

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CT – CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ALEXANDRE DELPUPO MONFARDINI

**SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UM ROBÔ BÍPEDE
BASEADO NO MODELO SLIP**

VITÓRIA
2014

ALEXANDRE DELPUPO MONFARDINI

**SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UM ROBÔ BÍPEDE
BASEADO NO MODELO SLIP**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Bento Filho

VITÓRIA

2014

ALEXANDRE DELPUPO MONFARDINI

**SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UM ROBÔ BÍPEDE
BASEADO NO MODELO SLIP**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 15 de dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Antônio Bento Filho, Dr. Eng.
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Carlos Friedrich Loeffler Neto, Dr. Eng.
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Raphael Milanezi de Andrade, Ms. C
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

RESUMO

Este trabalho apresenta a simulação de uma máquina bípede no simulador dinâmico de robôs e mecanismos Yobotics! Simulation Construction Set (YSCS), que tem sido utilizado para auxiliar na construção e no estudo do comportamento de robôs e como ferramenta de projeto de exoesqueletos e robôs a pernas ágeis. A estratégia de controle tem como base a descrita por Raibert (1986). Essencialmente, uma máquina bípede pode ser controlada como se tivesse apenas uma perna. Isto é possível, já que a máquina se apoia em uma perna de cada vez. O controle de uma perna é dividido em três partes principais: nas fases de apoio, quando se controla a atitude e as forças de compressão e impulsão da máquina, e o voo, quando se controla o posicionamento da perna. As estratégias de controle para uma máquina de uma perna e suas adaptações para uma máquina bípede são descritas, e no final simulações são feitas, apresentando alguns resultados, como velocidade máxima, resposta do equilíbrio à uma queda com um deslocamento na perna e ângulos da perna e do corpo durante uma corrida.

Palavras Chave: máquina pula-pula, robô bípede, simulação dinâmica, máquina de estados, YSCS, modelo massa-mola simples.

ABSTRACT

This work presents the simulation of a biped machine hopping in three dimensions in the dynamic simulator of robots and mechanisms Yobotics! Simulation Construction Set (YSCS), that has been used to assist the construction and study of the behavior of robots as a tool for the project of exoskeletons and robots with agile legs. The control strategy is based that described by Raibert (1986). It can be showed that a biped machine can be controlled as it had just one. This is possible because the one simulated uses only one leg for support at a time. The control of a one-legged machine is divided in three main parts: in the support phases, when the attitude and compression and thrust forces are controlled, and flight, when the position of the legged is controlled. The control strategies for a one-legged machine and the adaptations necessary for a biped machine are described, and simulations run, its results presented, as the maximum speed, balance and angles of legs and body as a function of time in running.

Keywords: hopping in three dimensions, Yobotics! Simulation Construction Set, biped machine, dynamic simulation, state machine, YSCS, SLIP model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O Acrobata	12
Figura 2 – Estados e transições da máquina pula-pula no YSCS.....	14
Figura 3 – Modelo de máquina pula-pula construído no YSCS.....	17
Figura 4 – Modelo da máquina pula-pula tridimensional construído no YSCS.....	20
Figura 5 – Criação das juntas e links do robô bípede no YSCS.....	21
Figura 6 – Criação das forças externas aplicadas na junta universal e na junta deslizante.....	21
Figura 7 – Curva de resposta dos ângulos da junta universal (Abdução/Adução e Flexão/Extensão) e de atitude do corpo (Atitude X e Atitude Y).....	27
Figura 8 – Curva de resposta dos ângulos da atitude e de Flexão/Extensão da junta universal.....	28
Figura 9 – Ângulos da pelve e quadril durante um ciclo de corrida de uma pessoa. Na esquerda: Pessoa que apresentou maior grau de extensão do quadril. Na direita: pessoa que apresentou menor grau de extensão do quadril.	28
Figura 10 – Percurso da máquina, em função de x e y.	30
Figura 11 – Ângulos de atitude (X e Y) da máquina durante todo o percurso em triângulo.....	31
Figura 12 – Ângulos da junta universal (Flexão/Extensão e Abdução/Adução).	32
Figura 13 – Posição da máquina pula-pula em função do tempo.....	33
Figura 14 – Construção do modelo bípede tridimensional no YSCS.....	35
Figura 15 – Ângulo de atitude X e taxa de variação da atitude X (velocidade angular) no equilíbrio.....	39
Figura 16 – ângulos de atitude e da junta universal da perna direita durante uma corrida com aceleração e desaceleração do bípede, na direção x.....	40
Figura 17 – Trajeto percorrido pelo bípede durante a simulação da corrida na direção x.	41
Figura 18 – ângulos de atitude e da junta universal do bípede durante a corrida com aceleração e desaceleração na direção y.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo	9
1.2	Considerações	9
1.3	Fundamentação teórica.....	10
2	YOBOTICS! SIMULATION CONSTRUCTION SET (YSCS).....	11
3	A MÁQUINA PULA-PULA PLANAR.....	13
3.1	Modelo descrito por Raibert	13
3.1.1	Controle do posicionamento do pé	14
3.1.2	Controle da atitude do corpo	16
4	MÁQUINA PULA-PULA TRIDIMENSIONAL	19
4.1	Construção do modelo no YSCS	19
4.2	Estratégia de controle	22
4.2.1	Estado COMPRESSÃO.....	25
4.2.2	Estado IMPULSÃO.....	25
4.2.3	Estado VOO.....	26
4.3	Simulação de uma queda com ângulo na perna	26
4.4	Simulação de uma corrida.....	27
4.5	Simulação de um percurso completo	28
5	MÁQUINA BÍPEDE	34
5.1	Construção do modelo no YSCS	34
5.2	Estratégia de controle	35
5.2.1	Estado COMPRESSÃO.....	36
5.2.2	Estado IMPULSÃO.....	37
5.2.3	Estado VOO.....	38
5.3	Simulação de equilíbrio	38
5.4	Simulação de uma corrida.....	39

5.4.1	Corrida no eixo x.....	39
5.4.2	Corrida no eixo y.....	41
6	CONCLUSÃO	43
8	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é simular uma máquina bípede, utilizando como base a estratégia de controle de uma máquina pula-pula e considerações feitas por Raibert (1986). A simulação é feita no simulador dinâmico de robôs e mecanismos Yobotics! Simulation Construction Set (YSCS), que tem sido utilizado para auxiliar na construção e no estudo do comportamento de robôs e como ferramenta de projeto de exoesqueletos e robôs a pernas ágeis.

1.2 Considerações

Existem duas razões principais para estudar o uso de pernas para locomoção. A primeira é mobilidade. Existe a necessidade de veículos que possam se locomover em terrenos muito irregulares, nos quais os veículos existentes de rodas não podem ir. Uma razão porque pernas oferecerem melhor mobilidade que rodas em terrenos irregulares é que elas usam pontos de apoio isolados, que melhora o sustentação e tração, enquanto rodas necessitam de um caminho contínuo para suporte. Outra vantagem é que as pernas fornecem uma suspensão ativa, que possibilita a separação da trajetória do corpo e do terreno, tornando o caminhar mais suave.

A segunda razão para estudar máquinas é entender a locomoção humana e animal. É enorme a complexidade e variedade como atletas realizam movimentos como giros, propulsões e lançamentos, mantendo a orientação, equilíbrio e velocidade de seus corpos.

A simulação de uma máquina bípede é uma parte de um projeto maior que existe no departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, que é a construção de máquinas dinâmicas. A simulação de uma máquina pula-pula planar, no projeto de graduação de Maia e Junior (2012), é uma parte inicial desse projeto. Simulações de uma máquina pula-pula em três dimensões e de uma máquina bípede são feitas como continuação desse projeto. Estes trabalhos são o início do desenvolvimento de máquinas mais complexas.

1.3 Fundamentação teórica

Um modelo massa-mola simples (BLICKHAN, 1989) que consiste de uma mola sem massa ligada a uma massa pontual, descreve a interdependência dos parâmetros mecânicos associados à corrida e ao salto de seres humanos como uma função da velocidade.

O próprio mecanismo de salto resulta em uma redução da dimensão do espaço de variáveis, uma vez que é possível observar os mecanismos da corrida sem a necessidade de articular o movimento de pernas. Assim, algumas soluções podem ser encontradas utilizando um modelo dinâmico mais simplificado.

Em particular, a frequência de salto e o deslocamento vertical estão intimamente relacionados sendo que apenas alguns parâmetros, tais como a velocidade e o comprimento da perna, são suficientes para determinar o ponto de equilíbrio dinâmico do sistema.

Dentro da faixa de frequências fisiologicamente possíveis, uma pessoa pulando seleciona instintivamente uma frequência em que a maior quantidade de energia pode ser entregue e ainda ser armazenada elasticamente. Na corrida, o corpo descreve um movimento balístico de queda até que o pé toque o solo. As pernas então deformam-se elasticamente para absorver a energia cinética do corpo e retornam esta energia logo após para impulsionar o próximo salto (WALSH et al., 2006; DOLLAR e HERR, 2008).

2 YOBOTICS! SIMULATION CONSTRUCTION SET (YSCS)

O simulador Yobotics! Simulation Construction Set (YSCS) (IHMC, 2013) é um pacote completo de software para criar simulações rápidas e fáceis de dispositivos mecânicos, sistemas biomecânicos e robôs. Com ele é possível: simular de forma precisa e rápida a física de um corpo rígido; acessar as posições, velocidades e torques das juntas; definir contorno do solo e modelos de contato com o solo; plotar gráficos em tempo real de qualquer variável; reproduzir as simulações; gravar e salvar dados das simulações; gerar facilmente gráficos em 3D com mapeamento de textura e controle de câmeras; modificar parâmetros enquanto a simulação roda.

O YCSC é fácil de usar, porém uma ferramenta poderosa para criar simulações complexas de dispositivos robóticos. Simulações de dispositivos com várias juntas podem ser criadas em questão de minutos. Um controle arbitrário pode ser adicionado a estes dispositivos e cada grau de liberdade automaticamente tem um atuador simulado associado a ele. As simulações são facilmente extensíveis, já que são implementadas completamente em Java, com documentada Interface de Programação de Aplicações (API). Também fornece resultados instantâneos através de animações da simulação, e plotagem de qualquer variável, e permite facilmente a modificação dos sistemas de controle e design do robô pelo simulador.

O Acrobata, Figura 1, é um robô plano com dois links, usado para estudar problemas de controle não lineares e robótica, e possui um braço com um atuador no cotovelo (junta 2), mas sem um atuador no ombro (junta 1). O objetivo do controle é mover o Acrobata de sua estável posição invertida para baixo para uma posição instável invertida para cima e equilibrá-lo na vertical. Spong (1994) encontrou uma solução de controle para manter o Acrobata na posição vertical. A solução encontrada foi implementada no tutorial do simulador YSCS (IHMC, 2013) e bons resultados foram encontrados.

