

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM ROBÔ BÍPEDE

Daniel Carmona de Campos

Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Mecânica Computacional.

Carlos André Dias Bezerra

Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Mecânica. cadb@ufc.br

Douglas Eduardo Zampieri

André Mendeleck

Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Mecânica Computacional.

Resumo

A necessidade de locomoção em ambientes sujeitos a alterações dinâmicas é uma realidade. O robô bípede vem atender a estas necessidades, pois tem a capacidade de locomoção em ambiente tridimensional, onde os robôs móveis com rodas geralmente não podem acessar. O objetivo deste trabalho é a concepção, modelagem cinemática e simulação de um robô móvel do tipo bípede, semelhante à uma estrutura antropomórfica com três rotações por perna. Metodologicamente o trabalho será dividido em duas etapas: determinação das equações do modelo cinemático, através das restrições do sistema mecânico e simulação do movimento do robô bípede em código MATLAB[®].

Palavras-chave: Robô Bípede, Modelo Cinemático, Estrutura Híbrida, Simulação Computacional.

1. INTRODUÇÃO

A substituição de mão de obra humana por sistemas automatizados e autômatos junto à sociedade é uma tendência decorrente da evolução tecnológica no mundo moderno. O estudo da locomoção sobre pernas é um dos mais desafiantes problemas relacionados com a robótica, pois os robôs que se locomovem sobre duas pernas são menos estáveis do que os robôs móveis com mais de 2 pernas, quadrúpedes e hexápodes, por exemplo.

Ao longo dos últimos anos, muitos pesquisadores têm sido atraídos para a área de sistemas robóticos bípedes (Raibert, 1986) devido a sua semelhança antropomórfica e ao potencial de mobilidade similar a do ser humano, que o permite subir escadas, andar em áreas contendo obstáculos, superfícies inclinadas e rugosas e até mesmo andar sem atuadores (McGeer, 1990). Além disso, os robôs bípedes apresentam potencial para uso em áreas perigosas ao ser humano, uso militar, reabilitação de deficientes físicos entre outros. Todavia, nenhum dos robôs bípedes até agora estudados apresentam a mobilidade e destreza humana (Lum *et al.*, 1999), pois os modelos usados são simplificados através da redução do número de graus de liberdade, da substituição das juntas por uniões de rotação e ao se considerar os segmentos como corpos rígidos (Popovic *et al.*, 1999).

Desde 1968 (Frank, 1968) várias técnicas de modelagem e controle têm sido propostas (Hemami and Wyman, 1979; Raibert; 1986; Furusho and Masubuchi, 1986 e Vukobratovic *et al.*, 1990) para solucionar o principal problema inerente ao robô bípede, que é a sua instabilidade durante a fase em que somente um pé está em contato com o chão. Porém, foi

somente em 1973 que o primeiro robô bípede, o WL-5, foi projetado, construído e citado na literatura científica por Kato e seus colegas (Kato *et al.*, 1974).

O modo de andar de um robô bípede é obtido através do movimento alternado de suas pernas, excetuando-se os robôs que pulam (Raibert, 1986). Pode-se dizer que o modo de andar (*gait*) é constituído por duas etapas distintas: bi-apoiada (*Stance fase*) quando os dois pés do robô bípede estão em contato com o chão e balanço (*Balance fase*) quando somente um dos pés está apoiado no chão. Nesta última etapa a perna que não se encontra apoiada é denominada de perna em balanço (*Swinging leg*).

Propõe-se neste trabalho obter o modelo cinemático de um robô bípede, bem como simular seu modo de andar, quantificando as variações de suas grandezas cinemáticas. A partir das equações que definem a cinemática da estrutura do robô bípede, será obtida a posição, a velocidade e a aceleração do centro de gravidade de cada segmento que compõe o robô. A simulação será realizada no software MATLAB[®]. Através de gráficos será analisado o movimento do robô, utilizando como parâmetros a posição dos segmentos ao longo do tempo, bem como suas velocidades e acelerações e a variação dos ângulos de cada junta.

