

SÍNTESE E ANÁLISE DE UM ROBÔ HUMANOIDE PARA COMPETIÇÕES

Vinícius Abrão da Silva Marques, vinicius@icte.ufm.edu.br
Rogério Sales Gonçalves, rsgoncalves@mecanica.ufu.br
João Carlos Mendes Carvalho, jcmendes@mecanica.ufu.br

¹Av. Doutor Randolpho Borges Júnior 1250 - Univerdecidade - Uberaba - MG - CEP 38064-200.

²Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - Bloco M - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

Resumo: O desenvolvimento da robótica móvel envolve a multidisciplinaridade das áreas de mecânica, eletrônica, computação e biologia. As atuais pesquisas vêm possibilitando o desenvolvimento de robôs que auxiliam nas áreas de exploração, resgate e biomecânica, empregando técnicas de inteligência artificial, otimização e análise dinâmica de sistemas multicorpos. Este trabalho tem como objetivo a síntese de um robô humanoide e a obtenção do modelo cinemático teórico possibilitando definir o seu movimento de maneira a manter o equilíbrio dinâmico e avaliar os torques aplicados em seus atuadores através de simulação CAD-CAE. A partir do modelo sólido computacional e utilizando simulação numérica de sistemas multicorpos, foi possível obter os esforços dinâmicos na estrutura do robô e as posições do seu centro de massa e dos pés ao longo da trajetória definida. Com este trabalho foi possível avaliar uma metodologia de simulação para mecanismos multicorpos aplicada em projetos de robôs humanóides.

Palavras-chave: robótica, robôs humanóides, cinemática, dinâmica, otimização.

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da robótica, vários estudos teóricos e experimentais têm sido realizados com o objetivo de desenvolver equipamentos autônomos para executar diversas atividades em ambientes abertos e fechados. Tais atividades são perfeitamente adequadas para os robôs móveis, pois eles são capazes de se locomoverem evitando os obstáculos existentes. Dentre os robôs móveis destaca-se o estudo dos robôs humanóides, que são robôs com aparência semelhante à humana, possuindo duas pernas, dois braços, um tronco e uma cabeça conectada a um pescoço (Sousa *et al.*, 2011).

A característica mecânica mais importante dos robôs móveis está relacionada com sua estabilidade, que são de duas formas: a estabilidade estática que consiste na sua capacidade de manter uma configuração a partir de forças de reação; e a estabilidade dinâmica que consiste na sua capacidade de manter uma configuração a partir de forças de reação e de forças de inércia (Angeles, 2003; Raibert, 1986). Por esta razão é que estudos sobre os robôs que se movimentam sobre pernas mostram que a sua estabilidade depende tanto da forma de movimentação como da quantidade de pernas. Assim, um robô que tem duas pernas, para que mantenha seu equilíbrio durante a movimentação é necessário considerar seu comportamento dinâmico. Isto quer dizer que durante a realização do passo não existe equilíbrio estático (robô sobre uma só perna), devendo então associar com o “jogo do seu corpo” para que ele não caia.

O objetivo deste trabalho é a partir da modelagem cinemática de um robô humanoide, definir a sua trajetória e avaliar através de simulações CAD-CAE o seu comportamento dinâmico através de seu equilíbrio e da obtenção dos torques nos atuadores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Afim de se obter as equações do modelo cinemático da perna e do pé avalia-se o robô através de uma estrutura de cadeia serial aberta, considerando-se o movimento dos atuadores de cada uma das pernas independentemente. A Fig. 1 apresenta o modelo cinemático considerado.

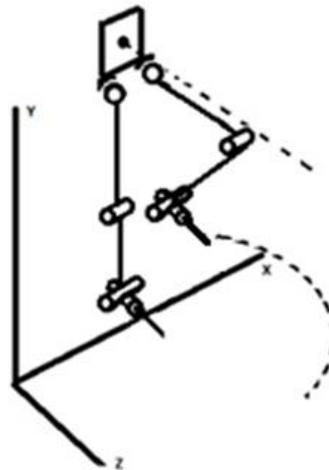


Figura 1. Desenho esquemático da cadeia cinemática serial para a perna e pé do robô humanoide.