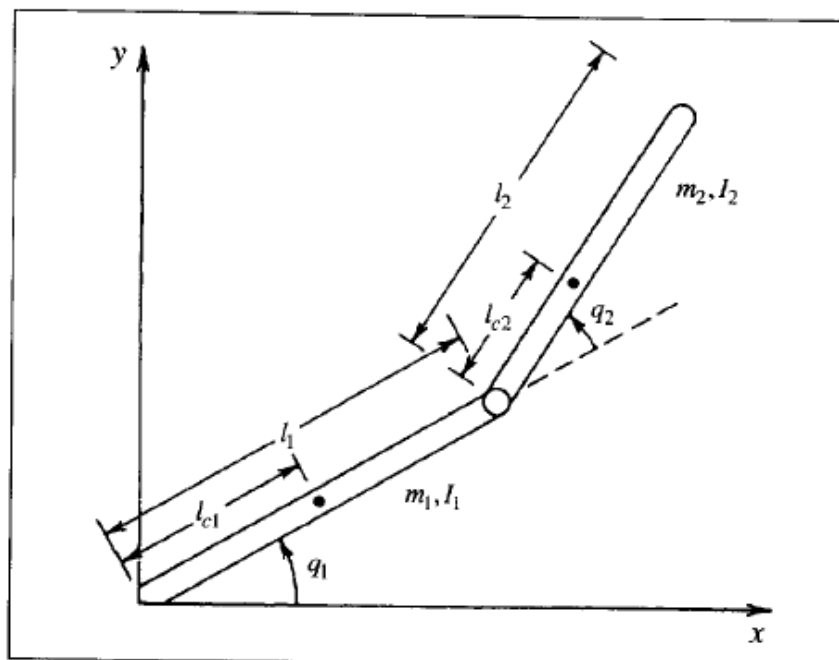


Figura 1 – O Acrobata

Fonte: Spong (1994)

Dentre os robôs desenvolvidos na área de robótica cuja simulação foi realizada no ambiente YSCS, tem-se o Robô Músculo-Esquelético (NIIYAMA et al., 2010) e o robô humanoide M2V2, desenvolvido no IHMC, o qual foi baseado no robô M2, desenvolvido no laboratório de pernas do MIT (MIT Leg Laboratory).

O Robô Músculo-Esquelético é um robô bípede que possui músculos pneumáticos que constituem os atuadores, e seu objetivo é focar o estudo da locomoção ágil, em corrida.

O M2 é um robô bípede que é usado para investigar algoritmos para caminhar e técnicas de controle, com objetivos de caminhar com velocidades de 1 m/s e de forma eficiente.

3 A MÁQUINA PULA-PULA PLANAR

3.1 Modelo descrito por Raibert

Raibert (1986) descreve o controle de uma máquina pula-pula planar, dividindo o controle utilizando uma máquina de estados.

O estado é identificado a partir de eventos de transição, e para cada estado existe uma estratégia de controle apropriada. A máquina possui 5 estados e 5 eventos de transição, Figura 2. Quando a perna está em voo e toca o chão (Aterrissagem), o estado muda para CARREGANDO, que zera o torque na junta rotativa e para de despressurizar o cilindro pneumático. Logo em seguida, quando a perna começa a encolher (Perna Encolhe), o estado muda para COMPRESSÃO, e o cilindro pneumático é selado e um torque é aplicado na junta rotativa de forma a controlar a atitude do corpo. Ao chegar no final da compressão, quando a perna está totalmente encolhida (Encolhimento Máximo da Perna), o estado identificado é o IMPULSÃO, o cilindro pneumático é pressurizado e o torque continua sendo aplicado para controlar a atitude do corpo. Quando a perna se estica totalmente (Extensão da Perna Quase Total), o estado é DESCARREGANDO, que zera o torque na junta rotativa e a força causada pelo cilindro pneumático. Quando a perna deixa o chão (Deixa o Solo), chega-se ao estado VOO, e um torque é aplicado na junta rotativa para controlar a posição da perna para fase de pouso.

No estado COMPRESSÃO, quando o cilindro pneumático é selado, há um armazenamento de energia elástica pela compressão do ar aprisionado e o movimento de descida do corpo é freado. Esta energia é devolvida na fase IMPULSÃO, com, gerando uma força que impulsiona o corpo para cima até a fase de voo.

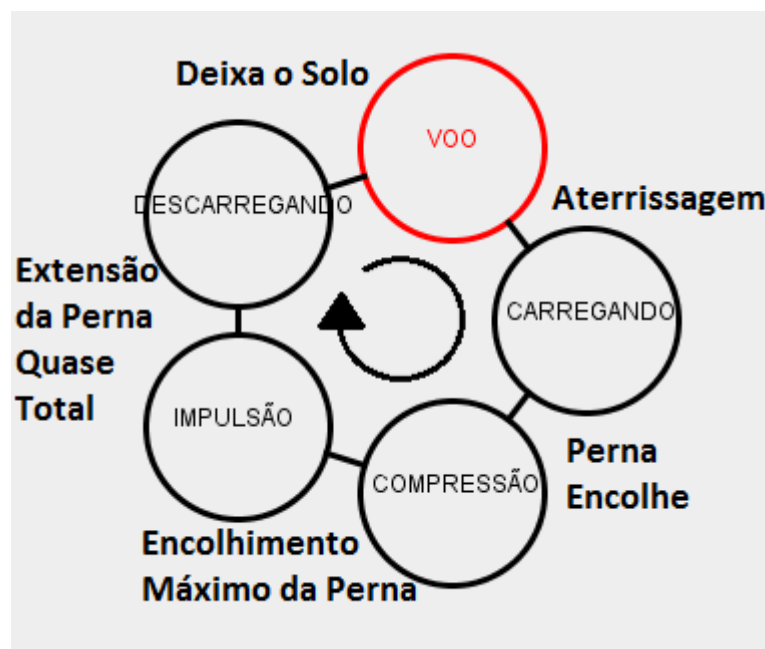


Figura 2 – Estados e transições da máquina pula-pula no YSCS.

Fonte: Adaptado de Raibert (1986).

3.1.1 Controle do posicionamento do pé

Para controlar a velocidade da máquina pula-pula, o sistema de controle deve calcular o posicionamento do pé. Dois fatores são considerados no cálculo do posicionamento do pé: a velocidade medida do corpo é utilizada para aproximar a localização do ponto neutro, x_{f0} . Um erro na velocidade é utilizado para calcular um deslocamento do ponto neutro para acelerar o sistema. O ponto neutro é aquele no qual o pé deve ser posicionado na fase de voo, antes da aterrissagem, para manter a velocidade do corpo constante. Posicionando a perna a frente do ponto neutro, o corpo é desacelerado, e posicionando antes do ponto neutro, o corpo é acelerado.

Para calcular o ponto neutro, o sistema de controle estima a trajetória que o corpo irá percorrer durante a fase de apoio, baseado na velocidade do corpo, e na duração da fase de apoio anterior, T_s . O ponto neutro é então dado por:

$$x_{f0} = \frac{\dot{x}T_s}{2} \quad (1)$$

Onde:

x_{f0} é a distância do pé a frente em relação com o centro de massa do corpo

\dot{x} é a velocidade do corpo

T_s é a duração do tempo de apoio

Para acelerar a máquina, o sistema de controle desloca o pé do ponto neutro, usando uma função linear do erro entre velocidade do corpo e a velocidade desejada, \dot{x}_d :

$$x_{f\Delta} = k_x(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (2)$$

Onde:

$x_{f\Delta}$ é o deslocamento do pé em relação ao ponto neutro

\dot{x}_d é a velocidade desejada

k_x é um ganho de realimentação

Combinando as duas equações anteriores, chega-se à equação para o posicionamento do pé:

$$x_f = \frac{\dot{x}T_s}{2} + k_x(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (3)$$

Depois de calculado x_f , o ângulo desejado do quadril, γ_d , medido entre o corpo e a perna, é dado por:

$$\gamma_d = \emptyset - \arcsin\left(\frac{\dot{x}T_s}{2r} + \frac{k_x(\dot{x} - \dot{x}_d)}{2r}\right) \quad (4)$$

Onde:

\emptyset é o ângulo do corpo em relação à horizontal

r é o comprimento da perna

Um potenciômetro mede o ângulo entre o corpo e a perna, γ , e calculado γ_d , o sistema de controle calcula o torque necessário para levar γ ao valor

$$\tau = -k_p(\gamma - \gamma_d) - k_v(\dot{\gamma}) \quad (5)$$

Onde:

- τ é o torque gerado no quadril
 γ é o ângulo do quadril
 γ_d é o ângulo desejado do quadril
 k_p é ganho de realimentação de posição
 k_v é o ganho de realimentação de velocidade

3.1.2 Controle da atitude do corpo

O controle da atitude do corpo é feito durante a fase de apoio. Como o momento angular é conservado durante o voo, a fase de apoio fornece a única oportunidade para mudar momento angular de todo o sistema. O atrito entre o pé e o solo durante o apoio possibilita que torques sejam aplicados ao corpo sem haver grandes acelerações da perna. Estes torques são usados para controlar a atitude desejada do corpo. A equação utilizada pelo sistema de controle para aplicar o torque adequado no quadril é dada por:

$$\tau = -k_p(\varnothing - \varnothing_d) - k_v(\dot{\varnothing}) \quad (6)$$

Onde:

- τ é o torque no quadril
 \varnothing é o ângulo entre o corpo e a horizontal
 \varnothing_d é o ângulo desejado entre o corpo e a horizontal
 k_p é o ganho de realimentação de posição
 k_v é o ganho de realimentação de velocidade

O atrito entre o pé e o solo é o que previne o deslizamento. É necessário que a força normal seja adequada para que a força de atrito seja suficiente. Os estados CARREGANDO e DESCARREGANDO foram implementados para zerar o torque que controla a atitude do corpo, quando o pé acaba de tocar, ou está para deixar o solo, prevenindo o deslizamento do pé ou grande aceleração devido à uma força normal insuficiente.

Maia e Junior (2012) construíram e simularam uma máquina pula-pula planar, Figura 3, no YSCS, baseado na máquina descrita por Raibert (1986).

Foi construído em primeiro lugar uma junta planar flutuante, que serve de base para a ligação de um link principal, e é o corpo da máquina pula-pula. Os links, que se ligam às juntas, carregam propriedades de massa e inércia. A junta rotativa, possui um grau de liberdade, e foi conectada à junta planar flutuante. Na junta rotativa foi conectada uma junta deslizante. Para cada junta foi ligado seu respectivo link, com as devidas propriedades físicas.

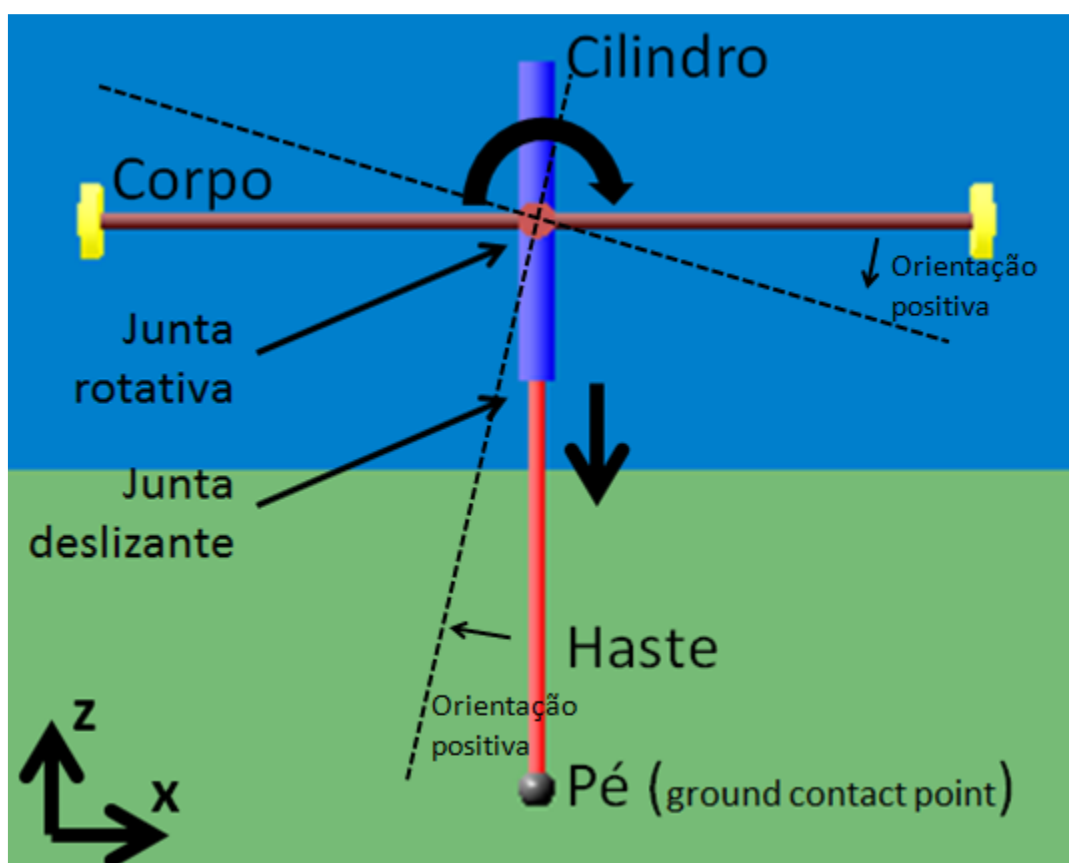


Figura 3 – Modelo de máquina pula-pula construído no YSCS.