2. MODELAGEM CINEMÁTICA DO ROBÔ BÍPEDE

O robô bípede (figura 1), a ser simulado computacionalmente, é constituído por 7 corpos: pé direito – segmento 1, canela direita – segmento 2, coxa direita – segmento 3, bacia – segmento 4, coxa esquerda – segmento 5, canela esquerda – segmento 6 e pé esquerdo – segmento 7. Todas 6 juntas de união entre os segmentos são de rotação, com 1 grau de liberdade, sendo desprezado o atrito entre elas. Cada junta é movida por um atuador independente.

O modo de andar do robô bípede neste trabalho será considerado simétrico e periódico. O robô sairá da posição inicial, que corresponde aos pés juntos e pernas eretas e após o segundo passo entrará em regime permanente.

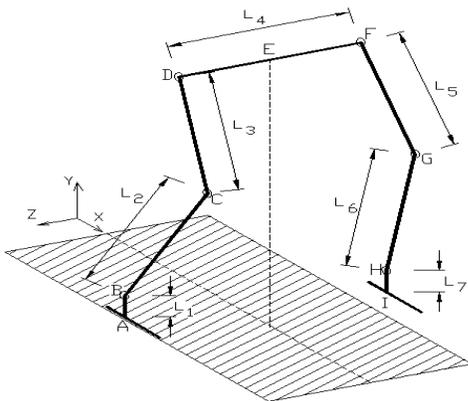


Figura 1. Vista 3D do robô bípede

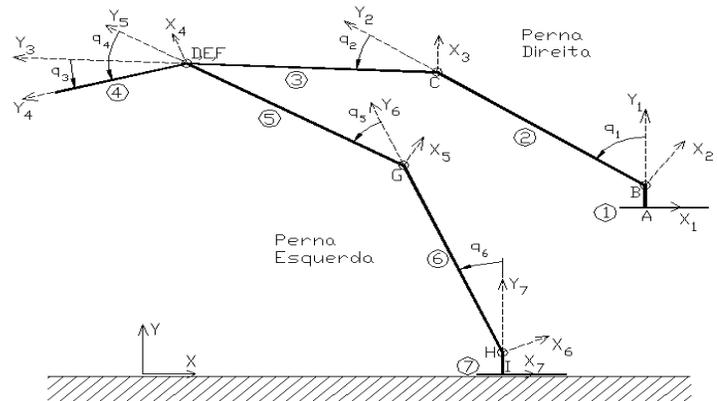


Figura 2. Bases móveis do robô bípede (Mita *et al.*, 1984)

O modelo matemático que descreve o movimento do robô bípede é obtido a partir dos seus parâmetros geométricos de acordo com as figuras 1 e 2. A bacia, representada pelo segmento D, E, F, é articulada (q_3, q_4) em relação às duas pernas, servindo de suporte às mesmas.

Neste trabalho os centros de gravidade de cada segmento estão posicionados nas juntas, pois a massa dos atuadores é relativamente grande em relação a massa de cada segmento.

Com relação aos pés, estes sempre se mantêm paralelos ao solo, ou seja, não sofrem nenhuma rotação ao longo de todo movimento. Mesmo em balanço, o pé permanecerá paralelo através de controle local (*local feedback*, Mita *et al.*, 1984) de um atuador.

As coordenadas generalizadas neste modelo são representadas pelos ângulos relativos q_i ($i=1,\dots,6$), todos definidos como positivos na direção de Z inercial (figura 2). Estes ângulos são dados por rotações das base móveis B_i ($i=1,\dots,7$), uma em relação a outra (q_1 é a rotação da base B2 em Z em relação a B1, por exemplo). Cada base é solidária a seu respectivo segmento. Assim a base B3 é solidária ao corpo 3 (coxa direita) e assim por diante.

Quando o robô bípede realiza um passo, o sistema mecânico que o descreve possui 5 graus de liberdade, cuja equação de restrição é dada por

$$q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 - q_6 = 0 \quad (1)$$

Para o caso do pé direito fixo ao chão, q_6 é determinado em função das outras coordenadas, enquanto que no caso do pé esquerdo fixo ao chão, a incógnita será q_1 . Esta simplificação é possível, já que os pés sempre estão paralelos entre si.