Para auxiliar na obtenção das equações do modelo cinemático é considerado ainda os comprimentos, a distância e as coordenadas articulares e dos pontos P e Pf, indicados na Fig. 2.

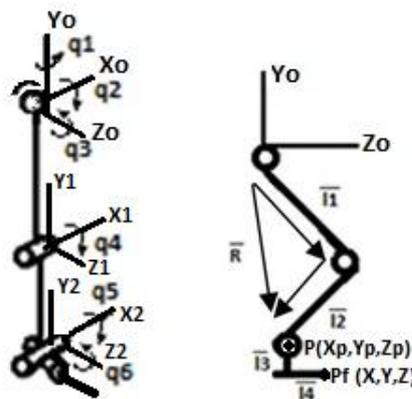


Figura 2: Coordenadas articulares e comprimentos adotados.

São definidos os seguintes ângulos relacionados a cada uma das coordenadas articulares.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= -q_2 \\ \theta_2 &= +q_4 = \theta_1 - q_5 \\ \theta_3 &= +q_3 = -q_6 \\ \theta_4 &= +q_1 \end{aligned}$$

O sinal é definido de acordo com o sentido positivo da direção em torno da qual o movimento acontece. Observa-se também que a coordenada articular q_5 e q_6 são definidas de maneira a manter a orientação do pé sempre paralelo ao solo.

Inicialmente são obtidas as expressões para o modelo cinemático direto, através do método vetorial (Tsai, 1999), para as coordenadas X, Y e Z do ponto localizado na ponta do pé.

Adota-se que a coordenada articular q_1 atua independentemente das demais, ou seja, os movimentos de giro em torno da direção y e o movimento de caminhar são realizados separadamente. Desta forma inicialmente o robô gira para alinhar-se na direção na qual irá caminhar em seguida.

Considerando-se o movimento de giro do robô tem-se as Eq. (1) e Eq. (2):

$$X = l_4 * \text{sen}(\theta_4) \tag{1}$$

$$Z = l_4 * \text{cos}(\theta_4) \tag{2}$$

Após girar o robô caminha em linha reta, nos quais o modelo cinemático direto pode ser dado pelas Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5):

$$X = (l_1 + l_2) * \text{sen}(\theta_3) \tag{3}$$

$$Y = -(l1 + l2) * \cos(\theta3) - l3 \quad (4)$$

$$Z = l1 * \sen(-\theta1) - l2 * \sen(-(\theta2 - \theta1)) + l4 \quad (5)$$

No modelo cinemático inverso, para a obtenção do ângulo $\theta4$ foi considerada a Eq. (6):

$$\theta4 = \text{atan}\left(\frac{X}{Z}\right) \quad (6)$$

De maneira análoga pode ser obtido o ângulo $\theta3$ de acordo com a Eq. (7):

$$\theta3 = \text{atan}\left(\frac{X}{l3-Y}\right) \quad (7)$$

Em seguida, considerando-se a distância \bar{R} a partir da vista frontal, Fig. 2, tem-se a Eq. (8):

$$= \sqrt{Xp^2 + Yp^2 + Zp^2} \quad (8)$$

A partir da vista lateral e utilizando-se da lei dos cossenos pode-se obter então as Eq. (9) e Eq. (10):

$$\theta2 = \pi - \text{acos}\left(\frac{-R^2+l1^2+l2^2}{2*l1*l2}\right) \quad (9)$$

$$\theta1 = \pi - \text{acos}\left(\frac{-R^2+l1^2-l2^2}{2*l1*R}\right) \quad (10)$$

Definidas as equações para obter os ângulos, faz-se necessário conhecer os valores das coordenadas Xp , Yp e Zp , as quais aparecem no modelo, em cada ponto da trajetória de maneira a permitir que o robô caminhe mantendo-se o equilíbrio dinâmico.

Foram então adotadas 3 variáveis dadas pelo comprimento, altura e largura lateral do passo.

Definiu-se uma passada completa como um ciclo no qual um pé vai a frente e o outro pé em seguida vai para a posição do primeiro.

Consideraram-se 8 pontos, denominados "Poses", ao longo de um ciclo completo de maneira a possibilitar a discretização e implementação computacional.

