



MODELAMENTO E CONTROLE DE UM ROBÔ DE UMA PERNA

Alexandre Schammas

Carlos Magno de Oliveira Valente

Universidade de São Paulo – EESC, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P. 359 – 13560-250 – São Carlos, SP, Brasil

Glauco Augusto de Paula Caurin

Universidade de Mogi das Cruzes, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Cx. P. 411 – 08790-970 – Mogi das Cruzes, SP, Brasil

***Resumo.** Modelamento e controle de um robô de uma perna planar utilizando dois métodos de controle. Estes métodos são comparados em relação ao desempenho e consumo de energia. O modelo consiste, basicamente, de uma perna com elasticidade, um corpo e uma junta torsional como quadril. A primeira estratégia consiste em dividir o problema de controle em três partes, considerando a altura do pulo, a velocidade longitudinal e a atitude do corpo separadamente. Esta estratégia, proposta inicialmente por Raibert, foi extensivamente validada em simulações e em robôs experimentais e portanto será utilizada como base de comparação para a segunda estratégia. O segundo método explora os aspectos da dinâmica passiva do sistema, definida como a resposta do sistema sem forças externas. Neste caso, o modelo inicial é modificado, adicionando uma mola torsional ao quadril. O método consiste em gerar uma trajetória desejada para a perna próxima ao movimento passivo do quadril. Os resultados das simulações realizadas para as duas estratégias são analisados e comparados.*

***Palavras-chave:** Robôs de pernas, Sistemas dinamicamente estabilizados, Dinâmica passiva*

1. INTRODUÇÃO

Basicamente, existem dois tipos de locomoção por pernas (Ringrose, 1997), dependendo de como os robôs são estabilizados. Os robôs com locomoção estaticamente estável se movem lentamente e possuem uma base de sustentação larga, de tal maneira que a dinâmica do seu movimento pode ser ignorada. Por outro lado, os robôs dinamicamente estáveis conseguem atingir velocidades maiores. Contudo, estes últimos possuem uma base de sustentação pequena, o que os torna estáveis apenas quando estão em movimento. A maioria dos robôs dinamicamente estáveis são estabilizados por um sistema computacional que calcula como o robô deve se mover.

Os robôs dinamicamente estáveis oferecem uma maior eficiência devido à sua configuração mais simples, peso mais baixo e velocidades mais altas. Porém, estes robôs (Raibert, 1986) ainda possuem muitos sensores, atuadores e componentes eletrônicos atuando

como dissipadores de energia (Ahmadi & Buehler, 1997a; Gregorio et al., 1997). Para alcançar autonomia de energia – uma necessidade para todos os robôs móveis – esta deve ser utilizada cuidadosamente. Atingir uma alta eficiência de energia é particularmente desafiador nos robôs de pernas, pois ocorre grande troca de energia nos movimentos internos. Como estes movimentos não contribuem diretamente para a mobilidade, a energia utilizada para produzi-los deve ser minimizada.

Apenas recentemente, a comunidade de robótica tem investigado os elementos elásticos para facilitar a oscilação do quadril. McGeer (1989) estudou a corrida dinamicamente passiva de um bípede, onde as duas pernas são conectadas através de uma mola. Raibert & Thompson (1989) mostraram, através de simulações, a locomoção passiva de um robô de uma perna simplificado. Este trabalho mostra que é possível calcular condições iniciais que permitem ao robô realizar um determinado número de passos sem atuadores. Ahmadi & Buehler (1997b) apresentaram um algoritmo de controle que estabiliza um modelo simplificado do robô de uma perna, com uma mola no quadril. Este algoritmo é baseado na dinâmica passiva do sistema. A dinâmica passiva é definida como a resposta do sistema sem forças externas.

Este artigo apresenta uma estratégia de controle utilizando o modelo de um robô de uma perna apresentado por Raibert (1986), adicionando uma mola no quadril. Este algoritmo é baseado na dinâmica passiva do modelo e tem como objetivo reduzir a energia consumida pelo sistema. A Seção 2 apresenta o modelo utilizado nas simulações. Na Seção 3, são apresentados dois métodos para o controle do sistema. A Seção 4 apresenta os resultados dos métodos e comparações em relação ao desempenho e à energia consumida. Finalmente, na Seção 5 são apresentadas a discussão e conclusões do trabalho.