Considera-se na simulação que o robô bípede se locomove em uma superfície plana e horizontal, que o impacto entre o pé e o chão é perfeitamente inelástico e que não existe deslizamento entre os pés do robô e a superfície de locomoção. Além disso, considera-se o movimento somente no plano sagital, que é o plano perpendicular ao eixo Z formado pelos eixos XY.

A partir dos parâmetros das figuras 1 e 2, pode-se obter as coordenadas do centro de gravidade das juntas de cada segmento em relação ao referencial inercial.

Considerando-se o pé esquerdo em balanço (pé direito como suporte), obtém-se:

$$\begin{aligned} x_{AI} &= -l_2 \sin(q_1) - l_3 \sin(q_1 + q_2) + l_5 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) + l_6 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) \\ y_{AI} &= l_1 + l_2 \cos(q_1) + l_3 \cos(q_1 + q_2) - l_5 \cos(q_1 + q_2 + q_3 - q_4) - l_6 \sin(q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5) - l_7 \\ z_{AI} &= -l_4 \end{aligned} \quad (2)$$

A equação representa a posição do ponto I a partir do ponto A na base inercial. Mas também descreve a posição dos outros pontos, já que o robô nesta situação é uma cadeia cinemática aberta, bastando eliminar coerentemente alguns termos da equação.

Analogamente, considerando-se o pé direito em balanço (pé esquerdo como suporte), obtém-se:

$$\begin{aligned} x_{IA} &= -l_6 \sin(q_6) - l_5 \sin(q_5 + q_6) + l_3 \sin(-q_3 + q_4 + q_5 + q_6) + l_2 \sin(-q_2 - q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \\ y_{IA} &= l_7 + l_6 \cos(q_6) + l_5 \cos(q_5 + q_6) - l_3 \cos(-q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - l_2 \cos(-q_2 - q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - l_1 \\ z_{IA} &= l_4 \end{aligned} \quad (3)$$

Observa-se que o sistema é simétrico, pois as equações tem o mesmo formato, variando-se apenas os índices.

Para se obter as velocidades e as acelerações, basta derivar sucessivamente as equações (2) e (3) em relação ao tempo. Estas passagens serão omitidas neste trabalho.

3. SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas em código MATLAB[®] e representam a trajetória dos centros de gravidade de cada segmento. Como não existe rotação de nenhum segmento em relação ao eixo X ou Y, o movimento se limita ao plano XY.

Foi adotada a cinemática inversa como metodologia para movimentação do robô, ou seja, foi estabelecida a trajetória dos pés (pontos A e I) e da cintura (pontos D, E e F). Uma vez estabelecida a trajetória do pé em balanço e da bacia e o tempo de cada, pode-se calcular a posição dos joelhos e de todos os ângulos q_i em cada instante de tempo, pois como o robô bípede em balanço é um sistema de 5 graus de liberdade, ao se estabelecer a posição do pé e da bacia, 4 restrições foram estabelecidas (coordenadas X e Y de cada um) e, assumindo-se que a bacia não sofre rotação em relação ao sistema inercial, o sistema se torna totalmente determinado.

Para a determinação da melhor trajetória a ser seguida em função do acionamento das juntas, Vukobratovic *et al.* (1990) adotaram o modelo humano, ou seja, foram obtidos dados através de medições do modo de andar de pessoas. Bay e Hemami (1987) utilizaram o Gerador Central de Padrões (CPG) para gerar movimentos rítmicos das pernas. Katoh e Mori (1984) usaram um par de osciladores de van der Pol para gerar padrões de passos para o robô bípede BIPMAN. Cheng e Lin (1997) propuseram um algoritmo genético para a determinação da trajetória ótima.

Neste trabalho, foi estabelecida por trajetória dos pés em cada passo (*step*) meia senóide ou meia elipse. Especificando-se o ponto de início, a amplitude (altura do chão) e a distância em X de cada passo, a trajetória do pé se torna totalmente conhecida, tanto para a função senoidal, quanto para função elíptica (figuras 3 e 4). Considerou-se também que tanto a bacia quanto o pés possuem velocidades lineares constantes na direção X e que a fase bi-apoiada é instantânea.