Fonte: Maia e Junior (2012).

Para o cálculo da força que atua nos estados COMPRESSÃO e IMPULSÃO, foi considerado que o ar como gás ideal e foram utilizadas as equações de um processo politrópico (MORAN e SHAPIRO, 2002), a área da seção transversal, o curso c e uma pressão residual na câmara de 103,5 kPa, encontrando o seguinte resultado:

$$F_2 = 60,1 \left(\frac{0,25}{(0,25-c)} \right)^{1,4}.$$

No modelo de máquina pula-pula planar de Maia e Junior (2012), também foi criada uma relação linear, obtida experimentalmente através do simulador, entre a velocidade desejada da máquina e o ângulo de atitude desejado:

$$\phi_d = -0,015\dot{x}_d \quad (7)$$

Onde:

\dot{x}_d é a velocidade desejada

ϕ_d é o ângulo desejado entre o corpo e a horizontal

4 MÁQUINA PULA-PULA TRIDIMENSIONAL

Raibert (1986) descreve um modelo de máquina pula-pula tridimensional, que possui técnicas de controle que são extensões das técnicas descritas para o modelo planar, preservando a divisão da corrida em salto vertical, andar e postura.

Em três dimensões o trabalho de controlar a velocidade e o equilíbrio da máquina para uma máquina de uma perna é essencialmente o mesmo do modelo planar. O ponto neutro tem o mesmo significado geral de antes, porém sua localização é especificada por um vetor com componentes no plano horizontal.

A máquina pula-pula construída em 3 dimensões tem duas diferenças principais em relação à planar. A primeira é a falta de um mecanismo que restrinja o movimento da máquina, então a máquina se move com 6 graus de liberdade. A segunda diferença está no quadril, com uma junta universal ao invés de uma junta rotativa.

4.1 Construção do modelo no YSCS

Como uma forma de entender o funcionamento de uma máquina pula-pula para posteriormente construir um modelo bípede, foi construído um modelo tridimensional com uma perna, Figura 4, no YSCS, através do compilador Eclipse, usando como base o modelo planar de Junior e Maia (2012).

A diferença principal na construção do robô está na mudança de uma junta planar flutuante com 3 graus de liberdade para uma junta flutuante com 6 graus de liberdade, e de uma junta rotativa para uma junta universal.

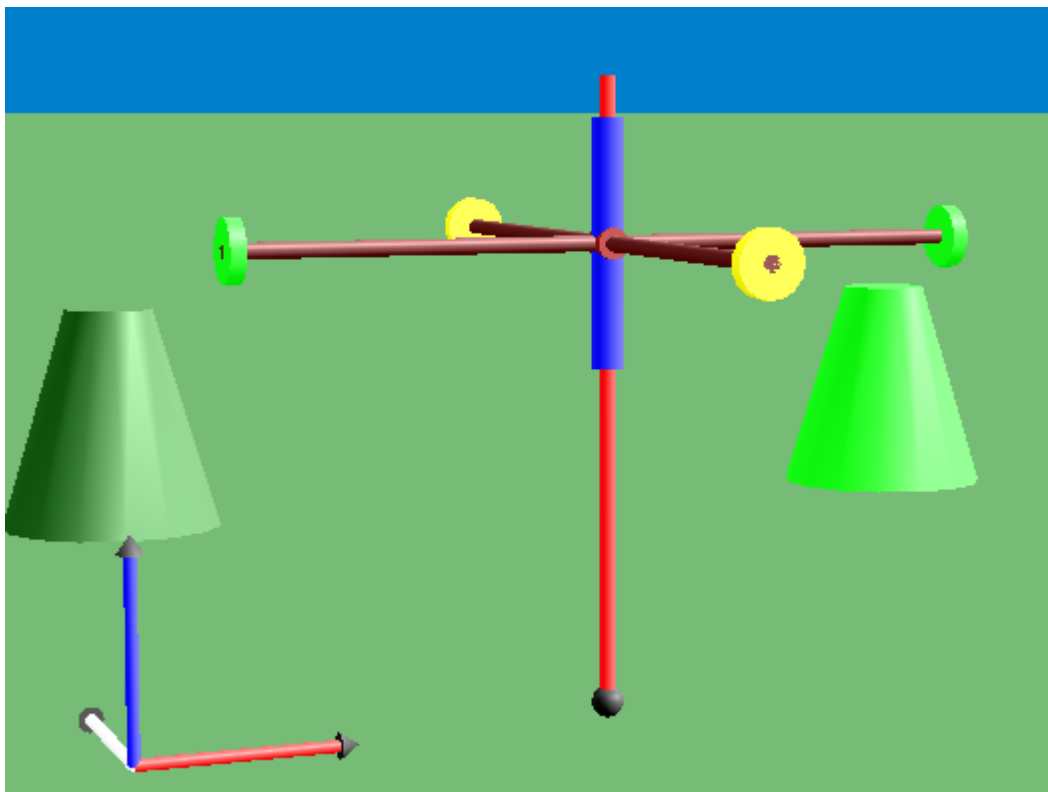


Figura 4 – Modelo da máquina pula-pula tridimensional construído no YSCS.

Na Figura 4 o eixo em azul indica a direção z, o eixo vermelho a direção x, e o eixo branco o eixo y. Podem ser identificados o corpo do cilindro, representados pelas hastes horizontais com objetos cilíndricos verdes e amarelos nas pontas, o cilindro pneumático em azul, e a perna (vermelho). Estes componentes também podem ser chamados de links, que dão as dimensões físicas e as propriedades de massa às juntas as quais elas são associadas.

Alguns trechos de programação do processo de criação do robô são mostrados na Figura 5. Nela pode-se ver 3 comandos básicos:

- `Joint`: cria uma nova junta.
- `setLink`: associa um link à uma junta. Os links carregam as propriedades de inércia e massa e as dimensões físicas. A junta recebe estas propriedades do link associado.
- `addRootJoint`: adiciona a junta como uma junta raiz do robô. Para ser parte de um robô, uma junta deve ser adicionada como uma junta raiz, ou ser ligada a uma junta parente.

- addJoint: adiciona uma junta como filha de outra junta. Associando ao corpo humano, a junta raiz seria o tronco, as juntas filhas seriam os ombros e o quadril, enquanto os cotovelos filhas dos ombros e assim por diante.

```

Joint FJoint = new FloatingJoint("FJoint", new Vector3d(0.0, 0.0, L1), this);

FJoint.setLink(Body());

this.addRootJoint(FJoint);

Joint UJoint = new UniversalJoint("UJoint1", "UJoint2", new Vector3d(0.0, 0.0, 0.0), this,
UJoint.setLink(Thigh());
FJoint.addJoint(UJoint);

Joint SJoint = new SliderJoint("SJoint", new Vector3d(0.0, 0.0, -L2), this, Joint.Z);
SJoint.setLink(Shin());
UJoint.addJoint(SJoint);

```

Figura 5 – Criação das juntas e links do robô bípede no YSCS.

Na classe robô também são criadas forças externas que devem ser aplicadas na junta universal e na junta deslizante. Estas forças são responsáveis pela impulsão vertical do robô, implementadas na classe controlador, com sinais opostos (ação e reação). A criação dessas forças externas no YSCS é mostrada na Figura 6, onde:

- Ujoint: junta universal,
- UForce: força externa que é aplicada na junta universal,
- SJoint: junta deslizante,
- SForce: força externa que é aplicada na junta deslizante.

```

// Ponto de aplicação de força na junta universal
// ExternalForcePoint(String name, Vector3d offset, Robot rol
// As componentes da força são inseridas pelo usuário (confo:

ExternalForcePoint UForce = new ExternalForcePoint("UForce",
UJoint.addExternalForcePoint(UForce);

// Ponto de aplicação de força na junta deslizante
ExternalForcePoint SForce = new ExternalForcePoint("SForce",
SJoint.addExternalForcePoint(SForce);

```

Figura 6 – Criação das forças externas aplicadas na junta universal e na junta deslizante.

Os parâmetros utilizados na construção do modelo 3D, Tabela 1, foram em grande parte os mesmos utilizados no modelo 2D, com algumas diferenças: deve-se considerar os momentos de inércia em relação ao eixo x e ao eixo y, sendo ambas

iguais; o ângulo de varredura da perna possui duas componentes, uma para cada eixo, e seus valores são iguais a 0,33 radianos.

Tabela 1 – Parâmetros da máquina pula-pula tridimensional.

Parâmetro	Dimensão
Massa total	8,6 kg
Massa do cilindro	0,45 kg
Massa não suspensa (haste)	0,45 kg
Momento de inércia do corpo	0,52 kg.m ²
Momento de inércia da perna	0,037 kg.m ²
Momento de inércia do cilindro	0,0104 kg.m ²
Momento de inércia da haste	0,0243 kg.m ²
Comprimento do cilindro	0,31 m
Comprimento da haste	0,78 m
Ângulo de varredura da perna	0,33 rad
Torque máximo da perna	27 N.m
Força máxima no atuador pneumático	260 N

4.2 Estratégia de controle

Com base no controle da máquina tridimensional descrita por Raibert (1986), devem ser criadas equações equivalentes às equações de 1 a 7, para a componente y, equações de 8 a 13:

$$y_{f0} = \frac{\dot{y}T_s}{2} \quad (8)$$

Onde

y_{f0} é a posição neutra na direção y

T_s é o tempo da fase de apoio

\dot{y} é a velocidade do robô na direção y

$$y_{f\Delta} = k_x(\dot{y} - \dot{y}_d) \quad (9)$$

$$y_f = \frac{\dot{y}T_s}{2} + k_x(\dot{y} - \dot{y}_d) \quad (10)$$

Onde

$y_{f\Delta}$ é o deslocamento do pé em relação à posição neutra, na direção y

k_x é um ganho de realimentação

\dot{y}_d é a velocidade desejada do robô, na direção y

\dot{y} é a velocidade do robô, na direção y

$$\gamma_{dy} = \phi_y - \arcsin\left(\frac{\dot{x}T_s}{2r} + \frac{k_x(\dot{x} - \dot{x}_d)}{2r}\right) \quad (11)$$

Onde

γ_{dy} é o ângulo desejado da perna, na direção y

ϕ_y é o ângulo de atitude do corpo, na direção y

r é o comprimento da perna

$$\tau_2 = -k_p(\gamma_y - \gamma_{dy}) - k_v(\dot{\gamma}_y) \quad (12)$$

Onde

γ_y é o ângulo da perna, na direção y

$\dot{\gamma}_y$ é a velocidade angular da perna, ou taxa de variação do ângulo da perna, na direção y

τ_2 torque na direção y

k_v, k_p são ganhos de realimentação

As equações de 8 a 12 são utilizadas na fase de voo do robô.

$$\tau_2 = -k_p(\phi_y - \phi_{dy}) - k_v(\dot{\phi}_y) \quad (13)$$

Onde

ϕ_y é o ângulo de atitude do corpo, na direção y

ϕ_{dy} é o ângulo de atitude desejado do corpo, na direção y

$\dot{\phi}_y$ é a taxa de variação do ângulo de atitude do corpo, na direção y

$$\phi_{dy} = -0,015\dot{x}_d \quad (14)$$

Onde

\dot{x}_d é a velocidade desejada, na direção x

Como se pode ver da equação 11, a velocidade da máquina no eixo x está diretamente relacionada com a medida do ângulo desejado entre o corpo e a perna medida no plano xz (γ_{dy}), da mesma forma o ângulo entre o corpo e a horizontal medida no plano xz (ϕ_{dy}) está relacionada com a velocidade na direção de x. τ_2 é o torque aplicado na direção do eixo y.