Adota-se os valores de Xp , Yp e Zp iguais a 0 no instante inicial obtendo-se 9 pontos para o ciclo inicial. Conhecidas as coordenadas Xp , Yp e Zp em cada ponto da trajetória é possível então obter-se os valores das coordenadas articulares para cada posição da trajetória.

Em seguida são calculados os valores das velocidades angulares de cada um dos atuadores. Inicialmente é calculado o comprimento da trajetória percorrido entre cada uma das poses e o comprimento total da trajetória ao longo de um ciclo, dados pelas Eq. (11) e Eq. (12):

$$S_{i-1} = \sqrt{(Xp_i - Xp_{i-1})^2 + (Yp_i - Yp_{i-1})^2 + (Zp_i - Zp_{i-1})^2} \quad (11)$$

com $i=2,3,\dots,9$.

$$S = \sum_{i=1}^8 S_i \quad (12)$$

Em seguida obtêm o tempo necessário para ir de uma pose para a pose seguinte através da Eq. (13):

$$t_j = T * \frac{S_j}{S} \quad (13)$$

$j=1,3,\dots,8$

No qual T é o período do passo definido como o tempo total para percorrer um ciclo completo. Calcula-se em seguida a variação angular das coordenadas articulares entre uma pose e a seguinte pela Eq. (14):

$$\Delta\theta_{i-1} = q_i - q_{i-1} \quad (14)$$

$i=2,3,\dots,9$.

Sendo possível então obter o valor da velocidade angular dos atuadores através da Eq. (15):

$$\omega_j = \frac{\Delta\theta_j}{t_j} \quad (15)$$

$$j=1,3,\dots,8$$

Conhecidos os valores das posições angulares e das velocidades angulares dos atuadores é possível então, através da simulação pelo Software Adams, visualizar o robô caminhando e ainda obter os gráficos dos esforços nos atuadores.

3. METODOLOGIA

Para a simulação computacional do robô humanoide foi realizada inicialmente a síntese geométrica da estrutura utilizando-se o Software SolidWorks. Em seguida foi importado o modelo do SolidWorks para o Software Adams. Realizaram-se os cálculos dos momentos de inércia e das posições dos centros de massa de cada um dos sólidos. Definiram-se os graus de liberdade e foram incluídas as forças de contato. Em seguida o modelo foi exportado para o Simulink. Foi implementado o algoritmo para cálculo da trajetória e das velocidades angulares dos atuadores no Matlab e criada a interface Matlab-Simulink-Adams para simulação, visualização do comportamento do robô ao longo da trajetória e obtenção dos torques nas articulações. Os resultados obtidos são apresentados em seguida.

3.1. Modelagem no SolidWorks

A síntese do robô humanoide foi realizada pela Equipe de Desenvolvimento em Robótica Móvel - EDROM da Universidade Federal de Uberlândia, baseando-se no regulamento da RoboCup Soccer Humanoid League (2014), o qual foi dimensionado para participar na categoria TeenSize. O modelo CAD, apresentado na Fig. 3a, foi desenvolvido para a montagem do robô.

Foram considerados os valores da Tab. 1 para as dimensões principais utilizadas na modelagem geométrica, apresentadas na Fig. 2:

Tabela 1: Dimensões consideradas para a estrutura.

Comprimento	Valor considerado [mm]
l1	255
l2	202
l3	44
l4	12

A distância entre à origem do sistema de coordenadas da simulação, localizado no ponto de encontro da cabeça com o tronco, e o referencial da cintura, considerado na modelagem cinemática, são apresentadas da Tab. 2:

Tabela 2: Distâncias entre a origem do sistema de coordenadas e o referencial da cintura.

Comprimento	Valor considerado [mm]
dx	100
dy	238
dz	0

Finalizado o modelo CAD no SolidWorks foram então definidos os materiais de cada uma das partes e calculado em seguida as posições dos centros de massa e os momentos de inércia, dados em relação ao sistema de referência baricêntrico de cada sólido com orientação paralela ao sistema de coordenadas da base, a qual pode ser vista na Fig. 3a. Em seguida foi possível então exportar o modelo para o Adams.

3.2. Modelagem no Adams

Inicialmente no Adams foram criados os sistemas de referência em cada um dos centros de massa dos corpos e nos pontos onde foram atribuídas juntas em seguida. Ajustaram-se então os valores dos momentos de inércia em relação aos referenciais baricêntricos criados.

