenvolvida por um aluno de mestrado, o qual ficou responsável pela modelagem geral do robô (em parceria com o grupo da Frente Mecânica), auxílio e integração dos resultados das outras duas frentes.

Aprofundando-se mais nos trabalhos da Frente Mecânica, especificamente modelagem e no projeto das juntas da pélvis, do joelho e tornozelo, temos como especificado anteriormente, que o robô bípede tem como principal função de simular a marcha tanto de pessoas normais como de pessoas portadoras de deficiências.

As etapas da marcha humana podem ser observadas nas figuras abaixo:

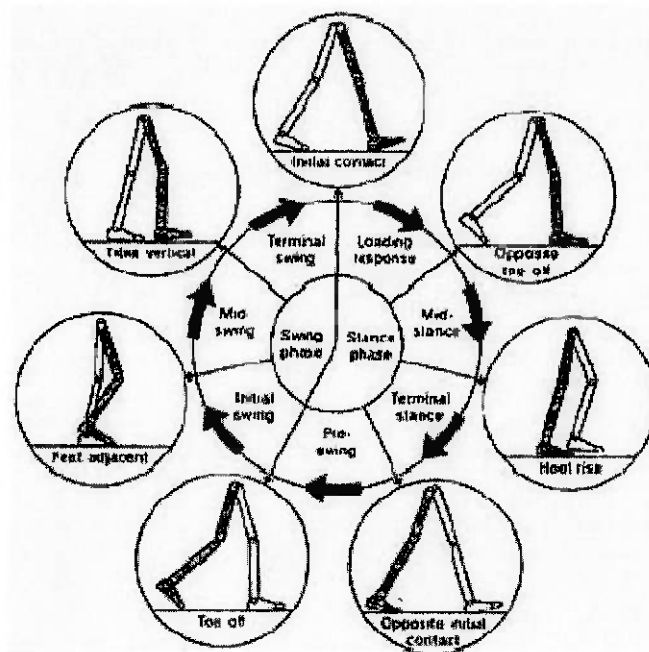


Figura 2 - Etapas da marcha humana

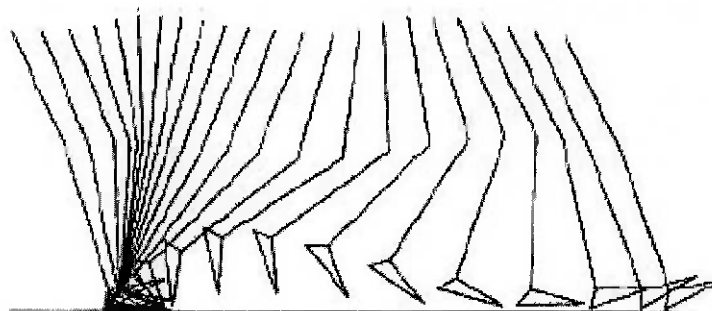


Figura 3 - Posições da perna esquerda no plano sagital

Portanto, apenas os membros inferiores do corpo serão desenvolvidos e constituirão o robô. Assim, o robô se resume a pés, pernas, coxas e quadril, que tem como finalidade estabilizar e equilibrar o sistema, sendo tornozelos, joelhos e pélvis as articulações entre cada membro. Para efeito de modelagem, estes são representados por barras interligadas através de juntas (descritas posteriormente) correspondentes às respectivas articulações.

Portanto, de acordo com modelo a ser apresentado, o robô bípede terá no mínimo 10 graus de liberdade e no máximo 13 graus, segundo a tabela abaixo:

Tabela 1 - Descrição das juntas

Juntas	Quantidade	Movimentos	Graus de liberdade
pélvis	2	adução/abdução, flexão/extensão e/ou rotação da perna	3 ou 2
joelho	2	flexão/extensão	1
tornozelo	2	inversão/eversão e flexão dorsal e plantar do pé	2
bacia	1	Inclinação do tronco no plano frontal e/ou sagital	2, 1 ou 0

Como exigência de projeto o protótipo deve ser construído considerando as dimensões reais de um ser humano, portanto os comprimentos de cada membro podem ser respeitados conforme figura abaixo, na qual todas as distâncias do corpo são relacionadas com a altura total do corpo

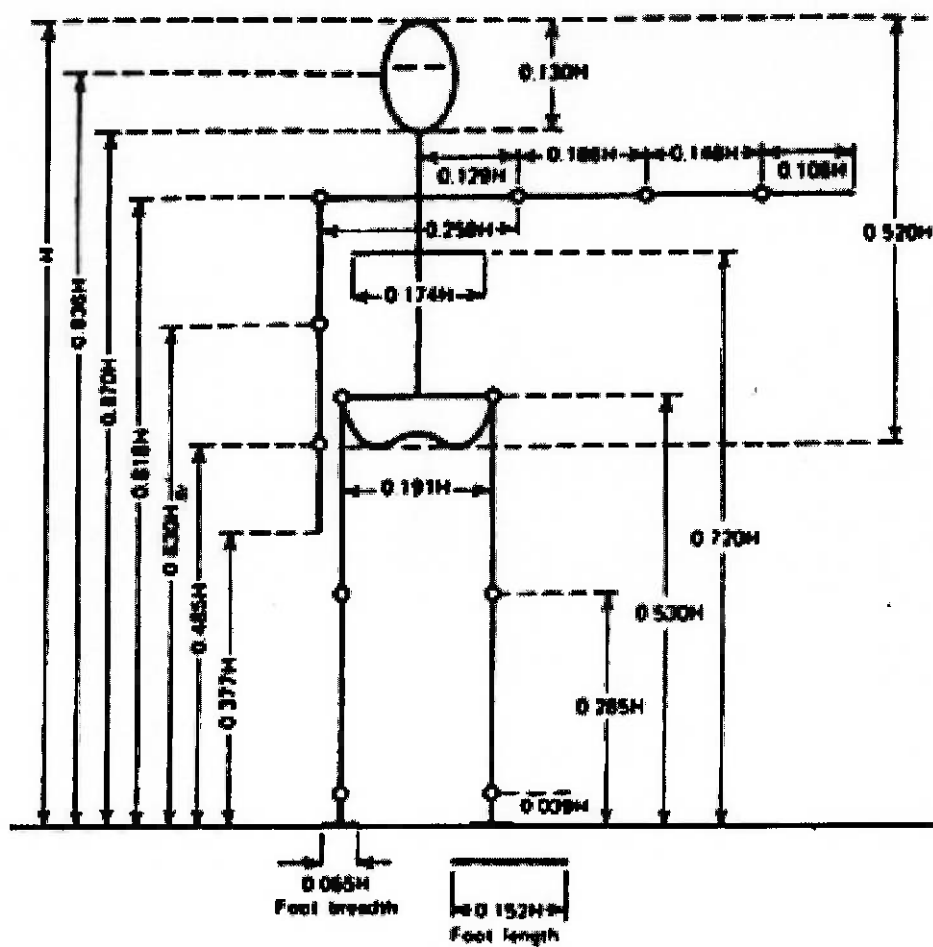


Figura 4 - Dimensões relativas do corpo humano

4 DESCRIÇÃO DO PROJETO: JUNTA DO TORNOZELO

A movimentação do pé, durante a caminhada, fica definida pela composição dos movimentos de Flexão Plantar, Flexão Dorsal e Inversão/Eversão, que podem ser descritos:

Flexão - Quando um osso é movimentado num plano de forma a diminuir o ângulo entre ele e o osso adjacente, ocorre flexão. Os exemplos incluem a flexão do cotovelo e o levantamento da panturrilha da perna em direção à parte posterior da coxa.

Extensão - A extensão, o oposto à flexão, causa o aumento do ângulo entre os ossos articulados. A extensão ocorre quando uma articulação flexionada é movimentada de volta à posição anatômica, como o estiramento do braço, da coxa, ou joelho.

Abdução - Quando uma parte do corpo, tal como um membro é movimentado para longe da linha mediana do corpo, ocorre a abdução.

Adução - A adução, o oposto da abdução, envolve o movimento de uma parte do corpo em direção à linha mediana do corpo, voltando à posição anatômica.

Inversão - É o movimento de colocar a face interna do pé voltada para cima.

Eversão - É o movimento de colocar a face externa do pé voltada para cima.

Flexão Dorsal - É o movimento de trazer o pé de encontro à canela (Tíbia).

Flexão Plantar – Movimento oposto à flexão dorsal.

Pode-se compor os movimentos de eversão e flexão plantar denominando-se *pronação* e a composição de inversão e flexão dorsal é definida como *supinação*.

A relação entre os movimentos descritos acima e seus respectivos ângulos limites, pode ser expressa na seguinte tabela:

Tabela 2 - Ângulos permitidos pelo joelho e tornozelo

Junta	Movimento	Amplitude
Joelho	Flexão	0° a 150°
Tornozelo	Flexão dorsal	0° a 20°
	Flexão Plantar	0° a 40°
	Inversão	0° a 30°
	Eversão	0° a 20°

4.1 Mecanismos estudados

Foram pesquisados alguns mecanismos com a capacidade de atuar e originar os movimentos descritos acima, simulando, dessa forma, a junta do tornozelo e os tendões responsáveis pelos movimentos. Estes mecanismos podem ser citados:

4.1.1 Mecanismo composto de uma biela-manivela e uma engrenagem

Neste mecanismo os movimentos de flexão plantar e dorsal seriam realizados através de uma biela-manivela e os movimentos de inversão e eversão seriam realizados através de uma engrenagem e uma corrente.



Figura 5 - Mecanismo com uma biela-manivela e engrenagem de corrente

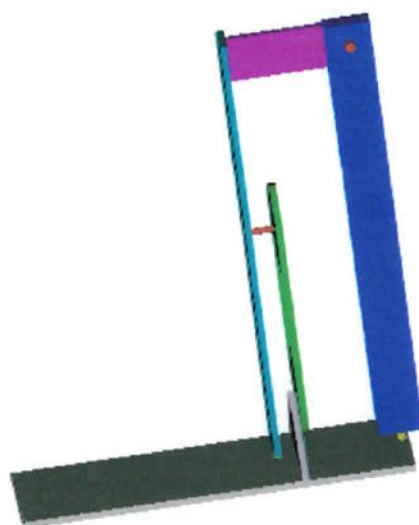


Figura 6 - Vista lateral

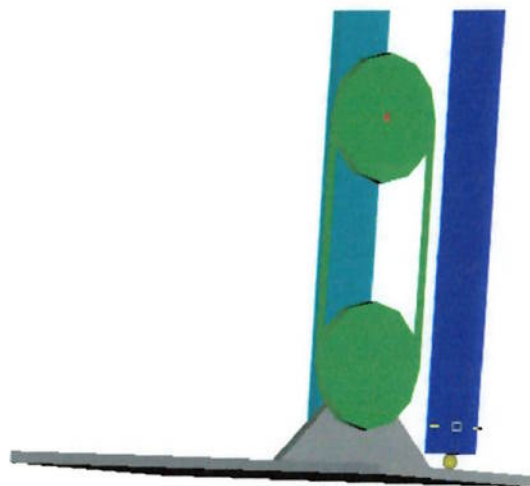


Figura 7 – Detalhe das engrenagens e corrente

4.1.2 Mecanismo composto de duas biela-manivelas

Neste mecanismo os movimentos de flexão plantar e dorsal assim como os movimentos de inversão e eversão seriam realizados através de duas bielas-manivela.