Considerando as equações para a direção x, utilizando as equações de 1 a 3 da mesma forma, e sendo renomeadas as equações de 4 a 7 para se adequar ao caso tridimensional, as equações de 15 a 18 para esta direção são:

$$\gamma_{dx} = \phi_x - \arcsin\left(\frac{\dot{y}T_s}{2r} + \frac{k_x(\dot{y} - y_d)}{2r}\right) \quad (15)$$

$$\tau_1 = -k_p(\gamma_x - \gamma_{dx}) - k_v(\dot{\gamma}_x) \quad (16)$$

$$\tau_1 = -k_p(\phi_x - \phi_{dx}) - k_v(\dot{\phi}_x) \quad (17)$$

$$\phi_{dx} = -0,015\dot{y}_d \quad (18)$$

Onde

- γ_{dx} é o ângulo desejado da perna, na direção x
- ϕ_x é o ângulo de atitude do corpo, na direção x
- γ_x é o ângulo da perna, na direção x
- $\dot{\gamma}_x$ é a taxa de variação do ângulo da perna, na direção x
- ϕ_{dx} é o ângulo de atitude desejado do corpo, na direção x
- $\dot{\phi}_x$ é a taxa de variação do ângulo de atitude do corpo, na direção x.
- \dot{y}_d é a velocidade desejada do robô, na direção y

4.2.1 Estado COMPRESSÃO

No estado COMPRESSÃO, assim como no estado IMPULSÃO, a máquina pula-pula tem uma oportunidade para controlar os ângulos de atitude do corpo. Este controle é feito aplicando torques na junta universal, que geram forças de atrito entre o pé do robô e o solo. O torque possui duas componentes, uma para o eixo x e outra para o eixo y, e são dados pelas equações 13 e 17, e possuem um valor máximo de 27 Nm.

Neste estado existe também a transformação de energia cinética, relativa à velocidade de queda, em energia potencial elástica, que será transformada novamente em energia cinética na fase IMPULSÃO. A força, contrária ao movimento, é devido à força de compressão de um gás pela pressurização do cilindro pneumático, foi calculada anteriormente. A equação é mostrada novamente a seguir:

$$F_2 = 60,1 * \left(\frac{0,25}{(0,25 - c)} \right)^{1,4} \quad (19)$$

Onde c é o curso da junta deslizante.

4.2.2 Estado IMPULSÃO

No estado IMPULSÃO, são utilizadas as mesmas equações para controle da atitude do corpo, equações 13 e 17. Porém, a força vertical é resultado da energia

acumulada no estado COMPRESSÃO. A força é dada também pela equação 19, com um valor mínimo de 270 N.

4.2.3 Estado VOO

No estado VOO, os torques devem ser aplicados para o posicionamento correto da perna para a aterrissagem. Os torques aplicados são dados pelas equações 12 e 16. As equações 11 e 15 são utilizadas para calcular o ângulo desejado da perna.

4.3 Simulação de uma queda com ângulo na perna

Esta simulação foi feita com uma altura de queda do robô de 0,2 metro, com um ângulo inicial de abdução/adução e flexão/extensão de 0,7 radiano, que dá uma resultante vetorial de 1 radiano. Estes são os ângulos da junta universal.

A Figura 7 mostra a resposta de quatro ângulos para a simulação da queda com os ângulos informados. Os ângulos com maiores variações são os ângulos da perna de flexão/extensão e de adução/abdução, os menores são os ângulos de atitude. O controlador da máquina estabiliza

Durante a queda, o controle tenta trazer a o posicionamento do pé para o ponto neutro, que para velocidade desejada nula é zero. Isto pode ser observado na Figura 7, uma pequena diminuição no ângulo da perna (Flexão/Extensão Y), como set point um valor nulo. O tempo de voo, porém, é curto, e ao tocar o solo o ângulo da perna sobe para 0,23 radiano, devido ao momento de inércia de queda da máquina. Após a fase de apoio (COMPRESSÃO e IMPULSÃO), o corpo entra na fase de voo com velocidade na direção x, e o controlador posiciona a perna a frente do ponto neutro, valor de -0,23 radiano na Figura 7 (Flexão/Extensão Y), para frear o corpo. Os ângulos de atitude são resultados das reações dos torques que são aplicados na perna para o seu posicionamento. Ao girar a perna em um sentido, o corpo gira em sentido contrário, pois durante o voo o corpo deve preservar seu momento angular.

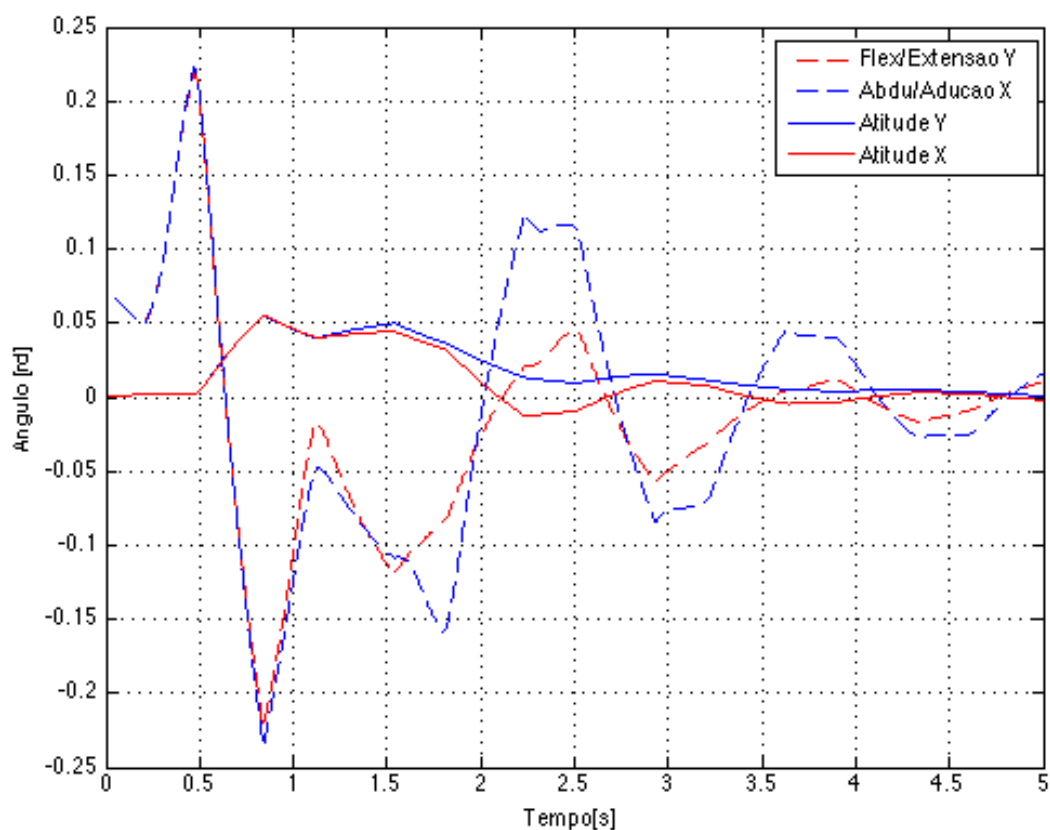


Figura 7 – Curva de resposta dos ângulos da junta universal (Abdução/Adução e Flexão/Extensão) e de atitude do corpo (Atitude X e Atitude Y).

4.4 Simulação de uma corrida

Na simulação de uma corrida, a máquina pula-pula atingiu uma velocidade máxima de aproximadamente 0,9 m/s. A corrida foi simulada ao longo do eixo x, e os ângulos de Flexão/Extensão e atitude Y de um ciclo de corrida foram plotados na Figura 8, retirados durante a aceleração da máquina pula-pula.

Observa-se nos resultados dos ângulos de atitude e da junta universal, forte semelhança com os ângulos encontrados para a pelve e quadril, durante a corrida de uma pessoa, Figura 9.

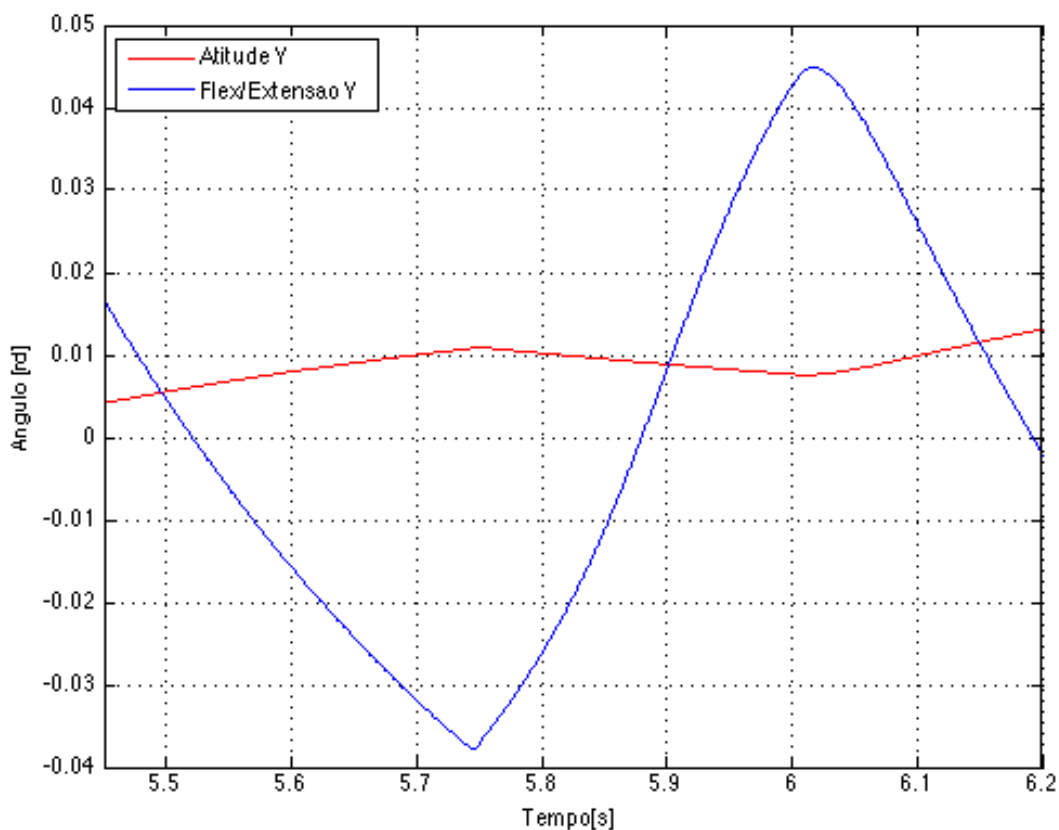


Figura 8 – Curva de resposta dos ângulos da atitude e de Flexão/Extensão da junta universal.