Em seguida foram adicionadas as juntas definindo-se os graus de liberdade para as pernas. Destaca-se que inicialmente não foram atribuídas mobilidades as juntas dos ombros e da cabeça.

Para cada uma das juntas móveis foram atribuídos atuadores ajustados para receberem as informações de posição e velocidade angulares pelo Simulink.

Definiram-se ainda forças de contato entre os pés e solo, permitindo o movimento do robô ao atribuir-se um coeficiente de atrito estático e dinâmico igual a 0.5.

Por fim definiram-se os sistemas de referência posicionados no centro de massa do robô e nas extremidades dos pés, cujos valores das posições espaciais ao longo do tempo podem ser acessados a cada simulação pelo Matlab.

Concluído o modelo no Adams, conforme Fig. 3b, foi então gerado o arquivo com as informações do modelo as quais são acessadas pelo Matlab gerando o diagrama de controle do Simulink.

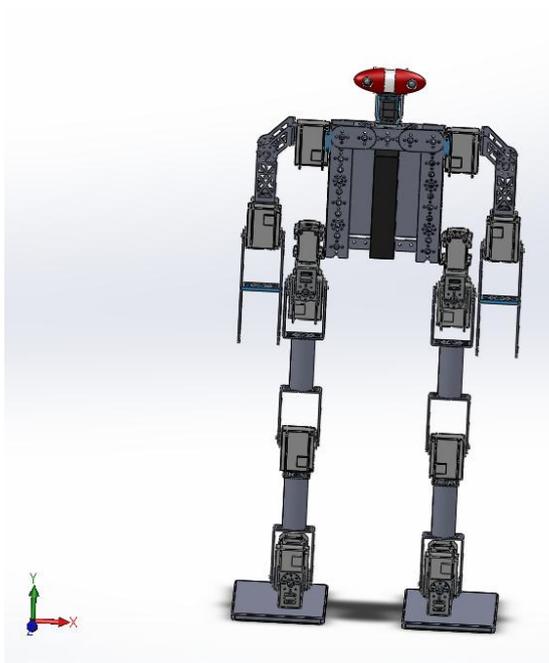


Figura 3a. Modelagem do humanoide no SolidWorks.

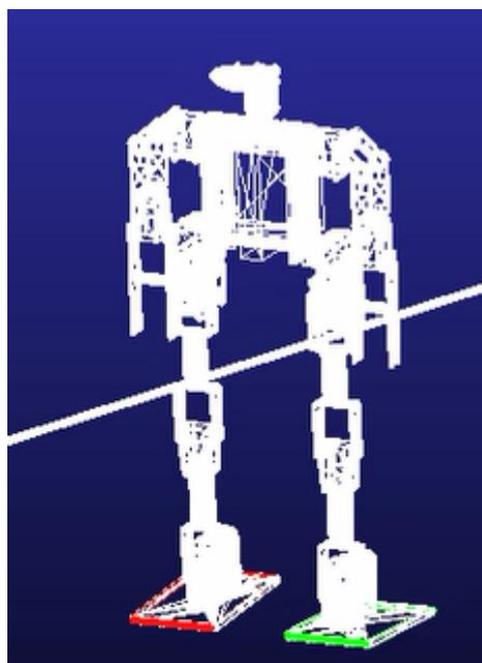


Figura 3b. Modelagem do humanoide no Adams.

3.3. Cálculo da trajetória via MatLab

A Figura 5 apresenta os valores das 3 variáveis utilizadas para definir a trajetória dos pés ao longo de um ciclo.