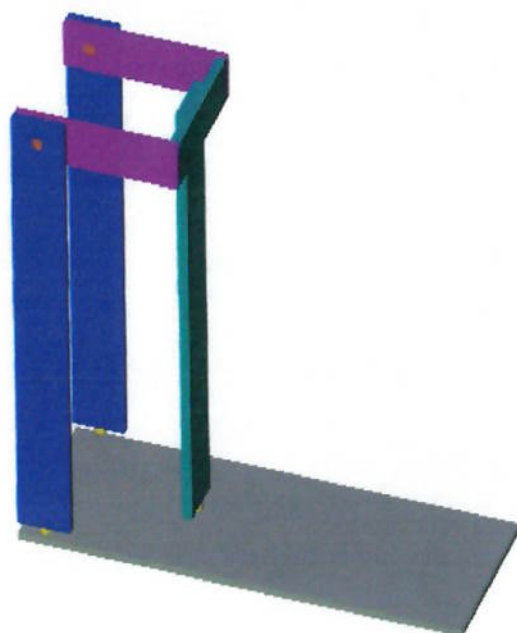


Figura 8 - Mecanismo com duas biela-manivelas

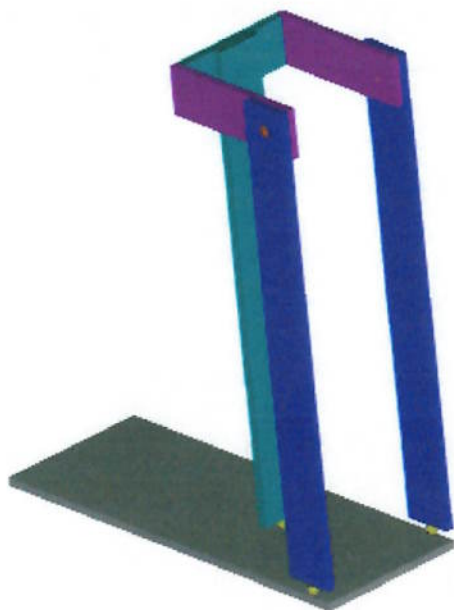


Figura 9 – Vista por trás

4.1.3 Mecanismo composto por parafuso de movimento

Neste mecanismo os movimentos de flexão plantar e dorsal assim como os movimentos de inversão e eversão seriam realizados através da movimentação de dois parafusos, dispostos sobre o calcanhar proporcionando os mesmos efeitos do mecanismo descrito acima.

4.2 Escolha do mecanismo

A partir de uma análise mais cuidadosa considerando os movimentos resultantes, a rigidez do sistema final, a simplicidade construtiva aliada à eficiência, e a limitação dos servos escolhidos, que apresentam deslocamento angular restrito em aproximadamente 180 graus, o mecanismo composto de duas bielas foi escolhido como melhor representante dos movimentos em questão. Vale ressaltar que a

distância da articulação do tornozelo ao solo por motivos construtivos não poderá obedecer às relações de dimensões do corpo humano, apresentadas na figura 3.

Escolhido o mecanismo que melhor simula os movimentos estudados, surge a necessidade de um aprofundamento na sua descrição, bem como na sua modelagem de forma a determinar a relação entre os ângulos de entrada (ângulos dos servos) e os respectivos ângulos de flexão, eversão e inversão.

O acionamento das biela-manivelas gera movimento de rotação em torno dos dois planos perpendiculares ao pé, que passam pelas juntas esféricas, conforme desenho abaixo:

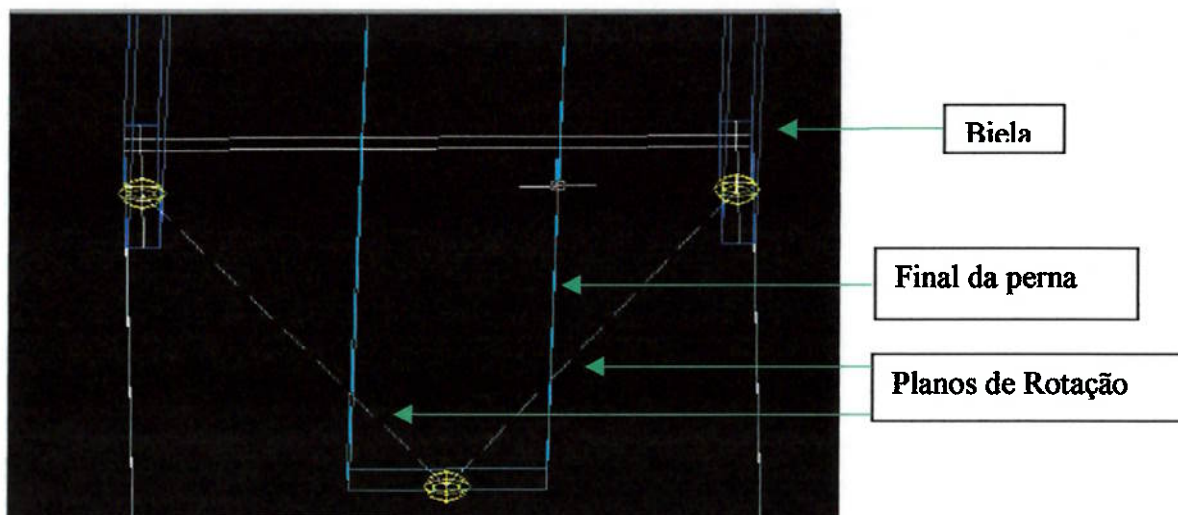


Figura 10 - Planos de rotação

Conforme desenho, temos, “pé”, “perna” (canela), e duas bielas com suas manivelas representando o tornozelo e os tendões responsáveis pelos movimentos.

Os deslocamentos desejados podem ser obtidos a partir de uma combinação dos ângulos das bielas, originados pelos servos acoplados às bielas, ângulos de entrada do sistema. Portanto com a mesma movimentação das duas bielas para cima ou para baixo temos respectivamente a flexão plantar e a flexão dorsal, com a movimentação de uma biela para cima e da outra para baixo teremos a inversão ou eversão.

4.3 Modelagem do Mecanismo

O objetivo da modelagem cinemática do sistema é determinar:

$(\phi_1, \phi_2) = F(\alpha_1, \alpha_2)$ ou seja, a relação entre os ângulos impostos pelos servos ao sistema (α_1, α_2) e os ângulos resultantes no pé (ϕ_1, ϕ_2) .

Inicialmente foi considerado um sistema de referência fixo com origem no ponto O.

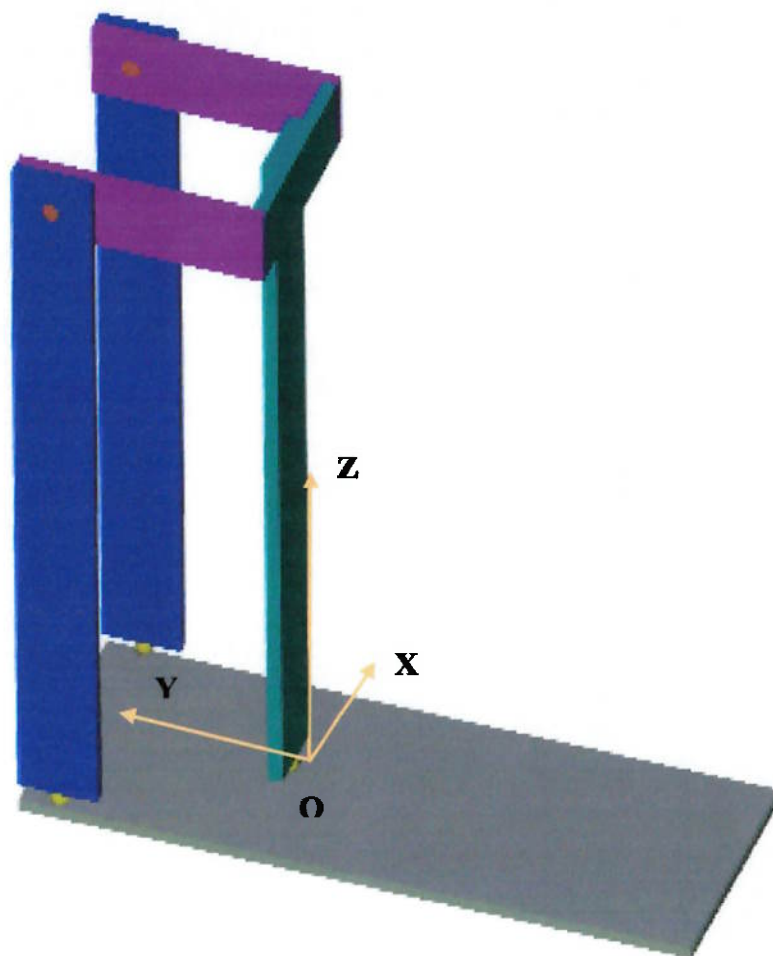


Figura 11 – Sistema de coordenadas

4.3.1 Definição das Equações do Sistema

Partindo de uma configuração deformada foram descritos os seguintes vetores, em relação ao sistema de referência:

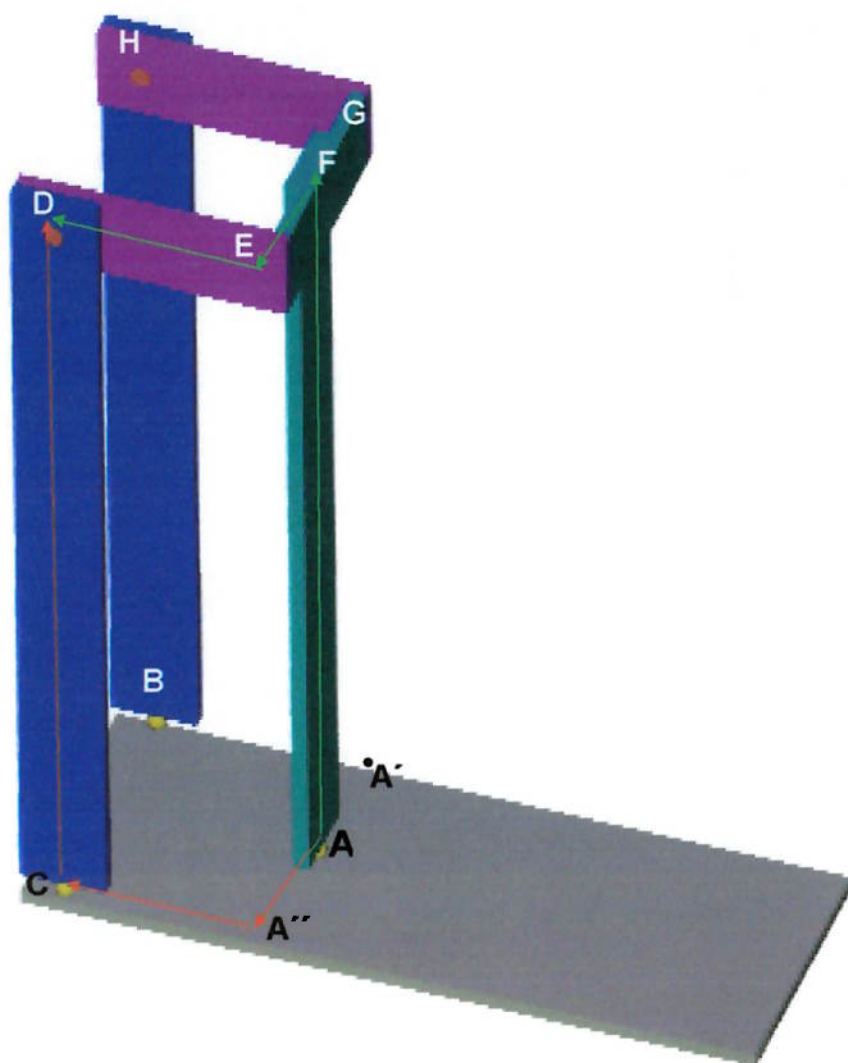


Figura 12 - Vetores que compõem o sistema analisado

Conforme a figura apresentada, pode-se perceber a existência de um plano de simetria do mecanismo perpendicular ao plano XY contendo o eixo Z. Portanto o mecanismo original fica dividido em dois mecanismos definidos, respectivamente, pelos seguintes conjuntos de vetores:

$(A'-A), (B-A'), (H-B), (F-A), (G-F), (H-G)$
 $(A''-A), (C-A''), (D-C), (F-A), (E-F), (D-E)$

Cada vetor fica definido:

$(A'-A)=[L1*\cos(\varphi1), 0, -L1*\sin(\varphi1)];$
 $(B-A')=[0, L2*\cos(\varphi2), L2*\sin(\varphi2)];$
 $(H-B)=[L3*\cos(\theta1), L3*\cos(\theta2), L3*\sin(\theta1)*\sin(\theta2)];$
 $(F-A)=[0, 0, L6];$
 $(G-F)=[L5, 0, 0];$
 $(H-G)=[0, L4*\cos(\alpha1), L4*\sin(\alpha1)];$
 $(A''-A)=[-L1*\cos(\varphi1), 0, L1*\sin(\varphi1)];$
 $(C-A'')=[0, L2*\cos(\varphi2), L2*\sin(\varphi2)];$
 $(D-C)=[L3*\cos(\theta3), L3*\cos(\theta4), L3*\sin(\theta3)*\sin(\theta4)];$
 $(E-F)=[-L5, 0, 0];$
 $(D-E)=[0, L4*\cos(\alpha2), L4*\sin(\alpha2)];$

Sendo que:

$L1=|A'-A|$
 $L2=|B-A'|$
 $L3=|H-B|$
 $L4=|H-G|$
 $L5=|E-F|$
 $L6=|F-A|$

$\varphi1$ = ângulo de saída formado entre $(A'-A)$ e o eixo X.

ϕ_2 = ângulo de saída formado entre (B-A') e o eixo Y.

θ_1 = ângulo formado entre (H-B) e o eixo X.

θ_2 = ângulo formado entre (H-B) e o eixo Y.

θ_3 = ângulo formado entre (D-C) e o eixo X.

θ_4 = ângulo formado entre (D-C) e o eixo Y.

α_1 = ângulo de entrada formado entre (H-G) e o eixo Y.

α_2 = ângulo de entrada formado entre (E-D) e o eixo Y.

Como forma de se obter as equações para a determinação das variáveis do mecanismo, foram utilizadas as seguintes somas vetoriais:

$$(A'-A)+(B-A')+(H-B)+(F-A)+(G-F)+(H-G) = 0 \quad (I)$$

$$(A''-A)+(C-A'')+(D-C)+(F-A)+(E-F)+(D-E) = 0 \quad (II)$$

As equações acima são nulas pois o vetor resultante da soma em vermelho é igual ao da soma em verde, como pode ser observado na figura 12.

Como (I) e (II) são equações vetoriais, elas foram desmembradas nas coordenadas X, Y e Z, resultando em:

De (I):

$$\text{Em X: } L_3 \cdot \cos(\theta_1) + L_1 \cdot \cos(\phi_1) - L_5 = 0$$

$$\text{Em Y: } L_4 \cdot \cos(\alpha_1) + L_3 \cdot \cos(\theta_2) + L_2 \cdot \cos(\phi_2) = 0$$

$$\text{Em Z: } -L_4 \cdot \sin(\alpha_1) + L_3 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) - L_1 \cdot \sin(\phi_1) + L_2 \cdot \sin(\phi_2) - L_6 = 0$$

De (II):

$$\text{Em X: } -L_1 \cdot \cos(\phi_1) + L_3 \cdot \cos(\theta_3) + L_5 = 0$$

$$\text{Em Y: } L_2 \cdot \cos(\phi_2) + L_3 \cdot \cos(\theta_4) - L_4 \cdot \cos(\alpha_2) = 0$$

$$\text{Em Z: } L_1 \cdot \sin(\phi_1) + L_2 \cdot \sin(\phi_2) + L_3 \cdot \sin(\theta_3) \cdot \sin(\theta_4) - L_4 \cdot \sin(\alpha_2) - L_6 = 0$$

Como comprovação da correta modelagem do mecanismo, foi utilizado um código no MatLab (anexo I), gerando a seguinte figura:

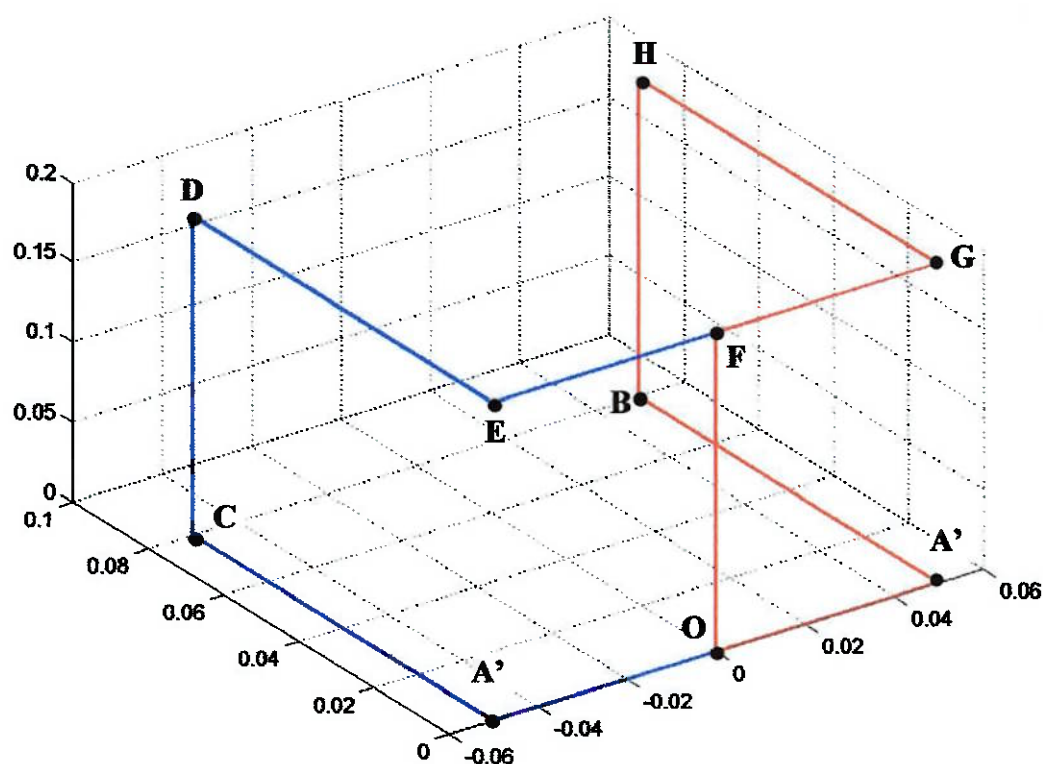


Figura 13 – Mecanismo no MatLab

4.3.2 Resolução do Sistema de Equações

- Método 1

Como uma primeira alternativa de resolução do sistema, considerando-se que ele não é linear, foi utilizado o método de Newton-Raphson^[11]. Para isso, foi implementado um algoritmo no programa MatLab (anexoII).

Devido à simetria do sistema de equações, lado direito e lado esquerdo, o método não convergiu pra resultados satisfatórios, levando à procura de outro método para a resolução deste problema.

- Método 2

Uma outra maneira de se resolver sistemas de equações não-lineares é a utilização da ferramenta encontrada no *Toolbox* do MatLab chamada FSOLVE, que tem como entrada as equações do sistema e um “chute” inicial e retorna os valores das incógnitas.

Utilizando essa função, foi elaborado um programa que determina os ângulos de saída ϕ_1 e ϕ_2 , para uma combinação dos ângulos de entrada α_1 e α_2 , com uma variação de -20° a 20° .

Essa ferramenta se mostrou mais eficaz que o método de Newton-Raphson, apresentando uma solução adequada e satisfatória.