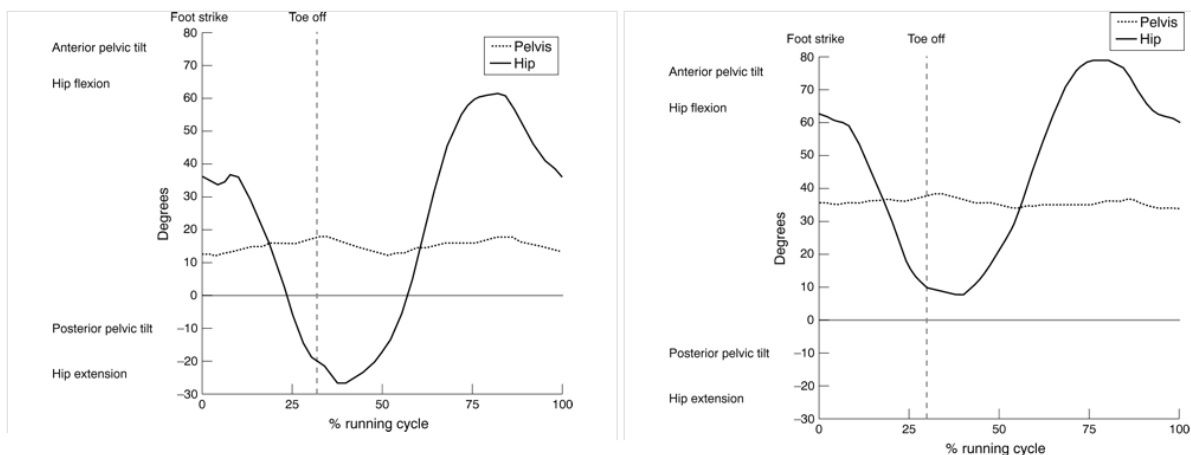


Figura 9 – Ângulos da pelve e quadril durante um ciclo de corrida de uma pessoa. Na esquerda: Pessoa que apresentou maior grau de extensão do quadril. Na direita: pessoa que apresentou menor grau de extensão do quadril.

Fonte: SCHACHE, BLANCH e MURPHY, 2000

4.5 Simulação de um percurso completo

A simulação do percurso completo pode ser dividida em 4 partes:

1. Queda e equilíbrio da máquina, entre 0 e 5 segundos. Aqui é onde começa a simulação, na posição $(x,y)=(0,0)$ na Figura 10. Durante os 5 primeiros segundos a máquina se desloca aproximadamente 0,5 metros do ponto inicial na direção x e na direção y.
2. Corrida ao longo do eixo x, tempo entre 5 e 10 segundos. A máquina percorre o trecho entre 0,5 metros e 3,7 metros como mostra na Figura 10.
3. Corrida ao longo do eixo y, tempo entre 11 e 17 segundos. O trecho percorrido corresponde à vertical da Figura 10, com posição em x aproximadamente constante e aproximadamente 3,7 metros, e a posição em y variando de 0,4 a -2,5 metros.
4. Corrida ao na diagonal, entre 18 e 24 segundos. Trecho representado pela linha diagonal na Figura 10.

Desta simulação foram retirados 3 gráficos:

- Figura 10: mostra o percurso da máquina, em função de x e y;
- Figura 11: Ângulos de atitude (X e Y) da máquina durante todo o percurso em triângulo;
- Figura 12: Ângulos da junta universal (Flexão/Extensão e Abdução/Adução).

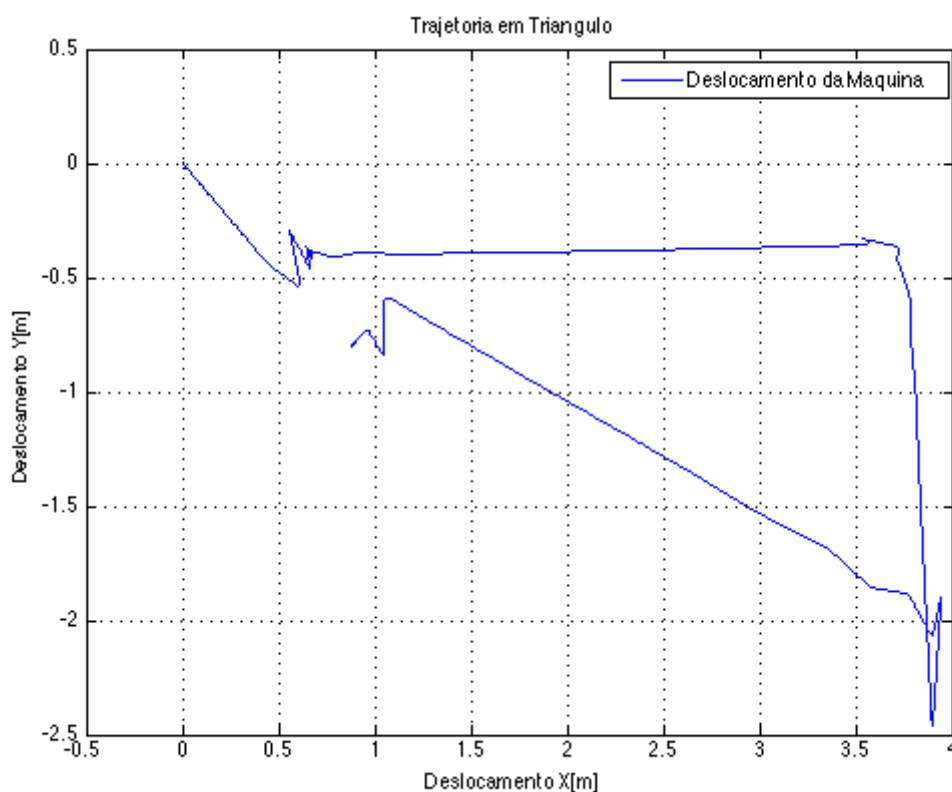


Figura 10 – Percurso da máquina, em função de x e y.

Na parte 1, a máquina cai com as com ângulo de 0,7 radianos na junta universal, na componente de Flexão/Extensão e de 0,7 radianos na componente de Abdução/Adução. A resultante vetorial desses ângulos é de 1 radiano, portanto as respostas dos ângulos da junta universal e da atitude do corpo, são idênticas às apresentadas na Figura 7, e podem ser identificadas na Figura 11 e Figura 12 para o tempo entre 0 e 5 segundos.

Na parte 2, a partir de 5 segundos, a máquina é acelerada de forma constante até a velocidade de aproximadamente 0,9 m/s. Aos 10 segundos é dado o comando para a máquina ficar em repouso, e é então bruscamente desacelerada para velocidade nula, gerando um pico negativo no ângulo da junta universal de Flexão/Extensão, que estabiliza após passados 3 segundos, aproximadamente.

Na parte 3, entre 11 e 17 segundos, a máquina é acelerada de forma constante como na parte 1, porém na direção do eixo y. Os ângulos que devem ser analisados são os de Abdução/Adução X, Figura 12, com respostas semelhantes às encontradas para a componente de Flexão/Extensão na parte 1 da simulação do percurso. Nesta parte a velocidade do x é aproximadamente nula, enquanto os

ângulos de Flexão/Extensão se equilibram para zero. Aos 17 segundos a máquina é bruscamente desacelerada para velocidade nula na componente y, resultando em 2 picos no valor do ângulo de Abdução/Extensão da junta universal, que logo começa a se estabilizar pelos próximos 3 segundos.

Na parte 4, as duas componentes da máquina são aceleradas simultaneamente, entre 18 e 24 segundos. Aos 24 segundos elas são bruscamente desaceleradas para velocidade nula.

A forma de dente de serra dos ângulos de atitude, como mostrado na Figura 11, é devido às fases de apoio e voo da máquina pula-pula. Na fase de voo, ao trazer a perna para frente do corpo, o ângulo de atitude aumenta devido à reação que o torque para movimentá-la causa no corpo. Na fase de apoio (estados COMPRESSÃO e IMPULSÃO) o ângulo de atitude é controlado para um valor menor, que é dado pela equação 7.

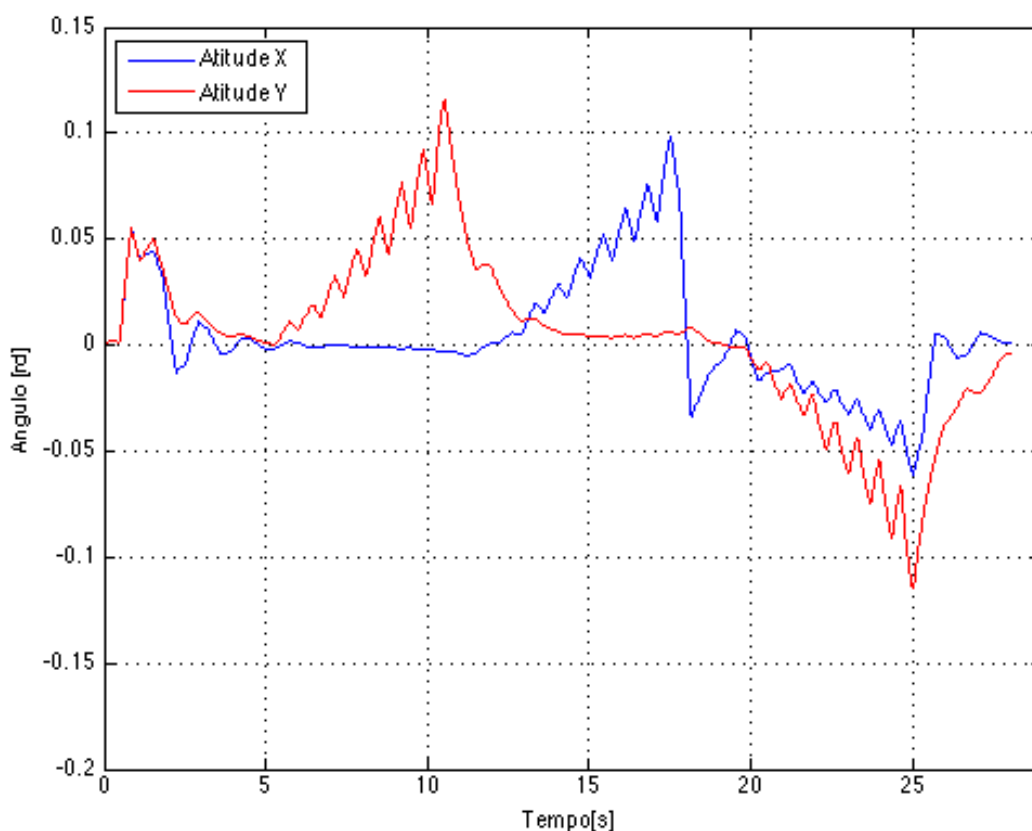


Figura 11 – Ângulos de atitude (X e Y) da máquina durante todo o percurso em triângulo.