Dos diversos robôs bípedes já construídos, observou-se que a bacia em alguns casos mantém-se com uma distância constante em relação ao solo. No entanto ao se observar o modo de andar humano, nota-se que existe uma variação de altura periódica em relação ao chão. Assim neste trabalho foi estabelecido que a bacia percorre uma trajetória senoidal em Y de pequena amplitude e, portanto, mantém uma altura média constante em relação ao solo. O mínimo desta função senoidal ocorre quando os dois pés estão apoiados no solo e seu máximo ocorre durante o balanço quando a bacia está na mesma vertical do centro do pé de apoio, semelhante ao modo de andar humano, conforme pode-se observar nas figuras 3 e 4.

4. RESULTADOS

Nas simulações utilizou-se os seguintes valores:

- *pernas* $l_2 = l_3 = l_5 = l_6 = 100$ mm
- *pés* $l_1 = l_7 = 10$ mm
comprimento da ponta dos pés = 15 mm
- *bacia* altura mínima da bacia em relação ao solo = 200 mm
amplitude de oscilação da bacia = 2 mm
- *obstáculos* 7 por 7 mm
- *passos* amplitude dos passos (altura máxima do solo) = 15 mm
distância de um passo em X (regime permanente) = 50 mm
distância de um passo em X (regime transitório) = 25 mm
período de 1 passo = 1 s
- *iterações* 30 por passo

Substituindo-se os parâmetros acima nas equações anteriores obtém-se as figuras 3 e 4.

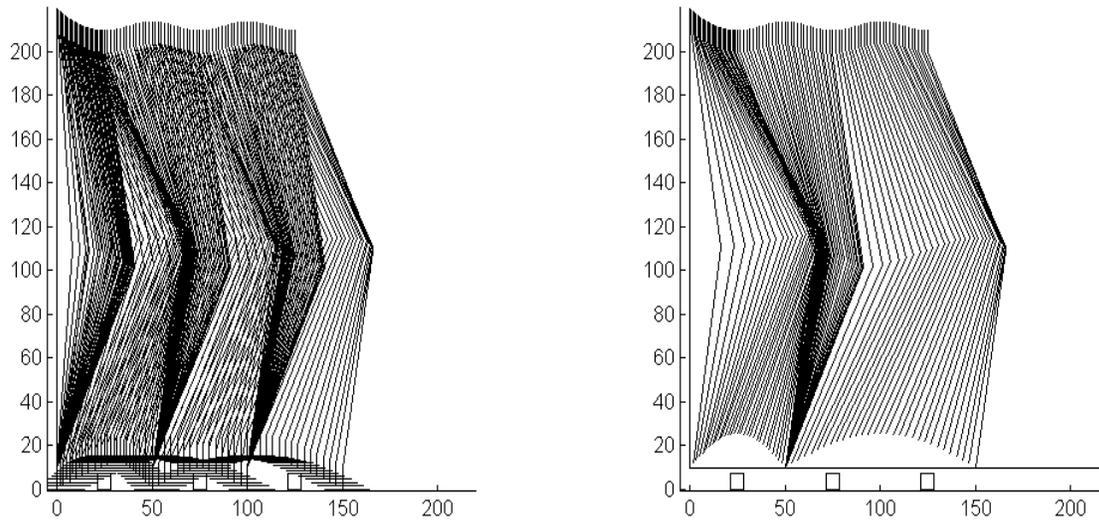


Figura 3. Modo de andar, trajetória Senoidal do pé (Figura 3b perna esquerda) [mm]