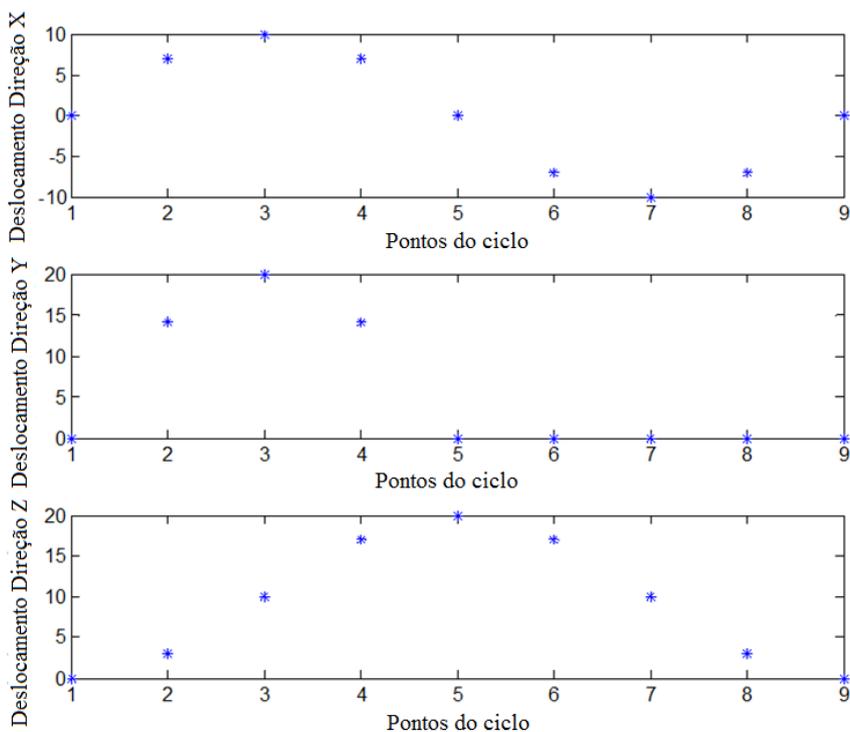


Figura 3. Trajetória definida para os pés.

Adotou-se um período de 1 segundo para que se complete um ciclo completo da trajetória dos pés e definiu-se um tempo total de simulação de 8 segundos. Definido o período foi possível então calcular as velocidades angulares dos atuadores, conforme Fig. 6.

Destaca-se que o ciclo é semelhante para ambos os pés e se repete ao longo da caminhada do robô, porém enquanto um dos pés segue o ciclo conforme apresentado, o outro pé segue a segunda metade do ciclo primeiro e em seguida a primeira metade do ciclo.

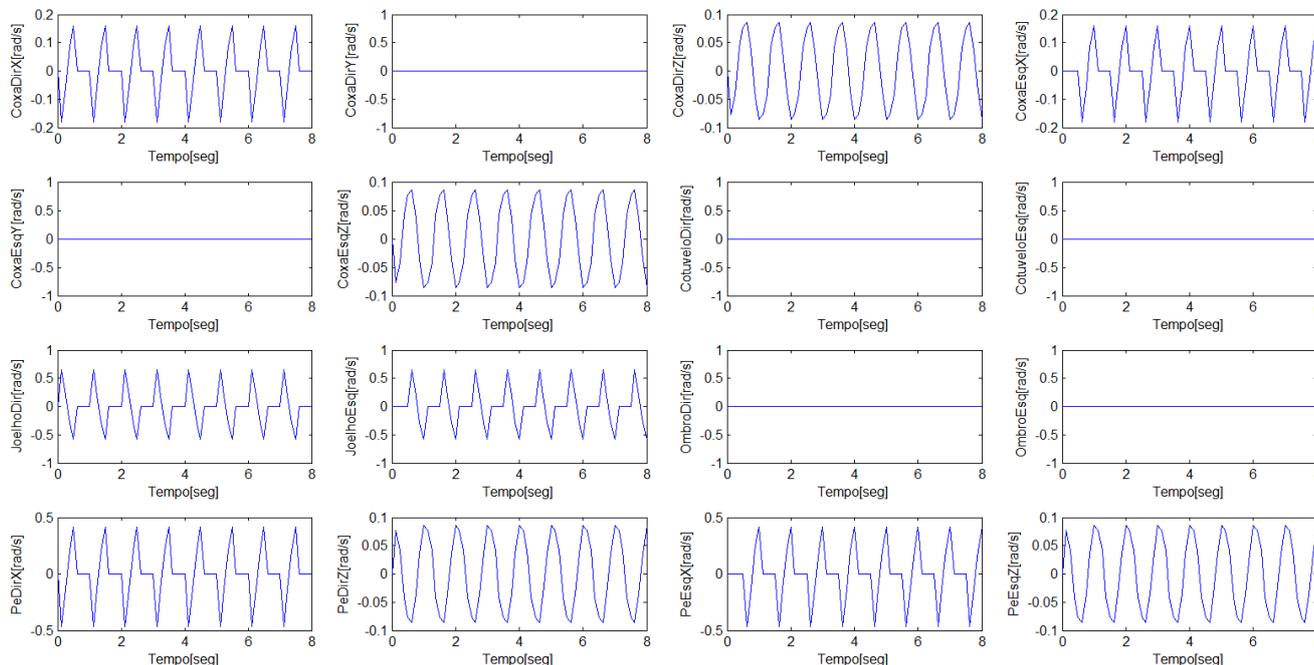


Figura 6. Velocidades angulares dos atuadores.