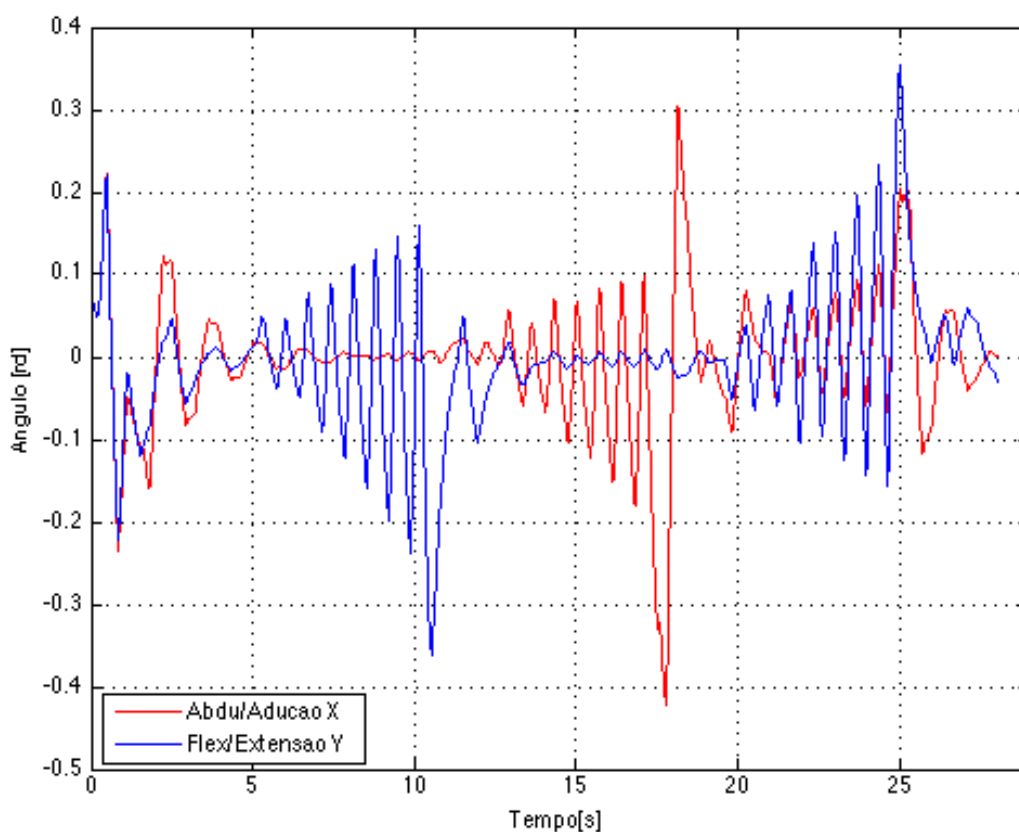


Figura 12 – Ângulos da junta universal (Flexão/Extensão e Abdução/Adução).

A posição da máquina pula-pula também pode ser observada em função do tempo, Figura 13. As curvas com inclinação variável indicam aceleração e desaceleração constante da máquina pula-pula. Fica mais fácil também visualizar os sobressinais que ocorrem nos tempos de 11 e 17 segundos, que ocorrem devido à mudança brusca na velocidade do robô, causando certa instabilidade. Quando a variação de velocidade foi constante, não houve sobressinal, e o equilíbrio ocorre de forma mais suave.

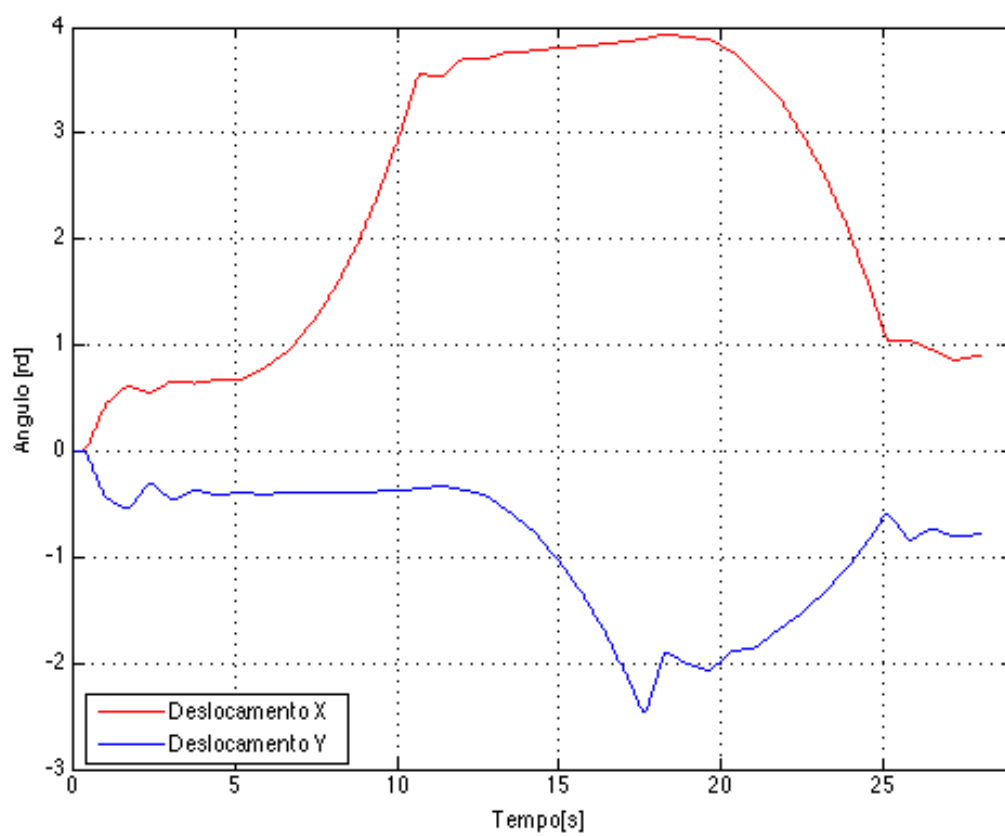


Figura 13 – Posição da máquina pula-pula em função do tempo.

5 MÁQUINA BÍPEDE

Raibert (1986) apresenta uma estratégia de controle que possui como princípio o mesmo das máquinas de uma perna. As máquinas pula-pula de uma perna, simuladas anteriormente, permitiram focar no controle sem o problema de ter que coordenar as interações de várias pernas. A estratégia para o controle de um bípede é decompor o comportamento do sistema em componentes conhecidas de sistemas de uma perna. Pode-se considerar que um bípede tem essencialmente as mesmas características de um robô de uma perna. É possível mostrar que um sistema com duas pernas pode correr como se tivesse apenas uma, se for considerado que a máquina usa uma perna para suporte de cada vez.

Algumas considerações importantes para o robô bípede:

- Uma perna fornece suporte de cada vez;
- Fases de suporte e voo ocorrem de forma alternada;
- Se uma perna deve retornar durante o suporte da outra perna, então ela deve ser capaz de se comprimir durante o retorno. A perna de retorno deve ser menor que a perna de suporte para que a máquina não tropece.

5.1 Construção do modelo no YSCS

Os parâmetros utilizados para a construção do modelo bípede no YSCS são os mesmos utilizados na construção do modelo de uma perna tridimensional. Porém foi utilizada uma força mínima de 220 N do atuador pneumático, enquanto que esta força era de 270 N no modelo de uma perna. Um parâmetro adicional importante é o deslocamento da perna em relação ao centro de massa do corpo. Este deslocamento é de 0,02 m para ambas as pernas. As pernas estão distantes uma da outra de 0,04 metros.

A Figura 14 mostra o robô bípede criado no YSCS. O eixo azul representa o eixo z, o eixo vermelho representa o eixo x, e o eixo branco representa o eixo y.

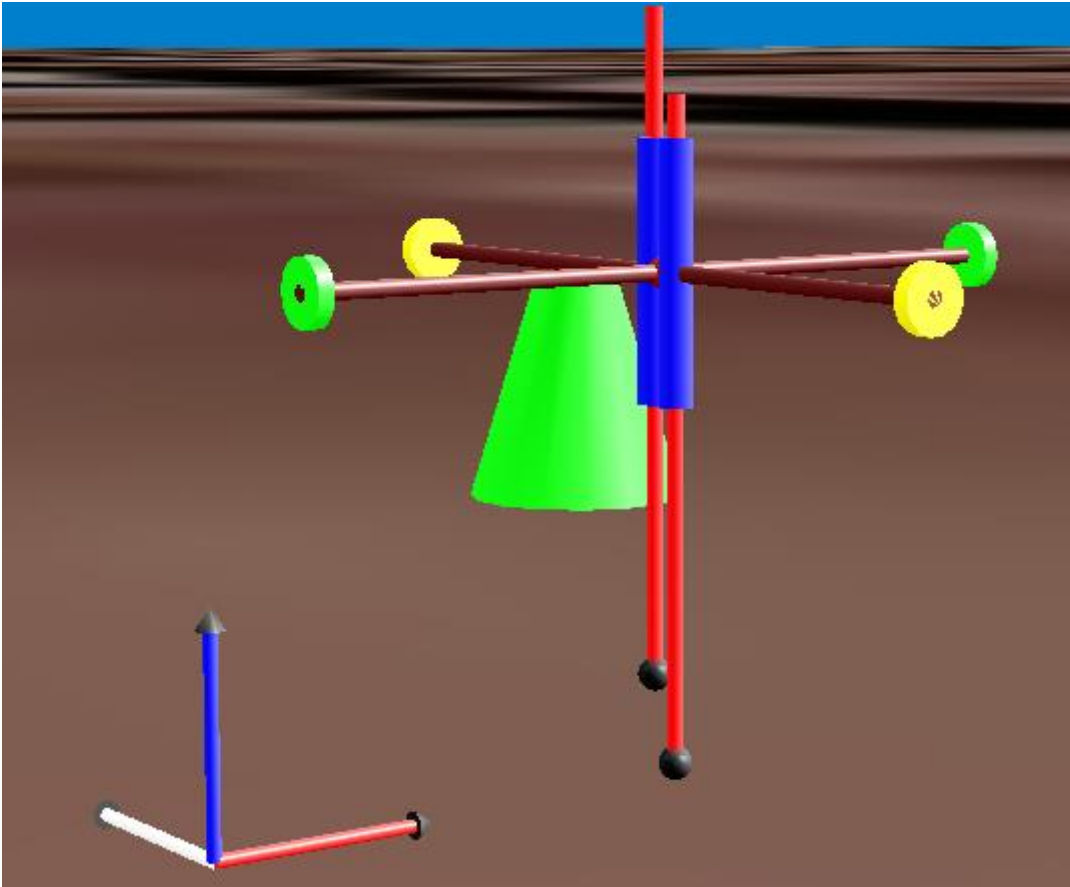


Figura 14 – Construção do modelo bípede tridimensional no YSCS.

5.2 Estratégia de controle

Para a implementação do controle uma máquina bípede tridimensional, surgem algumas dificuldades adicionais em relação à uma máquina de uma perna:

- A necessidade de um controlador diferente para a posição das pernas ao longo do eixo y , devido à um desequilíbrio causado pelas pernas fora do centro de massa do corpo.
- A implementação de um controlador para o encolhimento de uma perna enquanto a outra está na fase de apoio, para que a perna que estiver retornando não toque o solo enquanto a outra perna oferece suporte durante a compressão.
- Devido ao deslocamento do centro de massa, os torques na componente de Flexão/Extensão das juntas universais das duas pernas geram um torque ao longo do eixo z , e conseqüentemente, surge uma rotação ao longo deste eixo.

Esta rotação desequilibra a máquina, e deve ser encontrado uma forma de controlá-la.

5.2.1 Estado COMPRESSÃO

Controle ao longo do eixo x:

O controle ao longo do eixo x é dado pelos torques que controlam os ângulos de Flexão/Extensão das juntas universais. Devido ao deslocamento das pernas do centro de massa do corpo, estes torques causam um momento na direção z, que leva à uma rotação na mesma direção. Esta rotação gera um desequilíbrio na máquina bípede.

A estratégia de controle utilizada é feita utilizando os mesmos torques que a causam. O torque que controla a atitude do corpo na direção y, dado pela equação 13, deve também controlar esta rotação. Para isso foi adicionado mais um controlador à equação. A equação 20 controla o ângulo de atitude na direção y e a rotação na direção z.

$$\tau_z = -k_p(\phi_y - \phi_{dy}) - k_v(\dot{\phi}_y) + k_z(\phi_z) - kdz(\dot{\phi}_z) \quad (20)$$

Onde

ϕ_z é o ângulo do corpo no eixo z

$\dot{\phi}_z$ é a velocidade angular do corpo no eixo z

k_z é o ganho de realimentação do ângulo do corpo no eixo z

kdz é o ganho de realimentação da velocidade angular do corpo no eixo z.