2. MODELO DE UM ROBÔ DE UMA PERNA

O modelo utilizado para estudar a locomoção dinamicamente estável é apresentado na Fig. 1. O modelo possui uma única perna elástica que se articula em relação ao corpo sob uma junta rotacional simples no quadril. Um atuador é localizado nesta junta, exercendo um torque, τ , entre o corpo e a perna. O corpo é representado por uma massa rígida, na qual a perna está conectada. A perna possui uma massa M_1 , com momento de inércia I_1 , enquanto o corpo possui massa M_2 , com momento de inércia I_2 . O centro de massa da perna é localizado a distância r_1 da extremidade inferior da perna (pé do robô). O centro de massa do corpo é localizado a uma distância r_2 acima do quadril. Para o segundo método de controle, apresentado na Seção 3.2, é utilizado uma variação do modelo adicionando uma mola torsional de rigidez K_H ao quadril.

O comprimento total da perna é influenciado por uma mola, um atuador de posição em série com a mola e um fim de curso. A mola da perna é modelada com uma de suas extremidades rigidamente conectada ao pé e com outra extremidade fixa a um lado do atuador. O fim de curso é modelado como uma mola muito rígida e um amortecedor. As constantes de elasticidade e de amortecimento do fim de curso, K_{L2} e B_{L2} , são escolhidas de tal maneira que as vibrações que ocorrem entre o corpo e a perna decaiam em poucos ciclos quando o fim de curso é atingido.

O atuador de posição, cujo deslocamento é representado por χ , é arranjado em série com a mola da perna, atuando entre a perna e o quadril. As mudanças no deslocamento do atuador fazem com que a energia armazenada na mola da perna aumente ou diminua. O tempo de resposta do atuador é levado em consideração. Além de assumir uma trajetória quadrática ao longo do tempo, o atuador possui o seu curso limitado em $\chi_{\min} < \chi < \chi_{\max}$, com $\chi_{\min} > 0$.

A superfície de suporte é modelada como uma elasticidade K_G , e um amortecimento B_G bi-dimensional. Uma dimensão da mola atua verticalmente e a outra horizontalmente sem

nenhuma interação entre as duas. A elasticidade e o amortecimento do solo influenciam o robô apenas quando o pé está em contato com o solo, $y_0 < 0$. Durante o vôo, os coeficientes da mola e do amortecedor são nulos e portanto as forças de contato são também nulas. Cada vez que o pé toca o solo (contato), a posição de repouso da mola horizontal do solo é reajustada para a posição de contato. Foi assumido também que a rigidez do solo é muito maior do que a rigidez da perna, $K_G \gg K_L$. O coeficiente de amortecimento é escolhido de forma que as vibrações entre o pé e o solo sejam desprezíveis, enquanto que o coeficiente de atrito entre o pé e o solo é assumido como grande o suficiente para que o escorregamento nunca ocorra. Este modelo elástico do solo representa tanto as elasticidades presentes na superfície de suporte como as encontradas no pé.