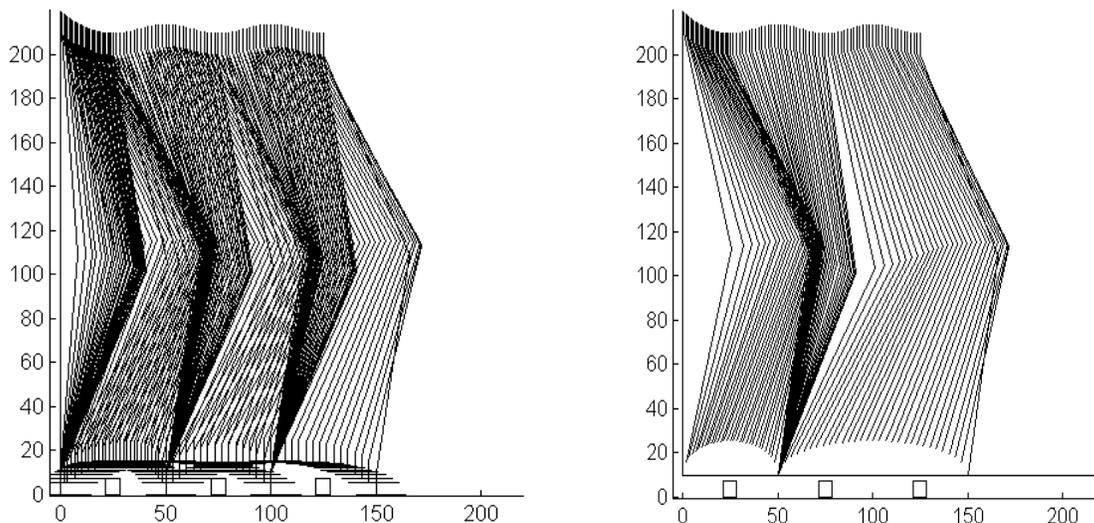


Figura 4. Modo de andar, trajetória Elíptica do pé (Figura 4b perna esquerda) [mm]

Como pode ser observado nas figuras 3b e 4b, para ambas as curvas a amplitude em Y e a distância de cada passo em X são as mesmas.

Nota-se, também, nas figuras 5 e 6 que para ambas trajetórias ocorre a mesma periodicidade para os ângulos de juntas simétricas, como era de se esperar. Além disso, verifica-se não existir grandes diferenças entre ambas trajetórias.

As figuras 7 e 10 mostram o deslocamento das juntas em função do tempo. O deslocamento de cada junta j ($j=A, \dots, I$) é representado por P_{jx} para deslocamento na direção inercial X e P_{jy} , para deslocamento na direção Y. Mais uma vez, pode-se observar a simetria das juntas B e H (tornozelos) e C e G (joelhos). As juntas A e I também são simétricas, mas não foram apresentadas pois seus gráficos são semelhantes a B e H, respectivamente.

De modo análogo, nas figuras 8 e 11 as velocidades são representadas por V_{jx} e V_{jy} e nas figuras 9 e 12 as acelerações por A_{jx} e A_{jy} .

Durante a transição que a perna em balanço passa da perna direita para a perna esquerda, ou vice-versa, ocorrem impactos que causam descontinuidades nas equações de movimento do modelo físico (Lum *et al*, 1999).

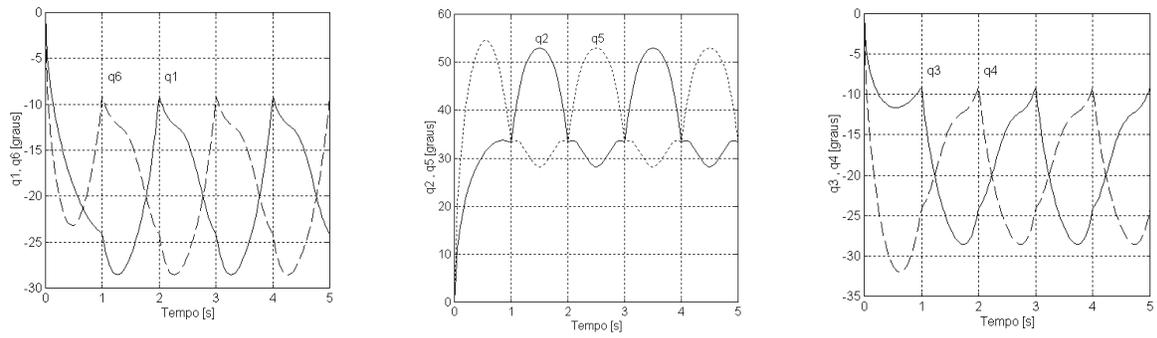


Figura 5. Ângulos q_i x tempo (pés com trajetória Senoidal)