O torque de Flexão/Extensão então controla a atitude do corpo, usando as rotações e velocidades em relação ao eixo y, e a rotação do corpo, com as rotações e velocidades angulares em relação ao eixo z.

Controle ao longo do eixo y:

Neste caso, o posicionamento das pernas fora do centro de massa do corpo geram a necessidade de um controle diferente. Os ganhos de realimentação são diferentes, e foram utilizadas duas correções para o ângulo desejado em relação ao eixo x, C_e e C_{de} . A equação 17 é modificada para a equação:

$$\tau_1 = -k_{p1}(\phi_x - \phi_{dx} - C_e) - k_{v1}(\dot{\phi}_x + C_{de}) \quad (21)$$

A equação 21 é usada no controle da perna esquerda no estado COMPRESSÃO. Para a perna direita os sinais de C_e e C_{de} são trocados. A correção C_e é necessária para alterar o ângulo de atitude desejado do corpo para que quando uma perna tocar o chão, o controlador coloque este ângulo em uma posição que aproxima o centro de massa do corpo para longo acima da perna de apoio. Quando isso ocorre o momento causado pelo deslocamento da perna em relação ao centro de massa diminui. A correção C_{de} é necessária para que quando uma perna deixar o solo, o corpo tenha velocidade angular suficiente para alterar o ângulo de atitude do corpo para aproximar o centro de massa do corpo para logo acima da perna de apoio.

No estado COMPRESSÃO é adicionado um controlador que não existia na máquina de uma perna: o encolhimento da perna que não está apoiando o corpo. Quando uma perna está comprimindo, é necessário que a outra encolha para que recupere sua posição sem tropeçar no solo.

$$F_z = -k_{uc}(L_s - 0,5) \quad (22)$$

Onde

F_z é a força vertical aplicada na perna em voo

L_s é a posição vertical da perna

k_{uc} é um ganho de realimentação

Este controlador aplica uma força que encolha a perna que está em voo para 0,5 m durante a compressão da outra perna.

Assim como na máquina de uma perna, no estado COMPRESSÃO, a máquina armazena a energia cinética da velocidade de queda em energia potencial elástica. A força vertical que freia a corpo devido à compressão de um gás no cilindro é dada também pela equação 19.

5.2.2 Estado IMPULSÃO

No estado IMPULSÃO as equações 20 e 21 continuam sendo utilizadas para o controle do ângulo de atitude do corpo em relação ao eixo x e ao eixo y. Neste estado a outra perna deve esticar-se novamente para se preparar para aterrissagem. Este controle é dado pela equação 23.

$$F_z = -k_{Uc}(L_s - 0,0) \quad (23)$$

A força F_z é aplicada para estender a perna em voo ao seu valor máximo.

A energia potencial acumulada no estado anterior é liberada para impulsionar a máquina. A força é dada pela equação 19, e tem um valor mínimo de 220 N.

5.2.3 Estado VOO

Para o posicionamento da perna no estado VOO, é utilizada a mesma estratégia de controle da máquina de uma perna, equações 12 e 16 para o torque, e equações 11 e 15 para calcular o ângulo desejado da perna.

Para a máquina bípede, este estado recebe um controlador para alternar a perna. No momento em que a perna de apoio deixa o solo, ambas as pernas estão em fase de voo. O controlador encolhe a perna que acaba de deixar o solo, para que a outra perna toque o solo no momento seguinte, alternando pernas. A força responsável é dada pela equação 24.

$$F_z = -k_{Ut}(L_s - 0,15) \quad (24)$$

5.3 Simulação de equilíbrio

Na simulação de equilíbrio, a máquina cai de uma altura de 0,2 metros com todos os outros ângulos de atitudes e das juntas universais igual a zero. A velocidade do corpo é aproximadamente zero, e a máquina se equilibra alternando as pernas. Devido à essa alternância, o ângulo de atitude do corpo varia para dar equilíbrio ao corpo, como explicado na seção 6.2.1. O ângulo da atitude na direção x do corpo e velocidade angular (taxa de variação do ângulo de atitude) da mesma componente são mostrados na Figura 15. Os valores máximos e mínimos do ângulo de atitude ocorrem no tempo em que a máquina está deixando o solo. Essa resposta do ângulo de atitude é desejada, pois aproxima o centro de massa do corpo para próximo do local que está logo acima da perna de apoio, dando maior equilíbrio.

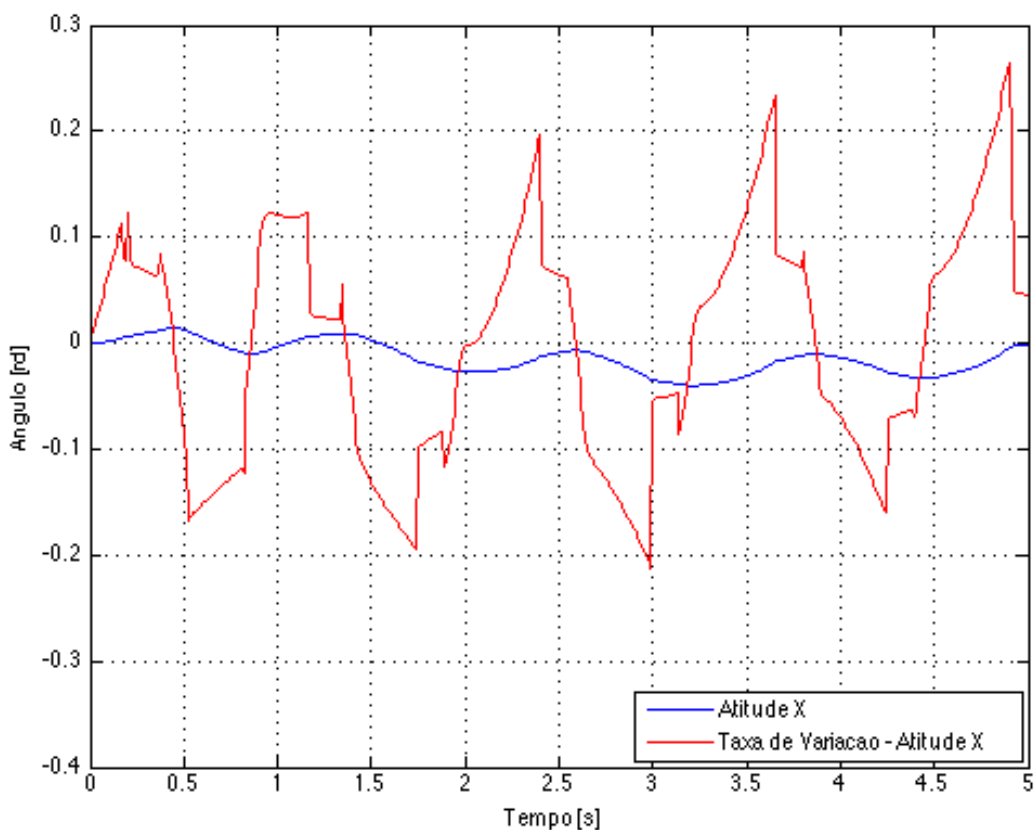


Figura 15 – Ângulo de atitude X e taxa de variação da atitude X (velocidade angular) no equilíbrio.

5.4 Simulação de uma corrida

Foram feitas duas simulações de corrida para a máquina: correndo no eixo x e correndo no eixo y.

5.4.1 Corrida no eixo x

Na simulação de uma corrida no eixo x, o corpo foi acelerado lentamente até uma velocidade de aproximadamente 0,8 m/s. Após atingir esta velocidade, a máquina foi desacelerada até velocidade nula. A resposta do ângulo de atitude Y do corpo e da junta universal são mostradas na Figura 16. Como a máquina possui duas pernas, ela também possui duas juntas universais. A resposta para o ângulo da junta universal foi retirada da perna direita.

Pode-se ver que o ângulo de atitude é negativo para uma velocidade positiva da máquina neste caso, o contrário do que seria esperado normalmente. Esta resposta pode ser causada pelo torque que controla a atitude também controla o ângulo de

rotação do corpo no eixo z, porém análises mais aprofundadas devem ser feitas para identificar as causas deste resultado, considerado anômalo, e possíveis soluções.

A Figura 17 mostra o trajeto percorrido pela máquina. A máquina se distancia aproximadamente 1 metro da posição esperada nos 35 segundos de simulação.

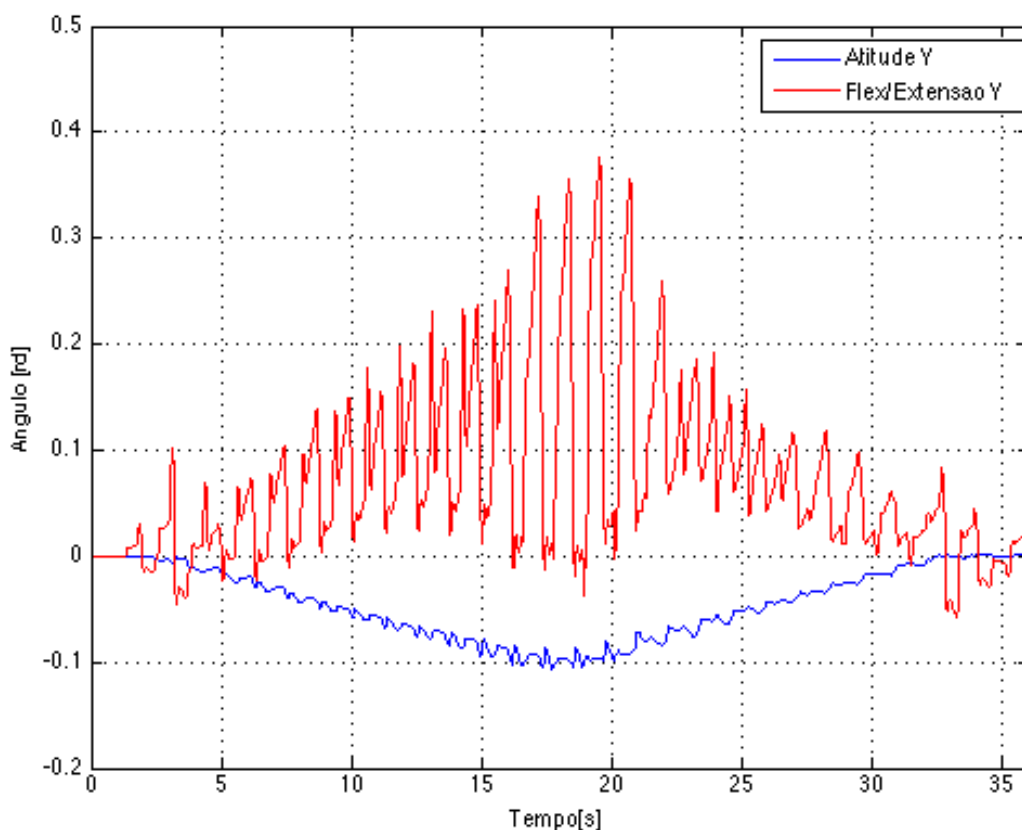


Figura 16 – ângulos de atitude e da junta universal da perna direita durante uma corrida com aceleração e desaceleração do bípede, na direção x.