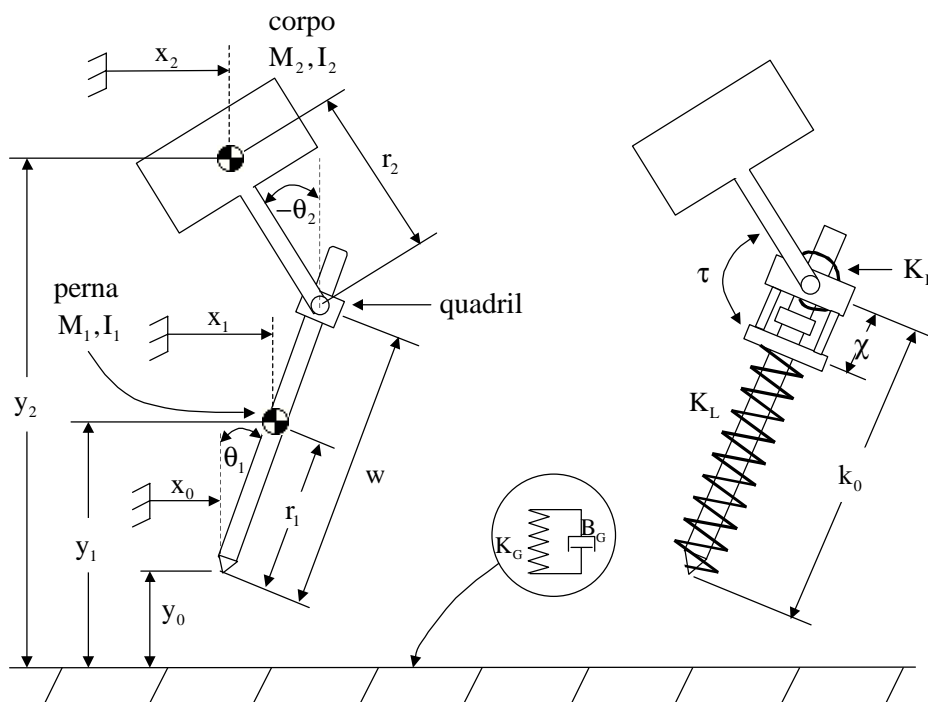


Figura 1- Modelo do robô de uma perna para análise e simulação. O corpo e a perna são conectados por uma junta onde o torque é gerado. A perna consiste de uma mola em série com o atuador de posição. A superfície de suporte é elástica em duas dimensões. O modelo é restrito ao movimento no plano.

3. CONTROLE DE UM ROBÔ DE UMA PERNÁ

A estratégia de controle trata o movimento vertical, a velocidade longitudinal e a atitude do corpo como três problemas de controle separados. A primeira parte do controle excita o movimento vertical do robô e regula sua altura através do impulso gerado pelo atuador da perna em cada pulo. A segunda parte do controle estabiliza a velocidade longitudinal do robô, estendendo o pé (ponto de contato) para frente em uma posição que fornecerá a aceleração necessária durante o período que o robô está em contato com o solo (*stance*). A terceira parte do controle mantém o corpo em atitude vertical atuando no quadril durante o *stance*. Estas três partes do sistema de controle são sincronizadas em função dos eventos do robô. Decompondo o problema desta maneira, considera-se o fraco acoplamento entre estes movimentos.

O controle vertical baseia-se na compensação das perdas de energia. A diferença de energia necessária para se atingir a altura desejada é estimada. Esta diferença é então convertida em termos do deslocamento do atuador. Os movimentos do atuador são sincronizados através da identificação dos eventos do robô. O atuador estende-se na posição de máxima compressão da mola e se encurta logo após o momento em que o robô deixa o solo (decolagem).

As seções 3.1 e 3.2 apresentam dois métodos para o controle do equilíbrio e velocidade. O primeiro método baseia-se na estratégia apresentada por Raibert (1986). Este método posiciona o pé durante o voo para o controlar a velocidade e atua no ângulo do corpo durante o *stance* para controlar a atitude. O segundo método realiza o mesmo, porém as trajetórias para o posicionamento do pé são geradas de tal maneira que se minimize a energia consumida. Simulações foram realizadas para os dois algoritmos e os resultados e comparações são apresentados na Seção 4.

3.1 Método 1 – posicionamento do pé e controle de atitude

Para o controle da velocidade, primeiramente é encontrado o movimento nominal que mantém a velocidade longitudinal constante e o corpo sem girar. Então, modifica-se este movimento para eliminar os desvios. O algoritmo consiste de duas partes: uma parte que posiciona o pé para controlar a velocidade longitudinal, e outra parte responsável pelo movimento do quadril durante o *stance* para o controle do equilíbrio.

Durante o *stance*, a perna move-se para traz em relação ao corpo. Existe uma simetria neste movimento em relação ao ponto localizado no meio do *stance* (*ponto neutro*). Este movimento simétrico não gera momento nem aceleração pois o centro de gravidade gasta aproximadamente o mesmo tempo na frente e atrás do ponto neutro. Portanto, o momento médio e a aceleração média são nulos ao longo do *stance*.

Quando a velocidade longitudinal se desvia do valor desejado, o sistema de controle posiciona o pé em relação ao ponto neutro para corrigir o erro (Fig. 2). Posicionando o pé à frente do ponto neutro, o corpo é desacelerado durante o *stance*, enquanto que posicionando-o atrás do ponto neutro, o corpo é acelerado. Uma combinação linear do erro da velocidade determina a distância que o pé deve ser deslocado em relação ao ponto neutro.