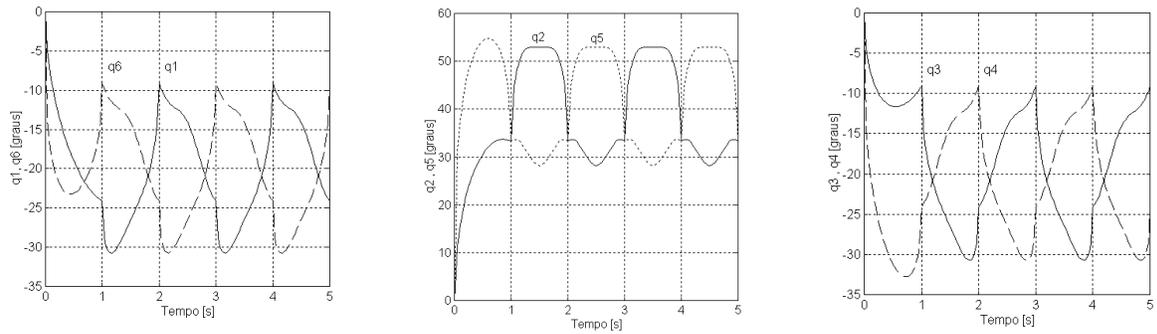


Figura 6. Ângulos q_i x tempo (pés com trajetória Elíptica)

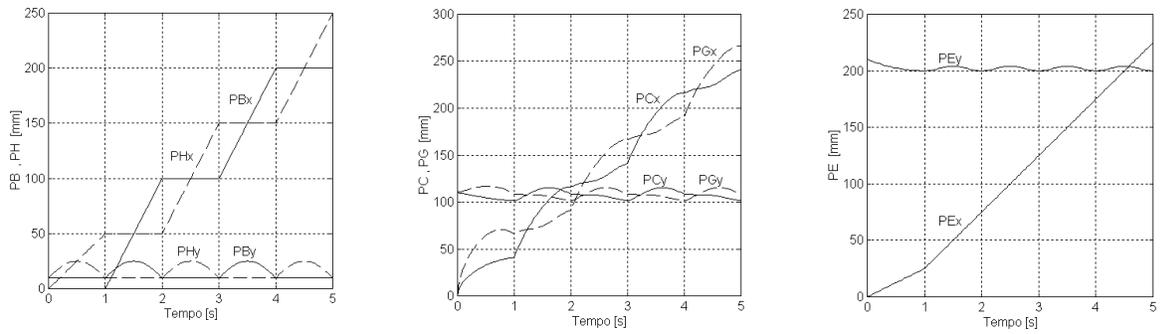


Figura 7. Deslocamento das juntas x tempo (pés com trajetória Senoidal)

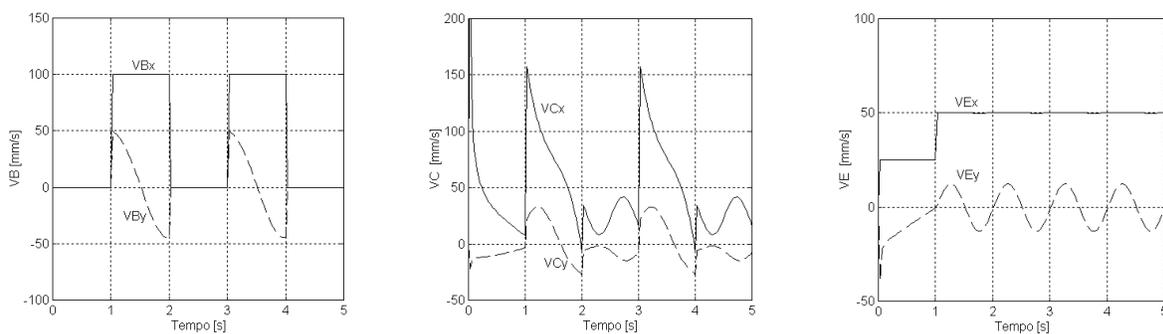


Figura 8. Velocidade das juntas x tempo (pés com trajetória Senoidal)