Segue abaixo a rotina implementada:

Definição das funções do sistema não-linear:

```
function f = fun2(x)

global alfa1;
global alfa2;

f=[0.05*cos(x(1))+0.25*cos(x(3))-0.05
0.06*cos(x(2))+0.25*cos(x(4))+0.06*cos(alfa1)
-0.05*sin(x(1))+0.06*sin(x(2))+0.25*sin(x(3))*sin(x(4))+0.06*sin(alfa1)-
0.25
-0.05*cos(x(1))+0.25*cos(x(5))+0.05
0.06*cos(x(2))+0.25*cos(x(6))+0.06*cos(alfa2)
0.05*sin(x(1))+0.06*sin(x(2))+0.25*sin(x(5))*sin(x(6))+0.06*sin(alfa2)-
0.25];

x=[0 0 0 0 0 0];
x0=[0 0 0 0 0 0];

%fil=x(1) ---> angulo de saida de inversao
%fi2=x(2) ---> angulo de saida de flexao
%tetal=x(3)
```

```

%teta2=x(4)
%teta3=x(5)
%teta4=x(6)
L1=0.05;
L2=0.08;
L3=0.2;
L4=0.08;
L5=0.05;
L6=0.2;

M=moviein(82);

global alfa1;
global alfa2;
saida=zeros(81,8);
saida2=zeros(81,8);

i=1;
for alfa1=-20*pi/180:5*pi/180:20*pi/180
    for alfa2=-20*pi/180:5*pi/180:20*pi/180
        x=fsolve('fun2',x0);

        saida(i,:)=[alfa1 alfa2 x(1) x(2) x(3) x(4) x(5) x(6)];
        saida2(i,:)=[alfa1*180/pi alfa2*180/pi x(1)*180/pi x(2)*180/pi
x(3)*180/pi x(4)*180/pi x(5)*180/pi x(6)*180/pi];
        i=i+1;

%desenho

%definicao dos vetores lado esquerdo (visto por tras)

O=[0 0 0];
aA=O+[L1*cos(-x(1)) 0 -L1*sin(-x(1))];
Ba=aA+[0 L2*cos(x(2)+pi) L2*sin(x(2)+pi)];
HB=Ba+[L3*cos(x(3)) L3*cos(pi-x(4)) L3*sin(x(3))*sin(pi-x(4))];

O=[0 0 0];
FA=O+[0 0 L6];
GF=FA+[L5 0 0];
HG=GF+[0 L4*cos(alfa1) L4*sin(alfa1)];

%definicao dos vetores lado direito (visto por tras)

O=[0 0 0];
aaA=O+[-L1*cos(-x(1)) 0 L1*sin(-x(1))];
Caa=aaA+[0 L2*cos(x(2)+pi) L2*sin(x(2)+pi)];
DC=Caa+[L3*cos(x(5)) L3*cos(pi-x(6)) L3*sin(x(5))*sin(pi-x(6))];

O=[0 0 0];

```

```

FA=O+[0 0 L6];
EF=FA+[-L5 0 0];
DE=EF+[0 L4*cos(alfa2) L4*sin(alfa2)];

%desenho lado esquerdo (visto por tras)
figure(1);
clg
AXIS([-0.1 0.1 0 0.1 -0.1 0.3]);

grid;
line([O(1),aA(1)],[O(2),aA(2)],[O(3),aA(3)]);
line([aA(1),Ba(1)],[aA(2),Ba(2)],[aA(3),Ba(3)]);
line([Ba(1),HB(1)],[Ba(2),HB(2)],[Ba(3),HB(3)]);

line([O(1),FA(1)],[O(2),FA(2)],[O(3),FA(3)]);
line([FA(1),GF(1)],[FA(2),GF(2)],[FA(3),GF(3)]);
line([GF(1),HG(1)],[GF(2),HG(2)],[GF(3),HG(3)]);

%desenho lado direito (visto por tras)

line([O(1),aaA(1)],[O(2),aaA(2)],[O(3),aaA(3)]);
line([aaA(1),Caa(1)],[aaA(2),Caa(2)],[aaA(3),Caa(3)]);
line([Caa(1),DC(1)],[Caa(2),DC(2)],[Caa(3),DC(3)]);

line([O(1),FA(1)],[O(2),FA(2)],[O(3),FA(3)]);
line([FA(1),EF(1)],[FA(2),EF(2)],[FA(3),EF(3)]);
line([EF(1),DE(1)],[EF(2),DE(2)],[EF(3),DE(3)]);

M(:,82)=getframe;

end
end
movie(M,5)

```

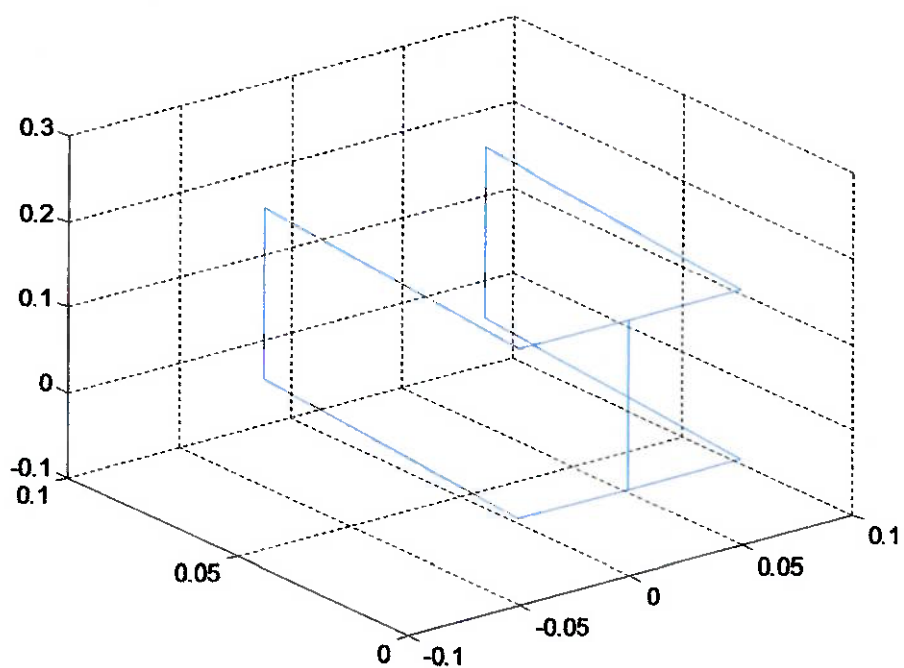



Figura 14 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em um mesmo sentido

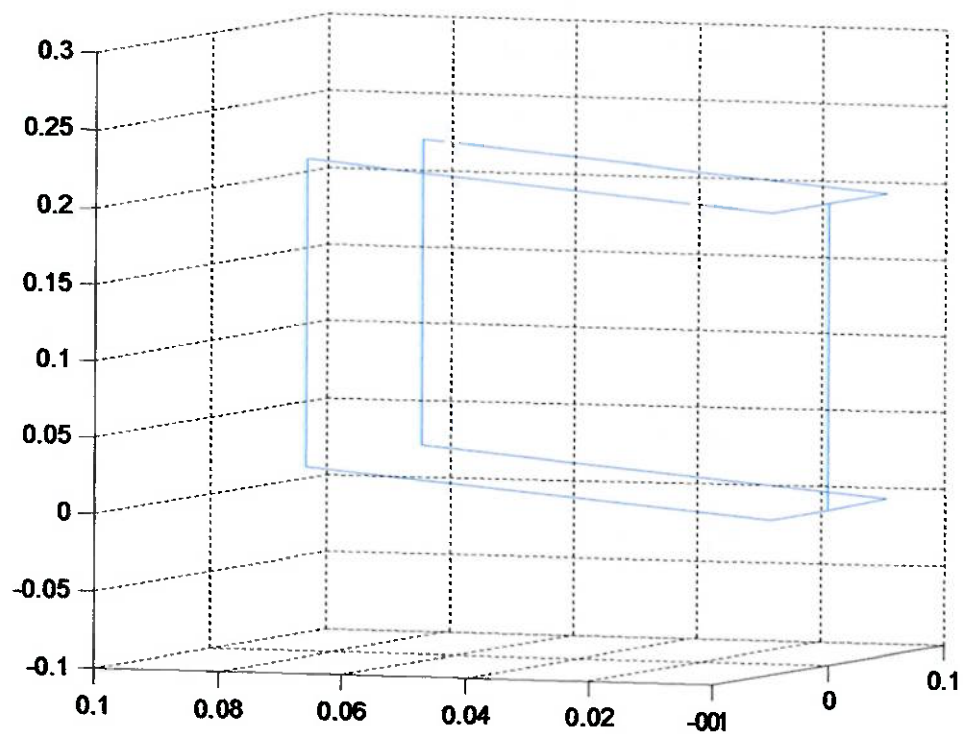


Figura 15 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em um mesmo sentido

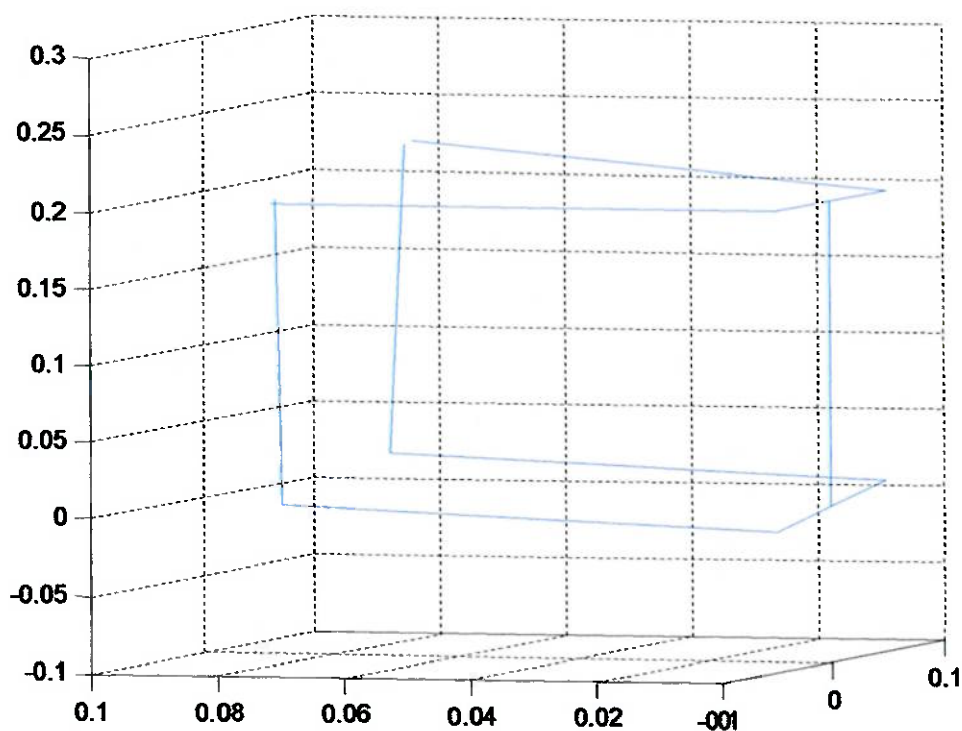


Figura 17 - Figura obtida simulando o movimento dos servos em sentidos diferentes

Com a modelagem do sistema concluída, foi gerado um vetor composto dos ângulos de entrada, dentro do intervalo de -20° a 20° , e os respectivos ângulos de saída. Dados necessários para a simulação da marcha, que serão utilizados pela Frente Elétrica.