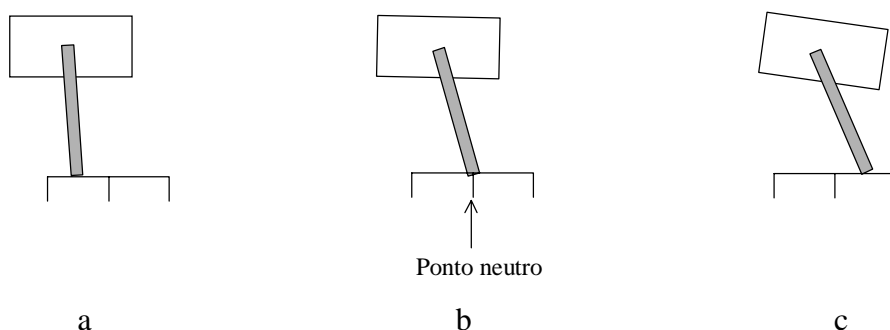


Figura 2- Três tipos de comportamento. Quando o pé é posicionado no ponto neutro (b), o corpo move-se ao longo de uma trajetória simétrica, o que deixa o robô sem aceleração na direção longitudinal. Quando o pé é posicionado antes do ponto neutro (a), o corpo é acelerado durante a fase de *stance*. Quando o pé é posicionado depois do ponto neutro (c), o corpo é desacelerado durante o *stance*.

Para calcular o ponto neutro, a metade da distância horizontal percorrida durante o *stance* (Eq. 1) é adicionada a projeção horizontal do centro de gravidade (Eq. 2). Se o tempo de

stance, T_s e a velocidade longitudinal, \dot{x}_2 são conhecidas, a distância horizontal percorrida durante o *stance* dada por (1).

$$\Delta x_s = \dot{x}_2 T_s \quad (1)$$

Então, a função linear do erro (Eq. 3) é adicionada à Eq. 4. A cinemática do modelo é utilizada para calcular um ângulo da perna que posiciona o pé. A análise seguinte é realizada no sistema de coordenadas do robô que translada com o quadril.

$$x_{CG} = \frac{(r_1 - w)M_1 \sin(\theta_1) + r_2 M_2 \sin(\theta_2)}{M_1 + M_2} \quad (2)$$

A combinação linear do erro de velocidade fornece a retroalimentação corretiva dada através:

$$x_{ERR} = K_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_{2,d}) \quad (3)$$

onde $\dot{x}_{2,d}$ é o valor desejado da velocidade \dot{x}_2 e K_1 é o ganho de retroalimentação. Assim, a posição do pé no contato é dada por (4).

$$x_{td} = x_{CG} + \frac{\Delta x_s}{2} + x_{ERR} \quad (4)$$

Considerando a cinemática do modelo, obtém-se o ângulo de contato:

$$\theta_{1,td} = -\arcsen\left(\frac{x_{td}}{w}\right) \quad (5)$$

Para regular este ângulo desejado, é utilizado um controlador linear dado pela Eq. 6.

$$\tau = K_{pf} e_{\theta_1} + K_{vf} \dot{e}_{\theta_1} \quad (6)$$

onde $e_{\theta_1} = \theta_{1,td} - \theta_1$ é o erro do ângulo da perna e K_{pf} , K_{vf} são os ganhos do controlador durante a fase de vôo. Estes ganhos são calculados simplificando o modelo a um sistema linear que considera apenas a inércia do corpo sem o acoplamento com a perna. Sendo este sistema em malha fechada de segunda ordem, é possível escolher valores apropriados para obter o desempenho necessário. Os parâmetros de desempenho são estabelecidos de tal forma que a resposta de correção do ângulo da perna seja mais rápida que o tempo de vôo.

Para o controle da atitude, é utilizado um controlador linear dado pela Eq. 7.

$$\tau = K_{ps} e_{\theta_2} + K_{vs} \dot{e}_{\theta_2} \quad (7)$$

onde $e_{\theta_2} = \theta_{2,d} - \theta_2$ é o erro do ângulo do corpo, $\theta_{2,d}$ é o valor desejado e K_{ps} , K_{vs} são os ganhos do controlador durante a fase de *stance*. Assim como durante o vôo, estes ganhos são calculados simplificando o modelo a um sistema linear que considera apenas a inércia da perna sem o acoplamento com o corpo. Desta forma, os ganhos são escolhidos de tal forma que a resposta de correção do ângulo do corpo seja mais rápida que o tempo de *stance*.