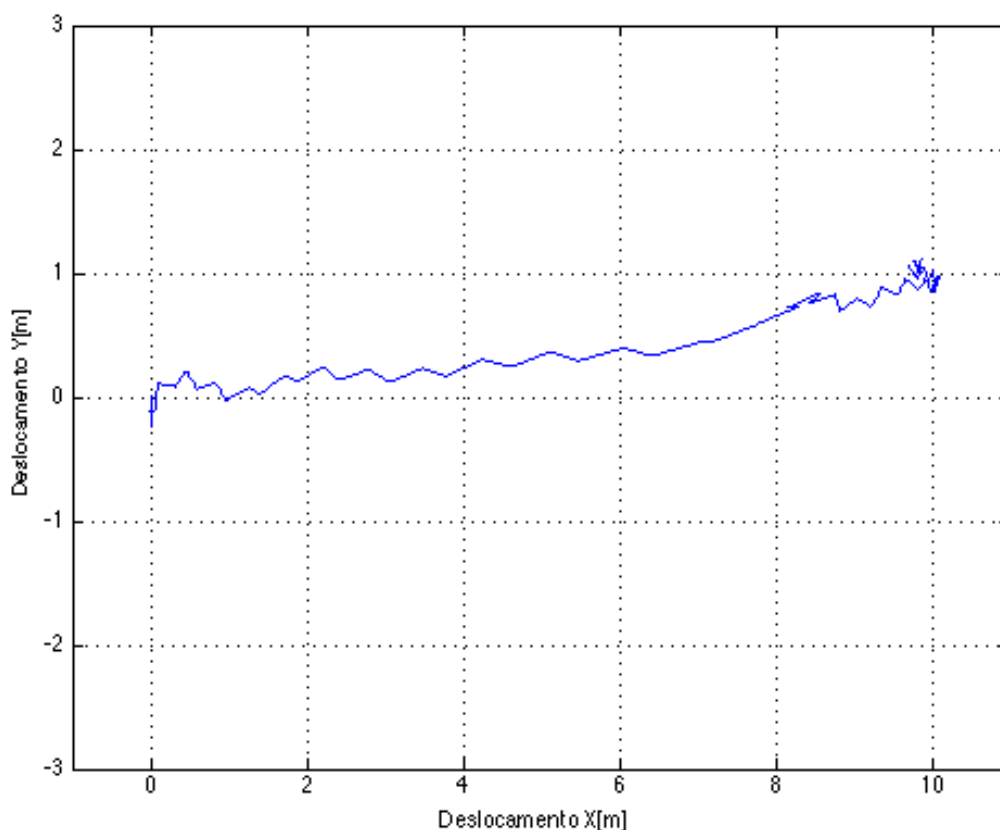


Figura 17 – Trajeto percorrido pelo bípede durante a simulação da corrida na direção x.

5.4.2 Corrida no eixo y

Na simulação de uma corrida no eixo y, a máquina foi acelerada até uma velocidade de aproximadamente 1,8 m/s e em seguida desacelerada até velocidade nula. A máquina corre “de lado”, ou seja, com movimentos de adução e abdução da perna. Neste caso a máquina pôde correr com uma velocidade maior, pois as pernas não causam momento de giro no eixo z do corpo. As respostas dos ângulos de atitude do corpo e da junta universal da perna direita são mostradas na Figura 18.

O ângulo de atitude da máquina é positivo como esperada, por não haver a necessidade de controle da rotação do corpo no eixo z.

A máquina percorreu ao longo do eixo y de forma precisa, sem deslocamento lateral em relação à trajetória.

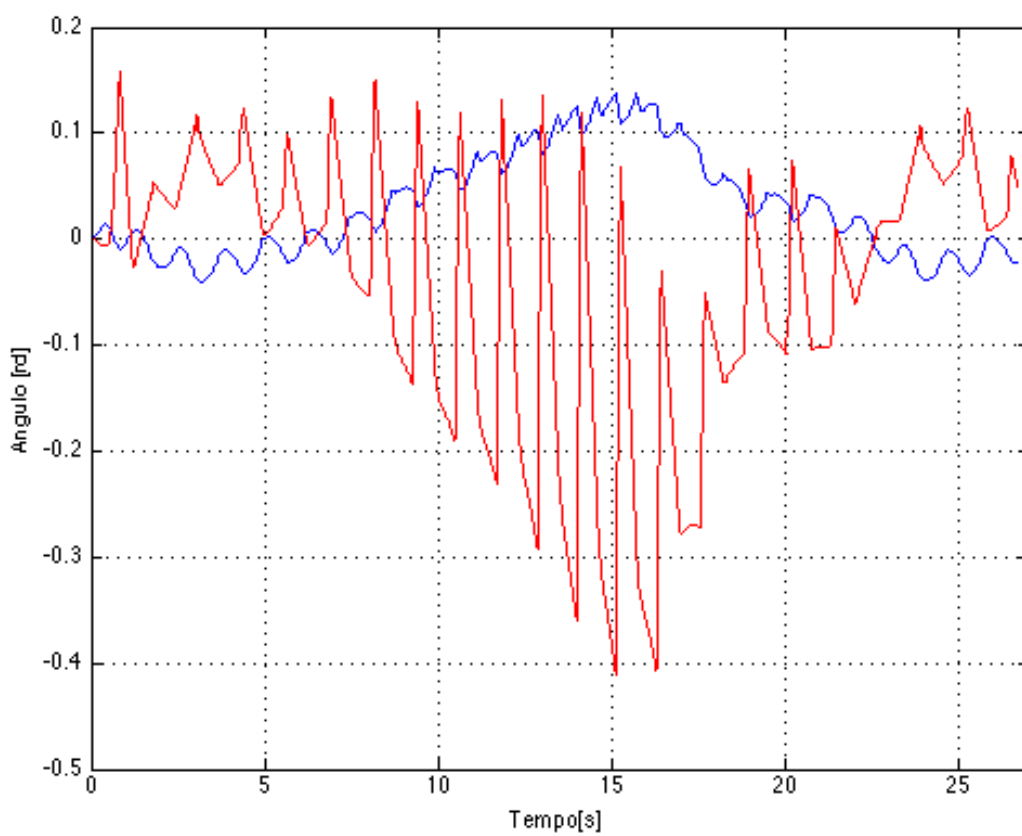


Figura 18 – ângulos de atitude e da junta universal do bípode durante a corrida com aceleração e desaceleração na direção y.

6 CONCLUSÃO

Este projeto de graduação apresenta a simulação de uma máquina pula-pula em três dimensões, com a finalidade de validar a estratégia de controle de uma máquina plana inicialmente desenvolvida no projeto de graduação de Maia e Junior (2012), quando aplicada à uma máquina tridimensional. A máquina pula-pula plana é baseada na máquina descrita por Raibert (1986).

As respostas obtidas do controle à simulação de uma queda com ângulo inicial da perna de 0,1 radiano e à simulação de uma corrida foram bastante satisfatórias. A máquina pula-pula correu em linha reta a uma velocidade constante e observou-se, nos resultados dos ângulos de atitude e da junta do quadril, forte semelhança com os ângulos encontrados para a pelve e quadril, durante a corrida de uma pessoa, como descrito pelo modelo SLIP (BLICKHAN, 1989). Também foi observada uma boa capacidade do controle em seguir uma trajetória fechada formando um triângulo retângulo, sendo observado pouco ou nenhum sobressinal nos vértices de mudança de direção, o que confirma a utilidade da estratégia de controle da máquina plana quando aplicada à máquina 3D, conforme proposto em Raibert (1986).

Foi implementado também no YSCS, um robô bípede com a mesma cinemática da perna 3D, sendo o corpo do bípede com as mesmas propriedades inerciais do corpo da perna 3D. Para controlar a máquina bípede, entretanto, a aplicação da estratégia de controle foi adaptada com a inclusão de três controladores adicionais. No bípede surge a necessidade de coordenar os movimentos das pernas, o que demandou um controlador do movimento para elevar e baixar as pernas, cujas trajetórias de voo e apoio devem estar adequadamente defasadas para que o ciclo em voo termine sem a colisão dos pés no solo, e também o controle da rolagem do quadril, reação resultante da ação de elevar e baixar as pernas. Finalmente, devido à posição do centro de massa do corpo, fora da linha de ação da reação ao movimento de avanço da perna, os torques das juntas universais que movem as duas pernas geram um torque no eixo vertical, de guinada, para o qual também foi necessário um controlador. Comparando com o andar humano, rotação em Z (guinada do quadril) seria a rotação pélvica, e é a rotação involuntária do tronco ao andar ou correr que ajuda a estabilizá-la.

Em relação à validação da aplicação da estratégia de controle, com as devidas adaptações que foram realizadas, esta possibilitou a obtenção de respostas em termos da atitude e guinada do corpo e de rolagem e guinada do quadril bastante satisfatórias, conforme mostraram os resultados, e também pela capacidade de equilibrar-se do bípede, sendo então considerada uma estratégia útil tanto na máquina pula-pula 3D como no bípede.

Como recomendação para trabalhos futuros, uma forma de melhorar o controle para a guinada do quadril, poderia ser inserção no modelo de uma junta rotativa, como a junta flutuante, e a implementação do controle para variável de torque correspondente, a partir de um movimento angular do corpo do bípede na direção z, como no caso do corpo humano, cujas reações seriam os torques adequados para estabilizar esta variável, como o movimento dos braços e torção do tronco. O inconveniente desta alternativa é que, na implementação de um protótipo desse modelo, seria necessário um atuador rotativo nessa junta, entre o corpo e o quadril, para realizar o movimento angular do corpo. Também como trabalhos futuros, seria a implementação de um bípede com pernas antropomórficas com 5 graus de liberdade e a adaptação da estratégia de controle ao novo modelo de perna.

8 REFERÊNCIAS

Eclipse Luna. Disponível em: <<https://eclipse.org/>>. Acesso em: 17 dez. 2014.

IHMC - Florida Institute for Human and Machine Cognition. Disponível em: <<http://www.ihmc.us/>>. Acesso em: 17 dez. 2014.

BLICKHAN, R. **The Spring-Mass Model for Running and Hopping.** Concord Field Station, Harvard University, Bedford: Pergamon Press plc, v. 22, 1989.

DOLLAR, A. M.; HERR, H. **Design of a Quasi-Passive Knee Exoskeleton to Assist Running.** [S.I.]: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. 747-754 p.

IHMC - Florida Institute for Human and Machine Cognition. **Humanoid Robots.** Disponível em: <<http://robots.ihmc.us/humanoid-robots/>>. Acesso em: 17 dez. 14.

IHMC. **SimulationConstructionSet,** 2013. Disponível em: <<http://www.ihmc.us/groups/scs/>>. Acesso em: 06 nov. 2014.

M2. **MIT Leg Laboratory.** Disponível em: <<http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/m2/m2.html>>. Acesso em: 17 dez. 2014.

MAIA, A. H.; JUNIOR, S. L. **Simulação de uma Máquina Pula-Pula Plana como Ferramenta de Desenvolvimento de Robôs a Pernas e Exoesqueletos.** Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 681 p.

NIIYAMA, R.; NISHIKAWA, S.; KUNIYOSHI, Y. **Athlete Robot with Applied Human Muscle Activation Patterns for Bipedal Running.** [S.I.]: IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2010.

RAIBERT, M. H. **Legged Robots That Balance.** Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1986.

SCHACHE, A. G.; BLANCH, P. D.; MURPHY, A. T. **Relation of anterior pelvic tilt during running to clinical and kinematic measures of hip extension.** [S.l.]: British Journal of Sports Medicine, 2000.

SPONG, M. W. **The Swing Up Control problem For The Acrobot.** IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego: [s.n.]. 1994.

THE MathWorks, Inc. **Matlab.** Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

WALSH, C. J. et al. **Development of a lightweight, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation.** [S.l.]: Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom, 2006. 3485-3491 p.