3.4. Interface Matlab-Simulink-Adams

Para que fosse possível simular o modelo do Adams através do Simulink, definiram-se as velocidades angulares dos atuadores como variáveis de estado de entrada do sistema e para as variáveis de estado de saída foram definidos os torques nos atuadores e a posição espacial do Centro de Massa e das pontas dos pés.

O diagrama de blocos da Fig. 7 apresenta o fluxo dos dados durante a simulação:

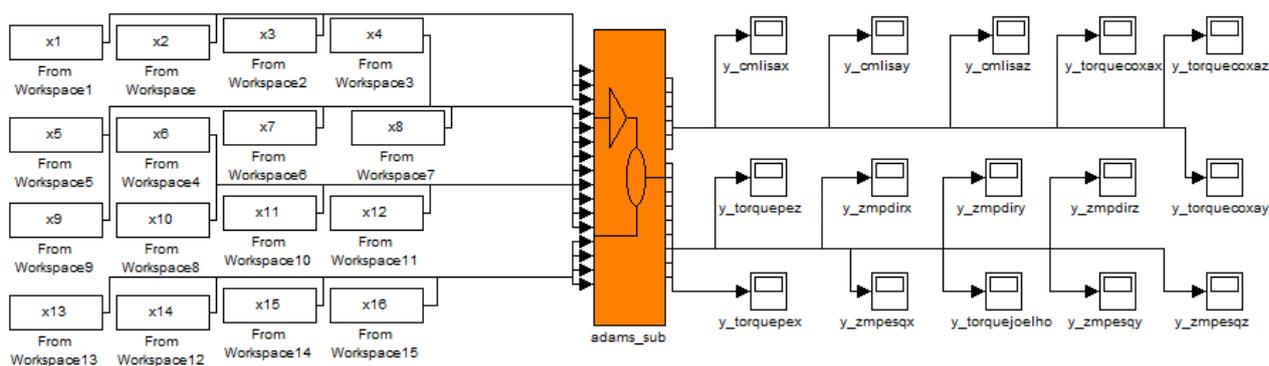


Figura 7. Diagrama de blocos do Simulink.

Sendo as variáveis X_n de entrada as velocidades angulares dos atuadores.

Inicialmente são calculados as trajetórias e os valores das velocidades angulares dos atuadores em uma rotina do Matlab. Os valores ficam então disponíveis no Workspace do Matlab.

Em seguida, as velocidades angulares dos atuadores são então importadas do Workspace do Matlab e enviadas ao Adams via Simulink. Durante a simulação é possível verificar de forma iterativa a animação do movimento imposto ao robô.

Após a simulação o Adams exporta para o Workspace do Matlab os valores dos torques e das posições dos pontos ajustados como variáveis de saída do sistema, os quais podem ser manipulados gerando os gráficos para o pós-processamento dos resultados.

4. RESULTADOS

Realizada a simulação foram obtidos os gráficos da posição do centro de massa ao longo do tempo e da trajetória dos pés ao longo das direções X e Z, conforme Fig. 8.