3.2 Método 2 - posicionamento do pé e controle de atitude com redução de energia

O segundo método é uma extensão do método 1 e tem como objetivo reduzir a energia consumida pelo atuador do quadril. Para isto, uma mola torsional de rigidez K_H é adicionada ao quadril. A idéia central desta estratégia é baseada no movimento passivo do quadril, como ilustrado pela Fig. 3. A freqüência natural da oscilação do quadril é dado aproximadamente pela Eq. (8).

$$\omega_H \cong \sqrt{\frac{K_H}{I_e}} \quad (8)$$

onde $I_e = I'_1 I'_2 / (I'_1 + I'_2)$ é o momento de inércia efetivo e os termos $I'_1 = I_1 + M_1 r_1^2$ e $I'_2 = I_2 + M_2 r_2^2$ são os momentos de inércia em relação ao quadril. Considerando o tempo de vôo aproximadamente igual ao tempo de *stance*, a constante de mola é escolhida de tal maneira que o período de sua oscilação seja igual ao tempo de duração do passo.

Conforme mostra a Fig. 3, para a perna atingir o solo com ângulo de contato desejado, $\theta_{1,td}$, a oscilação do quadril deve estar sincronizada com o movimento vertical.

Para alcançar tal sincronização, o tempo não é um parâmetro adequado pois os tempos de duração do vôo e do *stance* estão sujeitos a variações durante a locomoção. Portanto, é necessário utilizar uma variável, denominada tempo de locomoção (Ahmadi & Buehler, 1997b), que caracteriza o movimento vertical independente das condições de operação (e.g. a altura dos pulos).

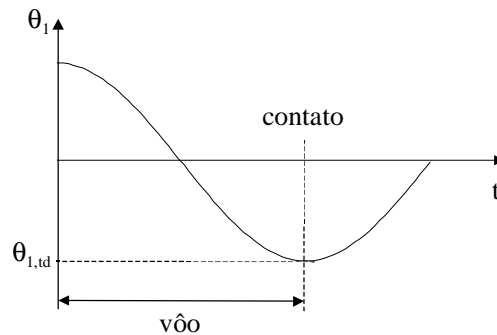


Figura 3- Oscilação aproximada do ângulo da perna, θ_1 , durante a fase de vôo. Esta oscilação é obtida através da dinâmica passiva do quadril. A trajetória deve ser de tal forma que no contato o ângulo assuma o valor $\theta_{1,td}$.

O tempo de locomoção, η , é definido como uma função que transforma o estado do robô em uma região fixa $\varepsilon = [0, 1]$. Portanto, o tempo de locomoção deve satisfazer duas condições para ser utilizado na estratégia de controle. Primeiramente, deve ser uma função escalar η que relaciona a fase de vôo no intervalo fixo $[0, 1]$ entre a decolagem ($\eta_{10} = 0$) e o contato ($\eta_{1d} = 1$). A segunda condição estabelece que η deve ser uma função com afinidade no tempo. Com estas duas condições, η se torna um parâmetro de sincronização para o planejamento de trajetória. Portanto, o tempo de locomoção é definido durante o vôo como:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\dot{y}_2}{\dot{y}_{2,lo}} \right); \quad \eta: [\dot{y}_{2,lo} \quad \dot{y}_{2,td}] \rightarrow [0 \quad 1] \quad (9)$$

Utilizando o tempo de locomoção e o ângulo de contato calculado no método anterior (Eq. 5), a trajetória do ângulo da perna durante o vôo é definida como:

$$\theta_{1,d} = \theta_{1,td} \cos(\pi\eta) \quad (10)$$

Para realizar esta trajetória, é utilizado um controlador baseado na dinâmica inversa simplificada do modelo. Este tipo de controlador é frequentemente utilizado em manipuladores (Koivo, 1989).

$$\tau = -I'_1 (\ddot{\theta}_{1,d} + K_{pf} e_{\theta_1} + K_{vf} \dot{e}_{\theta_1}) - K_H (\theta_1 - \theta_2) \quad (11)$$

onde $e_{\theta_1} = \theta_{1,d} - \theta_1$ é o erro do ângulo da perna e K_{pf} , K_{vf} são os ganhos do controlador durante a fase de vôo. Baseado na simplificação do modelo como no método 1, os ganhos são escolhidos de tal forma que a resposta do controlador seja mais rápida que a trajetória desejada. Para o controle da atitude, é utilizado a mesma estratégia do método 1. Porém, como o sistema possui uma mola no quadril, é utilizado também um controlador baseado na dinâmica inversa simplificada:

$$\tau = I'_2 (\ddot{\theta}_{2,d} + K_{ps} e_{\theta_2} + K_{vs} \dot{e}_{\theta_2}) - K_h (\theta_1 - \theta_2) \quad (12)$$

onde $e_{\theta_2} = \theta_{2,d} - \theta_2$ é o erro do ângulo do corpo e K_{ps} , K_{vs} são os ganhos do controlador durante a fase de *stance*.