4.3.3 Determinação dos ângulos reais da marcha humana

Para se conseguir a determinação dos ângulos reais da marcha humana, afim de se poder simulá-la com maior fidelidade, foi utilizado o programa Gaitlab, específico para estudos da marcha humana. Esse programa permite análises de forças, posições e ângulos durante um ciclo do movimento.

Segue abaixo as figuras contendo as saídas respectivas a ângulos de flexão plantar e inversão/eversão dos tornozelos direito e esquerdo.

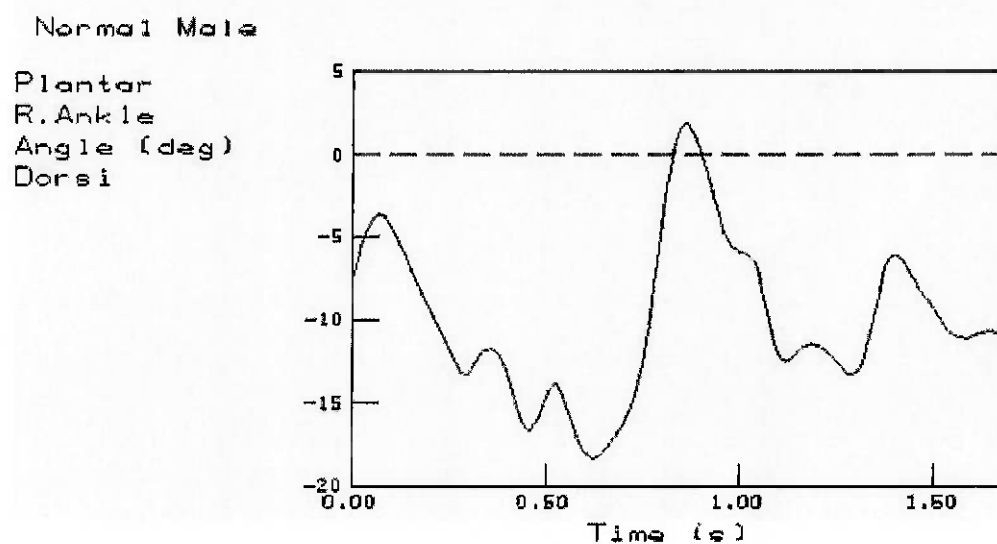


Figura 18 – Flexão plantar/dorsal do pé direito

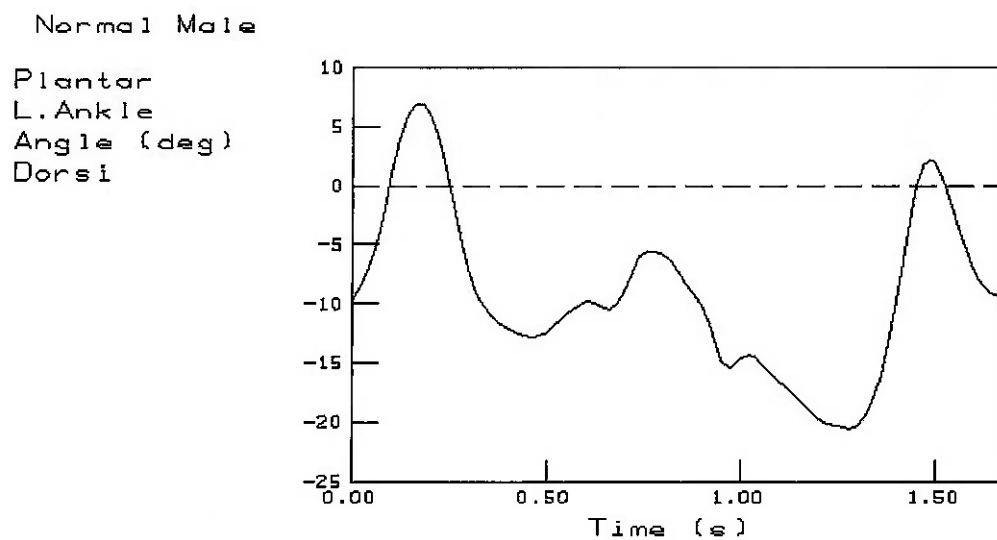


Figura 19 - Flexão plantar/dorsal do pé esquerdo

Normal Male

Inversion
R. Ankle
Angle (deg)
Eversion

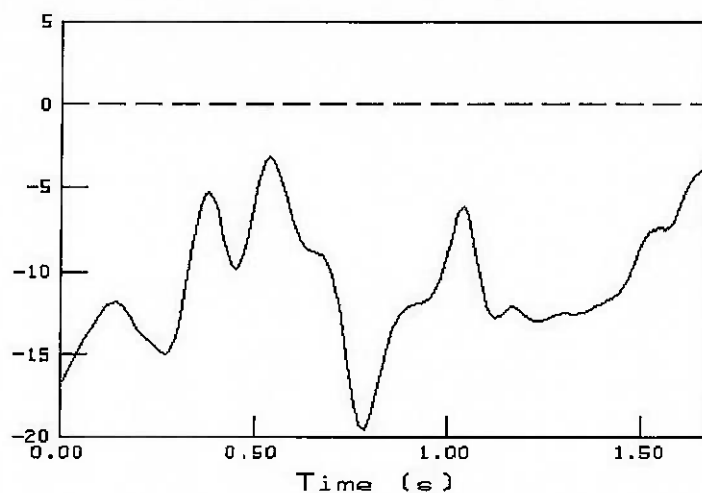


Figura 20 - Inversão/eversão do pé esquerdo

Normal Male

Inversion
R. Ankle
Angle (deg)
Eversion

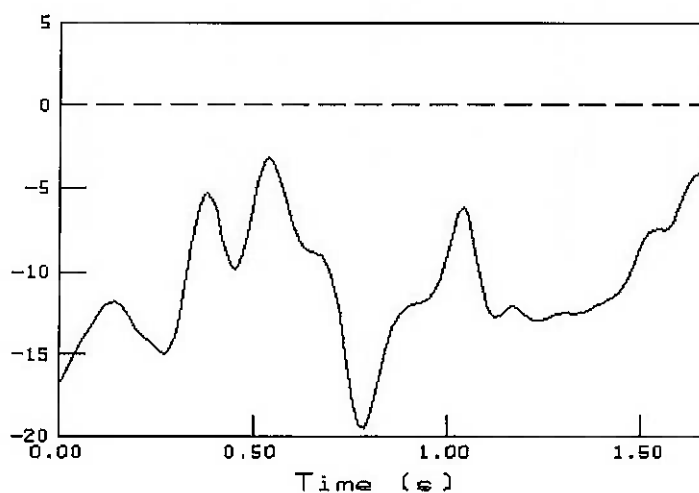


Figura 21 – Inversão/eversão do pé esquerdo

Observando a variação dos ângulos de flexão plantar e inversão/eversão, conclui-se que a faixa de ângulos de saída abrangida pelo método 2 satisfaz o movimento real.

Uma análise do movimento da perna (flexão/extensão e abdução/adução da junta superior) indica que o mesmo mecanismo adotado para o tornozelo, também poderia ser aproveitado para essa articulação, conforme os gráficos abaixo:

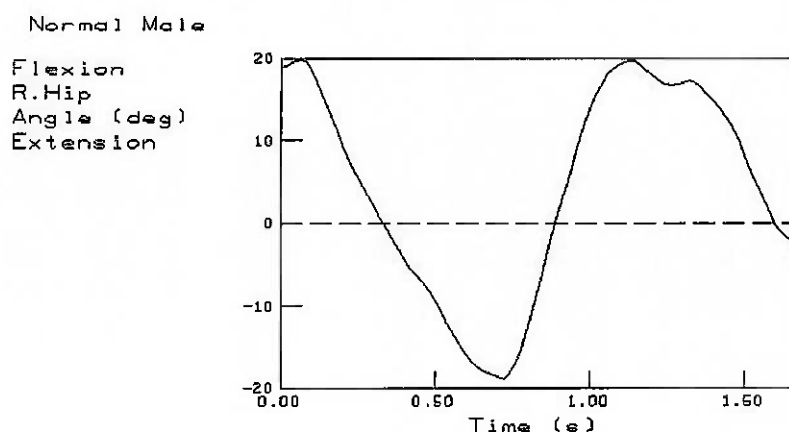


Figura 22 – Flexão/extensão da perna

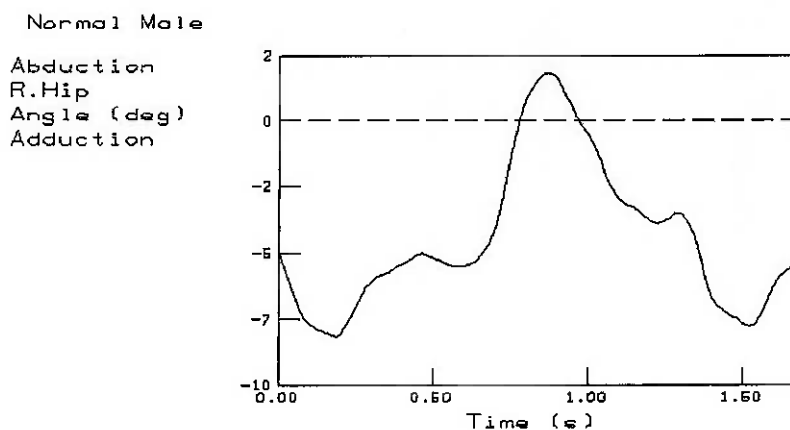


Figura 23 – Abdução/adução da perna

Coube à Frente Elétrica a manipulação e aplicação dos dados referentes à marcha e modelagem do mecanismo, já que são responsáveis pelo controle dos movimentos do robô.