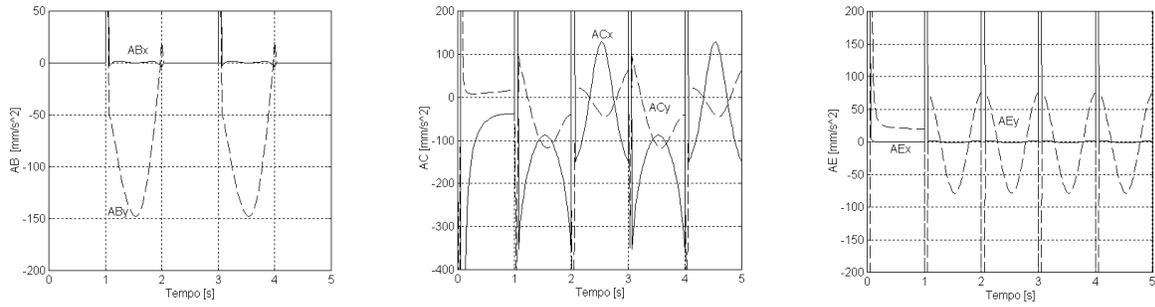


Figura 9. Aceleração das juntas x tempo (pés com trajetória Senoidal)

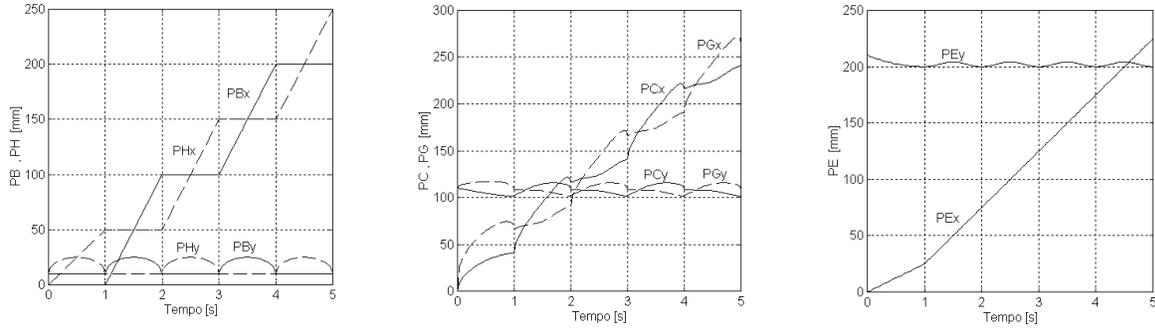


Figura 10. Deslocamento das juntas x tempo (pés com trajetória Elíptica)

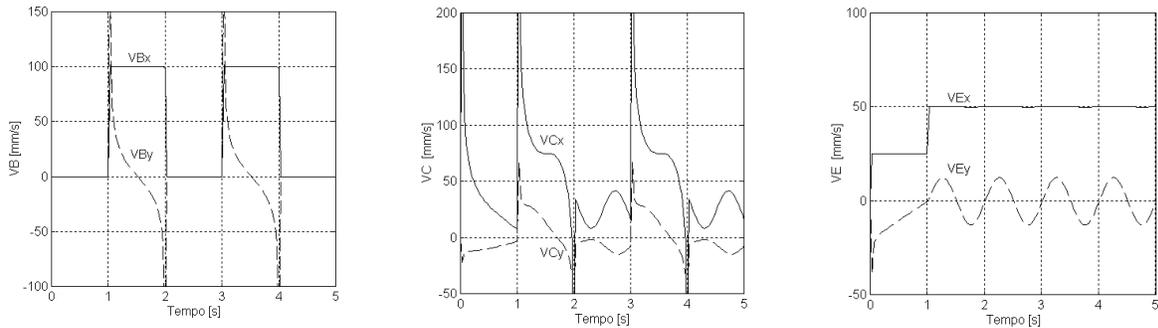


Figura 11. Velocidade das juntas x tempo (pés com trajetória Elíptica)