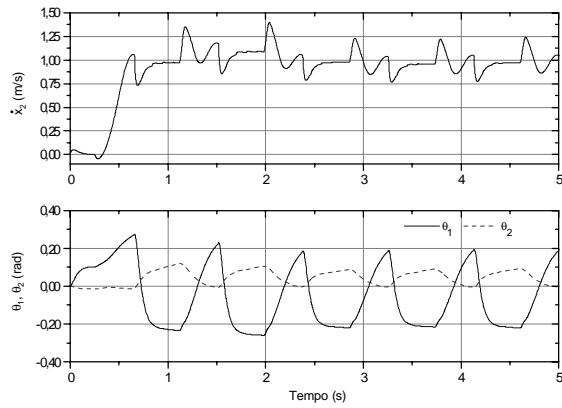
4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados dos métodos 1 e 2. São apresentados resultados de desempenho e consumo de energia pelo atuador do quadril para cada método. Estes resultados são comparados e analisados.

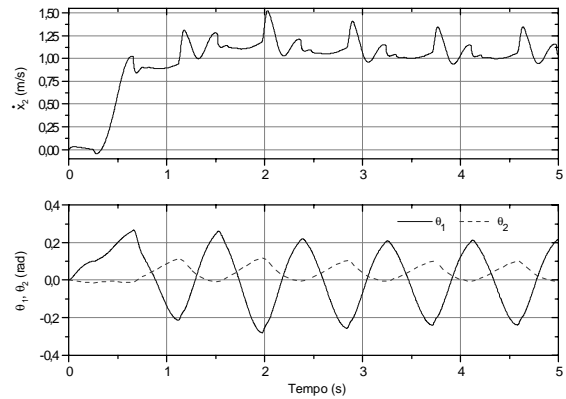
A Fig. 4a mostra os resultados do primeiro teste utilizando o método 1. Este teste avalia a capacidade do sistema de atingir uma determinada velocidade ($\dot{x}_{2,d} = 1\text{m/s}$) à partir do repouso ($\dot{x}_2 = 0$). Os dados desta figura mostram que o robô atinge o regime em aproximadamente 3,5 segundos. Durante o regime, a velocidade varia entre 0,76 e 1,23 m/s.

A Fig. 4b mostra os resultados do mesmo teste utilizando o segundo método. Os dados desta figura demonstram um desempenho semelhante ao método 1. O sistema atinge o regime em aproximadamente 3,5 segundos. Porém, neste caso, a velocidade varia de maneira diferente durante o regime. A variação se encontra entre 0,93 e 1,35 m/s. Para ambos os métodos foi possível controlar a velocidade longitudinal para até 2 m/s.

A Fig. 5 mostra a energia consumida em 10 segundos pelo atuador do quadril utilizando cada um dos métodos apresentados na Seção 4. Os dados desta figura demonstram que o segundo método obteve uma redução de aproximadamente 67 % na energia consumida em relação ao método 1.



(a) Método 1



(b) Método 2

Figura 4- Controle horizontal utilizando os métodos 1 e 2. Resposta do sistema para o degrau de velocidade longitudinal desejada $\dot{x}_{2,d} = 1\text{m/s}$. A resposta do sistema é de aproximadamente 3,5 segundos para ambos os casos. $K_1 = 0.1$.