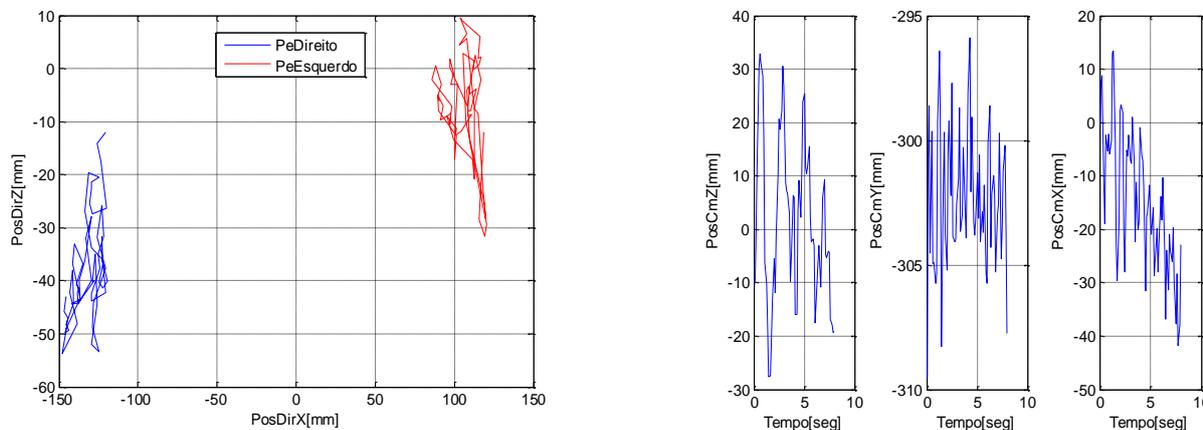


Figura 8. Trajetória dos pés (esquerda) e posição do centro de massa ao longo do tempo (direita).

Observa-se uma oscilação do centro de massa em torno da altura inicial, o que não comprometeu o seu equilíbrio dinâmico visto que o robô se mantém em pé ao longo de toda trajetória. Porém é verificado uma trajetória curva para os pés, o qual não foi programada pelo modelo.

Possíveis justificativas para os erros verificados são os valores ajustados para o coeficiente de atrito entre os pés e o solo, permitindo um escorregamento dos pés ao caminhar, a altura do passo que pode influenciar fazendo com que o pé não saia totalmente do chão, e ainda o período do ciclo do passo, fazendo com que a inércia do robô seja maior do que a ação dos atuadores resultando em um giro do seu corpo em torno da direção Y.

Destaca-se que os atuadores que giram o corpo em torno da direção Y não foram utilizados durante a trajetória, o que poderia ser uma solução para evitar a trajetória curva em uma malha de controle fechada.

Os atuadores dos braços também foram travados durante o movimento, o que caso contrário poderia contribuir para o equilíbrio dinâmico e ainda reduzir os esforços nos atuadores.

Foram então obtidos os torques nos atuadores conforme Fig.9.

Ao final da simulação podem ser verificados torques máximos nos atuadores no valor de aproximadamente 1500N.mm, o qual é referência para a compra de motores na construção do robô.

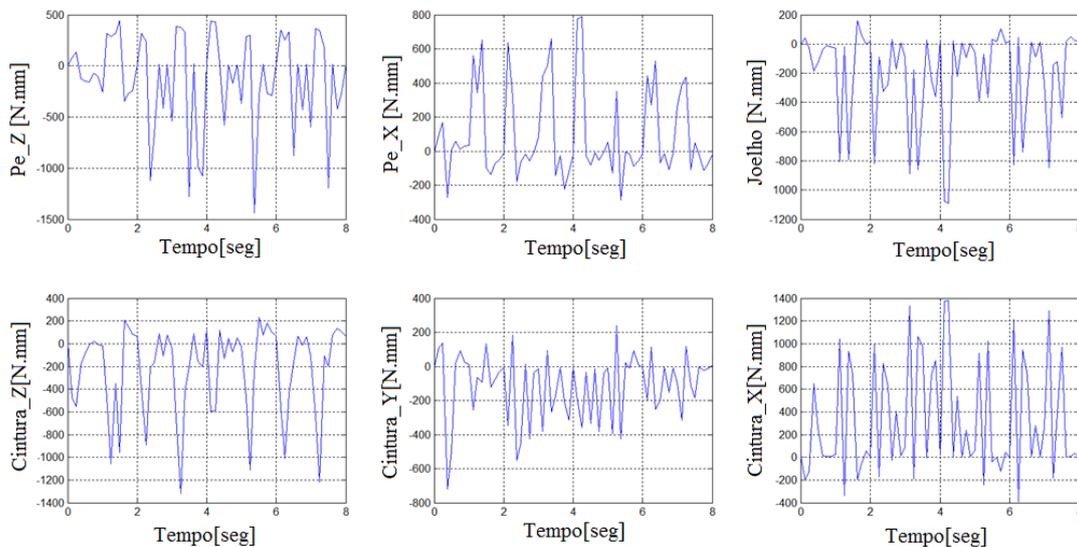


Figura 9. Torque dos atuadores ao longo da trajetória.

5. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho foi possível obter o modelo cinemático de um robô humanoide e em seguida definir uma trajetória para os seus pés garantindo o equilíbrio dinâmico enquanto ele caminha.

Avaliou-se uma metodologia para simulação CAD-CAE, possibilitando a análise dinâmica dos torques nos atuadores e uma leitura dos sinais das posições instantâneas do centro de massa e dos pés. A partir da trajetória definida e das velocidades angulares dos atuadores calculadas foi possível verificar que o robô não se desequilibrou ao longo da caminhada, porém foi verificada uma trajetória curva, a qual não havia sido ajustada. Possíveis justificativas para os erros verificados são os valores ajustados para o coeficiente de atrito entre os pés e o solo, a altura do passo fazendo com que o pé não saia totalmente do chão e ainda o período do ciclo do passo, fazendo com que a inércia do robô seja maior do que a ação dos atuadores.

Foram verificados torques máximos nos atuadores no valor de aproximadamente 1500 N.mm, o qual é referência para a compra de motores na construção do robô.

Destaca-se que o modelo simulado não possui nenhuma malha de controle. A partir da metodologia desenvolvida neste trabalho, e após a definição dos parâmetros em malha aberta para garantir uma trajetória retilínea, será possível em seguida implementar um sistema de controle em malha fechada o qual permitirá, através da realimentação dos sinais de posição dos pés e do centro de massa, garantir que a trajetória seja conforme a definida.

Visto que a simulação é controlada pelo Simulink, torna-se direta a implementação de diferentes lógicas de controle prevendo inclusive a ação de esforços externos, as quais poderão ser validadas para em seguida ser implementadas no controlador do robô humanoide que será construído.

6. AGRADECIMENTOS

À Equipe de Desenvolvimento em Robótica Móvel - EDROM da UFU e aos órgãos de fomento CAPES, FAPEMIG e CNPQ.

7. REFERÊNCIAS

Angeles, J., 2003. "Fundamentals of robotic mechanical systems: Theory, Methods, and Algorithms". Springer-Verlag, New York, 2.ed., 521p.

Raibert, M. H., Chepponis, M., Brown, Jr. H. B. , 1986. "Running on Four Legs As Though They Were One". IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, No. 2.

RoboCup Soccer Humanoid League, 2014. "Rules and Setup for the 2014 Competition in João Pessoa".

Sousa, V. F., Marra, F. B., 2011. "Desenvolvimento De Um Robô Humanoide Para Competições". Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia.

Tsai, L.-W., 1999. "Robot analysis: the Mechanics of Serial and Parallel Manipulators". John Wiley & Sons, New York.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF A HUMANOID ROBOT FOR COMPETITIONS

Vinícius Abrão da Silva Marques, vinicius@icte.uftm.edu.br

Rogério Sales Gonçalves, rsgoncalves@mecanica.ufu.br

João Carlos Mendes Carvalho, jcmendes@mecanica.ufu.br

¹Av. Doutor Randolpho Borges Júnior 1250 - Univerdecidade - Uberaba - MG - CEP 38064-200.

²Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica - Bloco M - Uberlândia - MG - CEP 38408-100

Abstract. *The development of mobile robotics is related to multidisciplinary areas of mechanics, electronics, computing and biology. Current research have made possible the development of robots that assist in exploration, rescue and biomechanics, using artificial intelligence techniques, optimization and dynamic analysis of multibody systems . This work aims the synthesis of a humanoid and get the theoretic robot kinematic model allowing to define its movement in order to maintain dynamic balance and evaluate the torques applied on their actuators using CAD-CAE simulation . From the computational solid model and using numerical simulation of multibody systems , it was possible to obtain the dynamic torques in the structure of the robot and the position of its center of mass and legs along the defined path. With this study was evaluated a methodology for multibody simulation mechanisms applied in projects of humanoid robots.*

Keywords: *robotics, robot humanoid, kinematics, dynamics, optimization*