Para isso, foi elaborado um *software* capaz de simular marchas, atuando nos diversos servos responsáveis pelos movimentos. Abaixo a janela de interface com o usuário deste *software*:

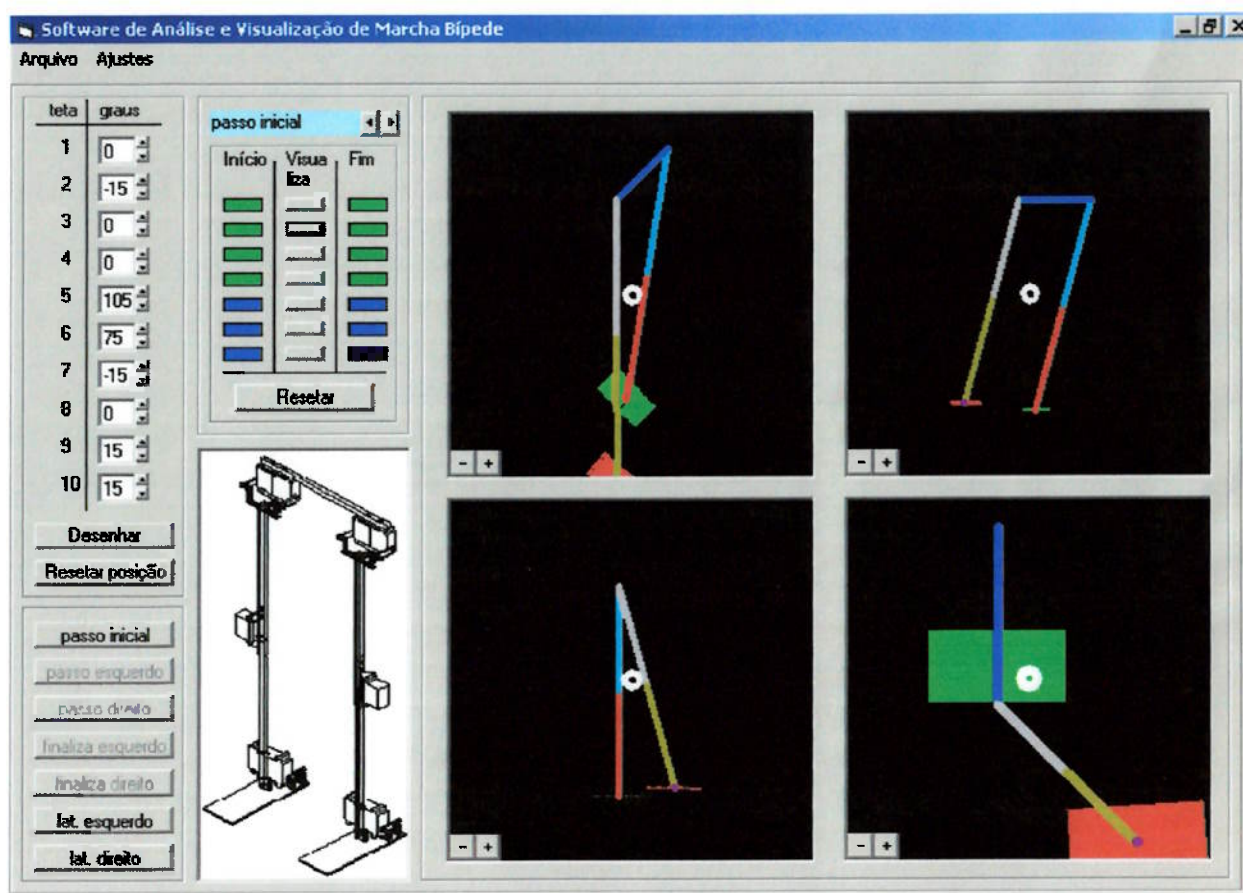


Figura 24 - Software desenvolvido pela Frente Elétrica

5 PROJETO DO MECANISMO

Seguem alguns desenhos gerados para o projeto do mecanismo do tornozelo. Há desenhos mais detalhados no Volume II do trabalho.