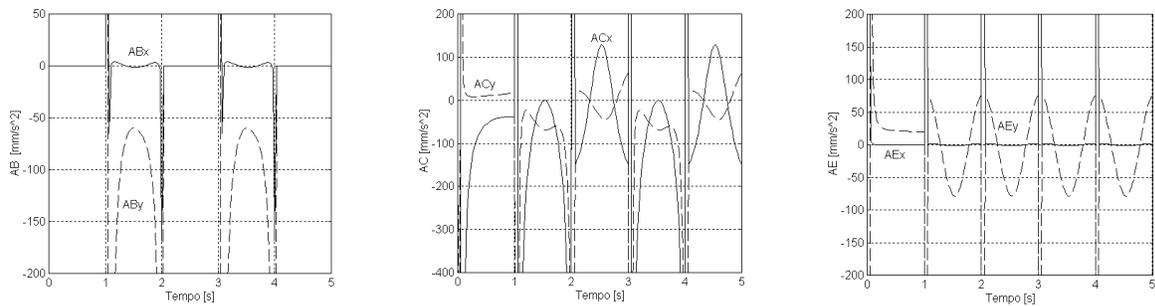


Figura 12. Aceleração das juntas x tempo (pés com trajetória Elíptica)¹

Como os pontos B e H são simétricos, tanto a velocidade quanto a aceleração só foram apresentadas para a junta B, já que as curvas de H são idênticas apenas deslocadas em fase no tempo em regime permanente. O raciocínio é similar para as juntas C e G.

¹ As variações de ABx, por exemplo, entre os instantes 1 e 2, 3 e 4 devem-se ao pequeno número de iterações ($ABx_{teórico} = 0$), já que tanto as acelerações como as velocidades são obtidas a partir de cálculos discretos dos deslocamentos.

A velocidade do ponto E (bacia) na direção X em regime permanente é constante em 50 mm/s e a velocidade do pé (ponto B ou H) varia entre 0 e 100 mm/s dependendo do instante de tempo, mas a cada 2 s (ou dois passos) a velocidade média de B ou H também é igual a 50 mm/s, mostrando que tanto o pé como a bacia apresentam mesma velocidade média.

5. CONCLUSÃO

A simulação apresentada permitiu validar o modelo proposto para o modo de andar do robô bípede com 7 segmentos no plano sagital. Através da mesma pôde-se visualizar a trajetória realizada por cada junta do robô, bem como obter a velocidade e aceleração das mesmas.

A função que gerou o padrão para o modo de andar não é única (trajetória dos pés Senoidal ou Elíptica). Esta função pode ser modificada para capacitar ao robô bípede transpor obstáculos específicos, ou desenvolver maiores velocidades. A função Senoidal demonstrou ser mais suave que a elíptica, pois tanto os gráficos de velocidade como de aceleração demonstraram ter menores variações e, portanto, menores impactos envolvidos.

6. AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Proc. 99/09602-4) e à CAPES pelas bolsas concedidas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bay, J.S. and Hemami, H., 1987, "Modeling of a neural pattern generator with coupled nonlinear oscillators". IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 34, no. 4
- Cheng, M. Y. and Lin, C. S., 1997, "Genetic algorithm for control design of biped locomotion", Journal of Robotics Systems, 14(5), pp. 365-373.
- Frank, A. A., 1968, "Automatic control systems for legged locomotion machines", Ph.D. Thesis, University of Southern California.
- Furusho, J. and Masubuchi, M., 1986, "Control of a dynamical biped locomotion system for a steady walking", J. of Dyn. Systems Meas. And Control. Transaction of ASME, 108, 111-118.
- Lum, H.K., Zribi, M. And Soh, Y.C., 1999, "Planning and control of a biped robot". International Journal of Engineering Science. Vol. 37, pp. 1319-1349.
- Kato, I., *et al.*, 1974, "Information-power machine with senses and limbs" in 1st CISM-IFTToMM Symp. On Theory and Practice of Robots and Manipulators, Springer – Verlag.
- Kato, R. and Mori, M., 1984, "Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory". Automatica, vol. 20, no. 4, pp. 405-414.
- McGeer, T., 1990, "Passive walking with knees". Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1640-1645.
- Mita, T., *et al.*, 1984, "Realization of high speed biped using modern control theory". International J. Control, vol. 40, no. 1, 107-119
- Popovic, D., *et al.*, 1999, "Optimal control of walking with functional electrical stimulation study". IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 7, no. 1, March.
- Raibert, M.H., 1996, "Legged Robots that balance". MIT Press, Cambridge, MA.
- Vukobratovic, M., *et al.*, 1990, "Scientific fundamentals of robotics 7. Biped locomotion: Dynamics stability, control and application", Springer – Verlag.