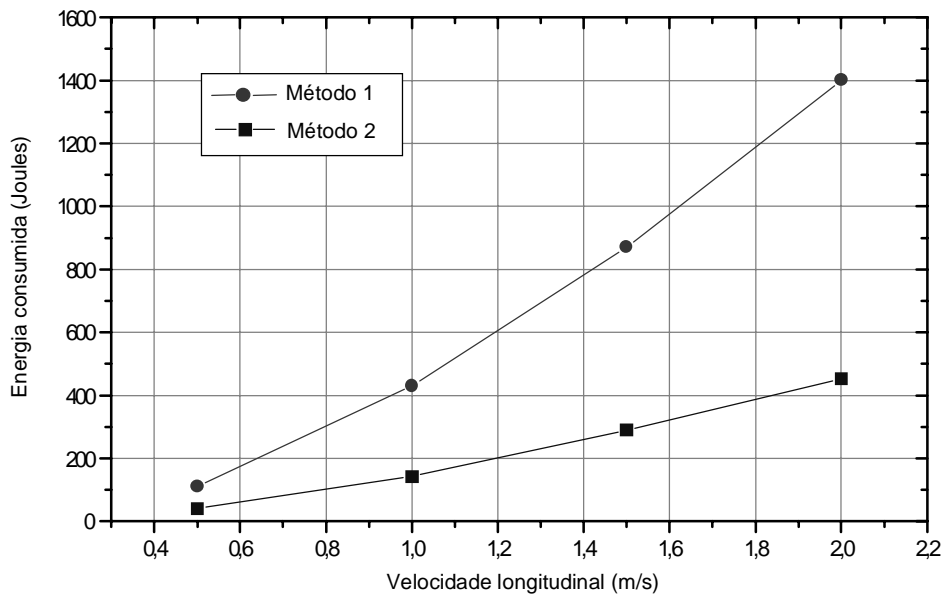


Figura 5 – A energia consumida pelo atuador do quadril utilizando os métodos 1 e 2. Os dados apresentam a energia consumida durante 10 segundos no regime. O segundo método apresenta uma redução na energia consumida de aproximadamente 67% em relação ao método 1.

5. CONCLUSÃO

Foram apresentadas duas estratégias para o controle de um robô de uma perna. Em ambos os métodos, o controle é dividido em três partes: controle da altura do pulo, controle de velocidade longitudinal e controle de atitude. A primeira estratégia (método 1), apresentada em Raibert (1986), utiliza o posicionamento do pé durante o voo para controlar a velocidade. Durante o *stance*, este algoritmo controla a atitude do corpo.

A segunda estratégia (método 2) utiliza o modelo com mola no quadril. Este método é uma extensão do primeiro método pois utiliza o posicionamento do pé durante o voo e controle de atitude durante o *stance*. Porém, o posicionamento do pé é realizado de forma que

reduza o consumo de energia. Para isto, é gerado uma trajetória para o ângulo da perna baseada no movimento passivo do quadril.

Os resultados dos dois métodos mostraram que o desempenho de ambos são semelhantes. Os dois métodos possuem tempo de resposta e variação durante o regime semelhantes. No entanto, o segundo método apresentou uma redução considerável no consumo de energia.

REFERÊNCIAS

- Ahmadi, M., Buehler, M., 1997a, Preliminary Experiments with an Actively Tuned Passive Dynamic Running Robot, Experimental Robotics I, Springer Verlag.
- Ahmadi, M., Buehler, M., 1997b, Stable Control of a Simulated One-Legged Running Robot with Hip and Leg Compliance, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.13, n.1, pp.96-104.
- Gregorio, P., Ahmadi, M., Buehler M, 1997, Design, Control, and Energetics of an Electrically Actuated Legged Robot, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.27, n.4.
- McGeer, T, 1989, Passive bipedal running. Simon Fraser University, Centre for Systems Science, (Report n.IS-TR-89-02).
- Raibert, M. H, 1986, Legged robots that balance, MIT Press, Cambridge.
- Raibert, M. H.; Thompson, C. M, 1989, Passive Dynamic Running, Experimental Robotics V, Springer Verlag.
- Ringrose R. P, 1997, Self-stabilizing running. Cambridge, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- Koivo, A. J, 1989, Fundamentals for control of robotic manipulators, John Wiley & sons, Inc, New York.
- Todd, D. J, 1985, Walking machines: an introduction to legged robots, Kogan Page Ltd, London.

MODELLING AND CONTROL OF A SIMULATED ONE-LEGGED ROBOT

Abstract. *In this paper a two-dimensional one-legged robot is modeled and simulated using two control algorithms. These two methods are compared on respect to performance and energy expended by the system. The model is consisted of a springy leg, a simple body, and an actuated hinge-type hip. The first control strategy is divided in three parts, considering the hopping height, the forward speed, and the body attitude separately. Firstly proposed by Raibert, this strategy has been extensively validated by simulations and experimental prototypes, and therefore it can be used as benchmark. The second method exploits the system passive dynamics, defined as non-forced response of the system. In this case, the model is modified adding a hip spring. The method defines a desired leg trajectory close to the passive hip swing movement. The simulation results for both methods are analyzed and compared.*

Keywords: *Legged locomotion, Dynamically stable systems, Passive dynamics*