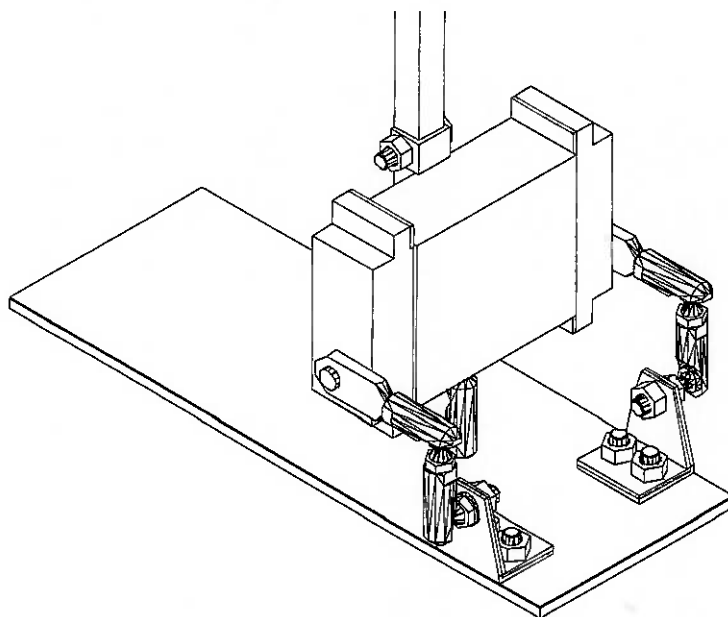


Figura 25 - Desenho de conjunto do tornozelo

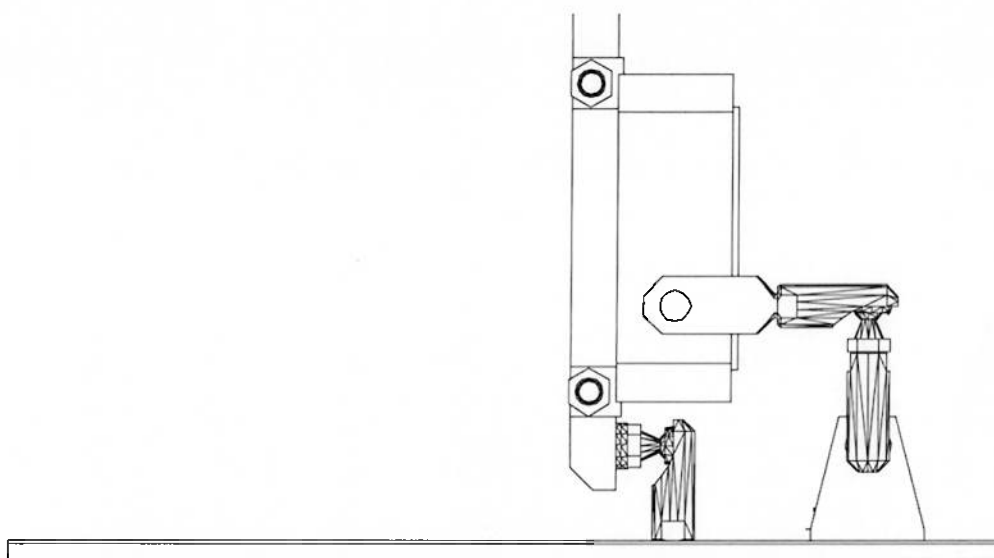


Figura 26 – Vista lateral do tornozelo

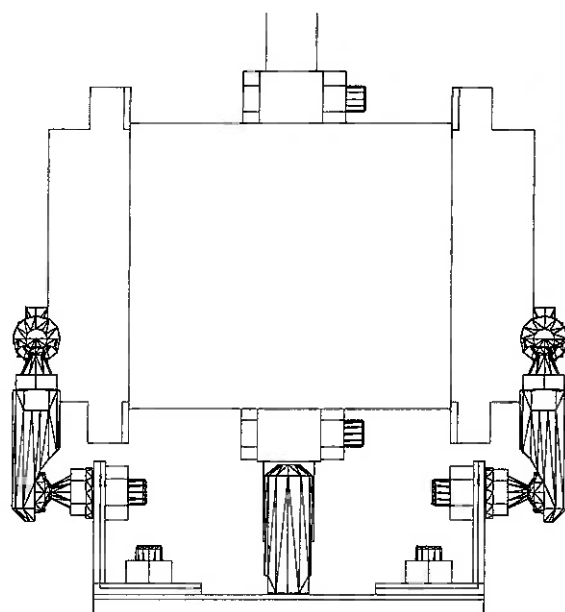


Figura 27 – Vista traseira do tornozelo

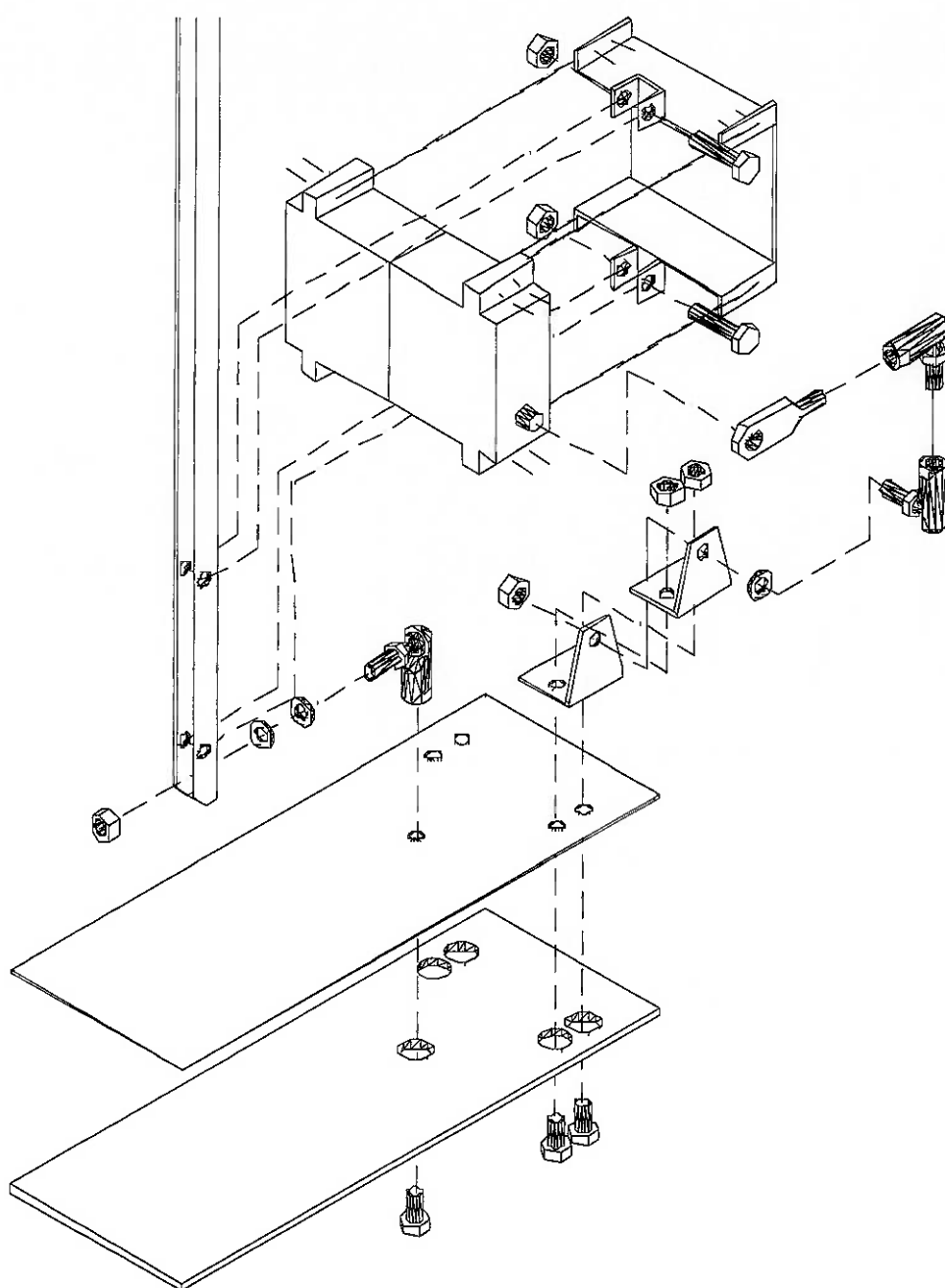


Figura 28 – Desenho de montagem do tornozelo

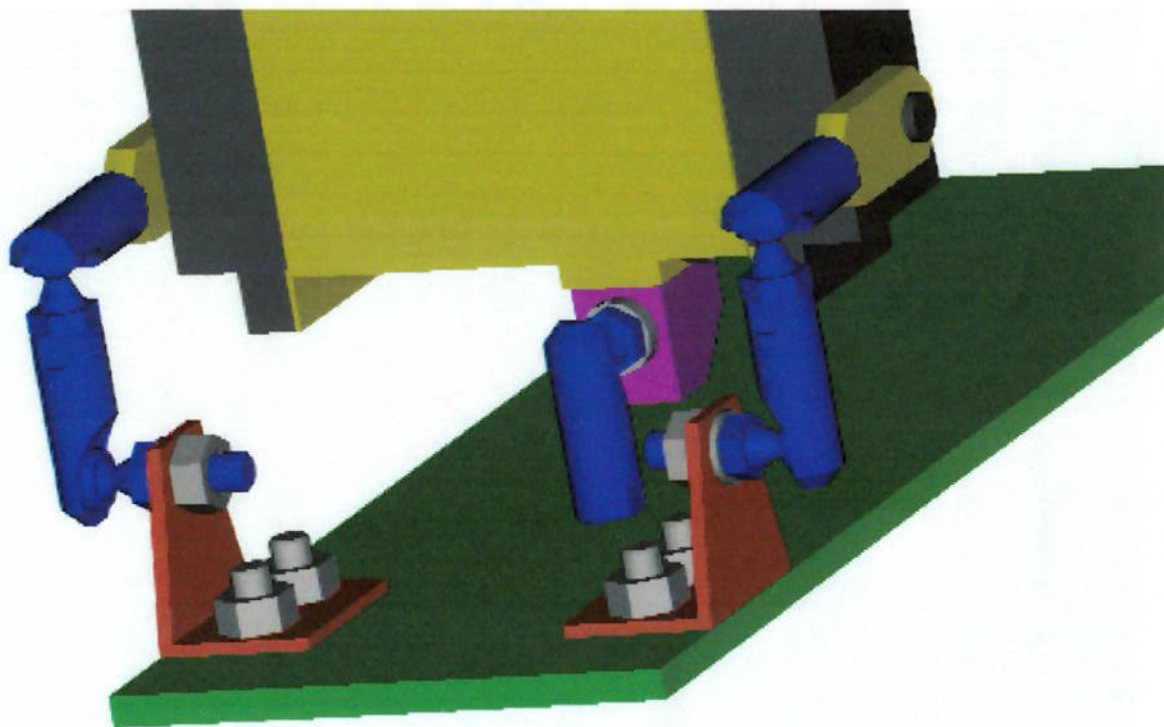


Figura 29 – Conjunto do tornozelo

Fabricação de um protótipo: considerando os desenhos produzidos serão fabricadas as peças necessárias à construção do protótipo. Detalhes sobre os materiais e peças usados são encontrados no Volume II.

Integração do conjunto geral: a integração do conjunto trata da montagem completa do robô, ou seja a conexão das juntas projetadas (pélvis, joelho e tornozelo) através dos “membros” dimensionados e construídos finalizando a construção mecânica do protótipo do robô. Esta parte de integração do conjunto envolve ainda a aplicação dos resultados obtidos pelos alunos da Frente Elétrica no protótipo construído, controlando assim os movimentos necessários para a correta movimentação do protótipo.

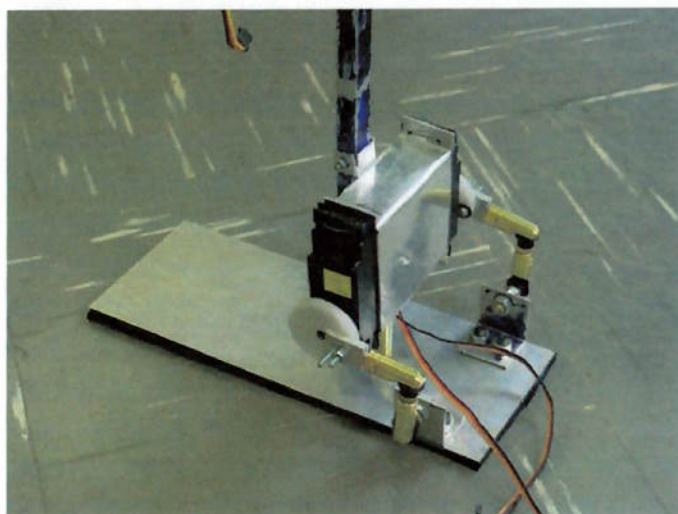


Figura 30 - Protótipo do tornozelo

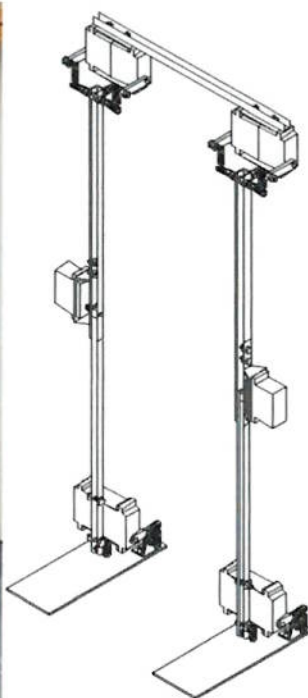


Figura 31 - Protótipo e desenho do conjunto completo

6 CONCLUSÃO E DISCUSSÕES

Este é apenas o começo de um grande trabalho a ser desenvolvido. E justamente pelo fato de ser um começo é que se demonstrou um desafio para o grupo.

Foi necessário um planejamento inicial das atividades, afim de se delinear o desenvolvimento do projeto: aprofundamento no contexto, desenvolvimento de conceitos de mecanismos, modelagens matemáticas, projeto, construção e integração com as outras frentes.

Foram importantes também as correções de rumo, para se atingir as metas. Algumas vezes nos deparamos com situações não previstas, que exigiram tomadas de decisão em grupo, sem se perder o foco principal.

O trabalho em grupo se mostrou fundamental, e foi mostrado que através dele se caminha mais facilmente.

Após a construção do protótipo e a verificação positiva de seu funcionamento, conclui-se que os objetivos inicialmente propostos foram conquistados. Entretanto, foi de grande valor para se começar a pensar em melhorias funcionais e de aplicação.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Asada, H. & Slotine, J. J. E., "Robot Analysis and Control", 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., U.S.A, 1986.
- [2] Beggs, J.S., "Mechanism", McGraw-Hill, New York, 1955.
- [3] Ching-Log Shih, "The Dynamics and Control of a Biped Walking Robot with Seven Degrees of Freedom", Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 118 n° 4, pp. 683-690, December, 1996.
- [4] Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. & Tanie, K., "Planning Walking Patterns for a Biped Robot", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no. 3, pp. 280-288, June, 2001.
- [5] Long, C. & Chiou, C. J., "The Motion Control of a Statically Stable Biped Robot on an Uneven Floor", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-PART B: Cybernetics, vol. 28, no. 2, pp. 244-249, April 1998.
- [6] Lum, H. K., Zribi, M. & Soh, Y. C., "Planning and Control of Biped Robot", International Journal of Engineering science, vol 37, pp.1319-1349, 1999.
- [7] Sardain, P., Rostami, M. & Bessonnte, G., "An Anthropomorphic Biped Robot: Dynamic Concepts and Technological Design", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-PART A: Systems and Humans, vol. 28, no. 6, pp. 823-837, November 1998.
- [8] Sardain, P., Rostami, M. & Bessonnte, G., "Biped Robots: Correlation Between Technological Design and Behavior", Control Engineering Practise, vol.7, pp. 401-411, 1999.
- [9] Vaughan, C. L., Davis, B., L. & O'Connor, J. C., "Dynamics of Human Gait", Human Kinetics Publishers, Illinois, 1992.
- [10] Winter, D. A. "Biomechanics and Motor Control of human Movement", 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., Toronto, 1990.
- [11] Doughty, S. "Mechanics of Machines", John Wiley & Sons, Inc, 1987

Anexo I

```
%desenho do mecanismo

L1=0.05;
L2=0.08;
L3=0.2;
L4=0.08;
L5=0.05;
L6=0.2;

fi1=0;
fi2=0;
teta1=pi/2;
teta2=pi/2;
teta3=pi/2;
teta4=pi/2;
alfa1=pi/6;
alfa2=-pi/6;

%definicao dos vetores lado esquerdo (visto por tras)

O=[0 0 0];
aA=O+[L1*cos(fi1) 0 -L1*sin(fi1)];
Ba=aA+[0 L2*cos(fi2) L2*sin(fi2)];
HB=Ba+[L3*cos(teta1) L3*cos(teta2) L3*sin(teta1)*sin(teta2)];

O=[0 0 0];
FA=O+[0 0 L6];
GF=FA+[L5 0 0];
HG=GF+[0 L4*cos(alfa1) L4*sin(alfa1)];

%definicao dos vetores lado direito (visto por tras)

O=[0 0 0];
aaA=O+[-L1*cos(fi1) 0 L1*sin(fi1)];
Caa=aaA+[0 L2*cos(fi2) L2*sin(fi2)];
DC=Caa+[L3*cos(teta3) L3*cos(teta4) L3*sin(teta3)*sin(teta4)];

O=[0 0 0];
FA=O+[0 0 L6];
EF=FA+[-L5 0 0];
DE=EF+[0 L4*cos(alfa2) L4*sin(alfa2)];

%desenho lado esquerdo (visto por tras)
figure(1);
grid;
line([O(1),aA(1)],[O(2),aA(2)],[O(3),aA(3)]);
line([aA(1),Ba(1)],[aA(2),Ba(2)],[aA(3),Ba(3)]);
line([Ba(1),HB(1)],[Ba(2),HB(2)],[Ba(3),HB(3)]);

line([O(1),FA(1)],[O(2),FA(2)],[O(3),FA(3)]);
```



```

line([FA(1),GF(1)],[FA(2),GF(2)],[FA(3),GF(3)]);
line([GF(1),HG(1)],[GF(2),HG(2)],[GF(3),HG(3)]);

```

```

%desenho lado direito (visto por tras)

```

```

line([O(1),aaA(1)],[O(2),aaA(2)],[O(3),aaA(3)]);
line([aaA(1),Caa(1)],[aaA(2),Caa(2)],[aaA(3),Caa(3)]);
line([Caa(1),DC(1)],[Caa(2),DC(2)],[Caa(3),DC(3)]);

```

```

line([O(1),FA(1)],[O(2),FA(2)],[O(3),FA(3)]);
line([FA(1),EF(1)],[FA(2),EF(2)],[FA(3),EF(3)]);
line([EF(1),DE(1)],[EF(2),DE(2)],[EF(3),DE(3)]);

```

Anexo II

% Resolução do sistema pelo método de Newton-Raphson

```
clear global
clear all
```

%parâmetros de entrada

```
L1=0.05;
L2=0.06;
L3=0.25;
L4=0.06;
L5=0.05;
L6=0.25;
```

%Análise de deslocamento

%chute inicial

```
tetal=-5+pi;
teta2=2+pi;
teta3=0.3+pi;
teta4=1+pi;
fil=pi*2;
fi2=pi;
```

```
alfa0=pi/360;
```

it=5; %número de iterações

dalfa=(pi/6)/it; %incremento

alfal=alfa0; %ângulo inicial de entrada 1

alfa2=-alfa0;; %ângulo inicial de entrada 2

```
Ralfal=zeros(it+1,1);
Ralfa2=zeros(it+1,1);
Rtetal=zeros(length(Ralfal),length(Ralfa2));
Rteta2=zeros(length(Ralfal),length(Ralfa2));
Rteta3=zeros(length(Ralfal),length(Ralfa2));
Rteta4=zeros(length(Ralfal),length(Ralfa2));
Rfil=zeros(length(Ralfal),length(Ralfa2));
Rfi2=zeros(length(Ralfal),length(Ralfa2));
```

%equações do sistema

%lado esquerdo

```
f1=L3*cos(tetal)+L1*cos(fil)-L5;
f2=-L4*cos(alfal)+L3*cos(teta2)+L2*cos(fi2);
f3=-L4*sin(alfal)+L3*sin(tetal)*sin(teta2)-L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)-L6;
```

```

%lado direito
f4=-L1*cos(fi1)+L3*cos(teta3)+L5;
f5=L2*cos(fi2)+L3*cos(teta4)-L4*cos(alfa2);
f6=L1*sin(fi1)+L2*sin(fi2)+L3*sin(teta3)*sin(teta4)-L4*sin(alfa2)-L6;

%pause

J=zeros(6,6);

J(1,1)=-L3*sin(teta1);
J(1,2)=0;
J(1,3)=0;
J(1,4)=0;
J(1,5)=-L1*sin(fi1);
J(1,6)=0;

J(2,1)=0;
J(2,2)=-L3*sin(teta2);
J(2,3)=0;
J(2,4)=0;
J(2,5)=0;
J(2,6)=-L2*sin(fi2);

J(3,1)=L3*cos(teta1)*sin(teta2);
J(3,2)=L3*sin(teta1)*cos(teta2);
J(3,3)=0;
J(3,4)=0;
J(3,5)=-L1*cos(fi1);
J(3,6)=L2*cos(fi2);

J(4,1)=0;
J(4,2)=0;
J(4,3)=-L3*sin(teta3);
J(4,4)=0;
J(4,5)=L1*sin(fi1);
J(4,6)=0;

J(5,1)=0;
J(5,2)=0;
J(5,3)=0;
J(5,4)=-L3*sin(teta4);
J(5,5)=0;
J(5,6)=-L2*sin(fi2);

J(6,1)=0;
J(6,2)=0;
J(6,3)=L3*cos(teta3)*sin(teta4);
J(6,4)=L3*sin(teta3)*cos(teta4);
J(6,5)=L1*cos(fi1);
J(6,6)=L2*cos(fi2);

delta=-inv(J)*[f1 f2 f3 f4 f5 f6]';

```

```

tetal=tetal+delta(1);
teta2=teta2+delta(2);
teta3=teta3+delta(3);
teta4=teta4+delta(4);
fil=fil+delta(5);
fi2=fi2+delta(6);

erro=(f1^2+f2^2+f3^2+f4^2+f5^2+f6^2)^0.5;

%lado esquerdo
f1=L3*cos(tetal)+L1*cos(fil)-L5;
f2=-L4*cos(alfa1)+L3*cos(teta2)+L2*cos(fi2);
f3=-L4*sin(alfa1)+L3*sin(tetal)*sin(teta2)-L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)-L6;

%lado direito
f4=-L1*cos(fil)+L3*cos(teta3)+L5;
f5=L2*cos(fi2)+L3*cos(teta4)-L4*cos(alfa2);
f6=L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)+L3*sin(teta3)*sin(teta4)-L4*sin(alfa2)-L6;

indice1=0;
for i=0:dalfa:it,

    alfa1=alfa0+i*dalfa;

    indice2=0;
    for j=0:dalfa:it,

        alfa2=alfa0+i*dalfa;

%lado esquerdo
f1=L3*cos(tetal)+L1*cos(fil)-L5;
f2=-L4*cos(alfa1)+L3*cos(teta2)+L2*cos(fi2);
f3=-L4*sin(alfa1)+L3*sin(tetal)*sin(teta2)-L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)-L6;

%lado direito
f4=-L1*cos(fil)+L3*cos(teta3)+L5;
f5=L2*cos(fi2)+L3*cos(teta4)-L4*cos(alfa2);
f6=L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)+L3*sin(teta3)*sin(teta4)-L4*sin(alfa2)-L6;

    erro=(f1^2+f2^2+f3^2+f4^2+f5^2+f6^2)^0.5;

    while erro > 0.01,
        J(1,1)=-L3*sin(tetal);
        J(1,2)=0;
        J(1,3)=0;
        J(1,4)=0;
        J(1,5)=-L1*sin(fil);
        J(1,6)=0;

```

```

J(2,1)=0;
J(2,2)=-L3*sin(teta2);
J(2,3)=0;
J(2,4)=0;
J(2,5)=0;
J(2,6)=-L2*sin(fi2);

J(3,1)=-L3*cos(tetal)*sin(teta2);
J(3,2)=-L3*sin(tetal)*cos(teta2);
J(3,3)=0;
J(3,4)=0;
J(3,5)=-L1*cos(fil);
J(3,6)=-L2*cos(fi2);

J(4,1)=0;
J(4,2)=0;
J(4,3)=-L3*sin(teta3);
J(4,4)=0;
J(4,5)=L1*sin(fil);
J(4,6)=0;

J(5,1)=0;
J(5,2)=0;
J(5,3)=0;
J(5,4)=-L3*sin(teta4);
J(5,5)=0;
J(5,6)=-L2*sin(fi2);

J(6,1)=0;
J(6,2)=0;
J(6,3)=L3*cos(teta3)*sin(teta4);
J(6,4)=L3*sin(teta3)*cos(teta4);
J(6,5)=L1*cos(fil);
J(6,6)=L2*cos(fi2);

delta=-inv(J)*[f1 f2 f3 f4 f5 f6]';

tetal=tetal+delta(1);
teta2=teta2+delta(2);
teta3=teta3+delta(3);
teta4=teta4+delta(4);
fil=fil+delta(5);
fi2=fi2+delta(6);

```

%lado esquerdo

```

f1=L3*cos(tetal)+L1*cos(fil)-L5;
f2=-L4*cos(alfa1)+L3*cos(teta2)+L2*cos(fi2);
f3=-L4*sin(alfa1)+L3*sin(tetal)*sin(teta2)-L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)-L6;

```

%lado direito

```

f4=-L1*cos(fil)+L3*cos(teta3)+L5;
f5=L2*cos(fi2)+L3*cos(teta4)-L4*cos(alfa2);
f6=L1*sin(fil)+L2*sin(fi2)+L3*sin(teta3)*sin(teta4)-L4*sin(alfa2)-L6;

```

```

home
erro=(f1^2+f2^2+f3^2+f4^2+f5^2+f6^2)^0.5

end

Ralfa1(indicel+1,1)=alfa1;
Ralfa2(indicel+1,1)=alfa2;
Rteta1(indicel+1,indice2+1)=teta1;
Rteta2(indicel+1,indice2+1)=teta2;
Rteta3(indicel+1,indice2+1)=teta3;
Rteta4(indicel+1,indice2+1)=teta4;
Rfi1(indicel+1,indice2+1)=fi1;
Rfi2(indicel+1,indice2+1)=fi2;

indice2=indice2+1;

end
indicel=indicel+1;
end

```