

ASPECTOS DA LOCOMOÇÃO BIOINSPIRADA E SIMULAÇÃO DE ROBÔ MODULAR APODAL

Rute Borges Miranda dos Santos, rute.borges@live.com¹

Vitor Hugo Prado Gomes, vitorhpgomes@gmail.com¹

João Vitor Quintiliano Silvério Borges, jquintiliano@gmail.com¹

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br¹

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, carla.koike@gmail.com²

¹Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900

²Depto. de Ciência da Computação, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900

Resumo: O trabalho foi desenvolvido com base nos estudos acerca da locomoção inspirada no movimento de cobras tendo em vista a aplicação em robótica modular. Em terrenos que envolvem obstáculos como escadas, buracos ou passagens estreitas, um robô móvel convencional pode não ser apropriado. Nesse caso, um robô modular, formado por um conjunto de módulos semelhantes conectados entre si, possui maior versatilidade que um robô convencional, pois é capaz de assumir configurações diferentes e assim executar as tarefas indicadas, por exemplo: pode assumir a forma de uma cobra e passar por um buraco estreito ou se locomover em terreno acidentado. Nesse sentido, o objetivo do trabalho consiste em apresentar aspectos dessa locomoção bioinspirada seja de forma progressiva, com movimento vertical o qual só é possível devido ao atrito, que é maior na direção transversal ao movimento, seja por meio do movimento *sidewinding* realizado pelas cobras do deserto, que é uma combinação de movimentos horizontais e verticais que dependem da posição que os módulos são organizados. A representação desses movimentos foram feitas através de simulação computacional e a análise dos resultados permitirá avaliar características geométricas e estabilidade da locomoção antes da construção de um protótipo.

Palavras-chave: Locomoção Bioinspirada, Robótica modular, Simulação computacional, Cobras.

1. INTRODUÇÃO

A biomimética é uma área de estudo que se baseia nos métodos, processos e design da natureza, afirma Schmitt (1969 apud Bar-Cohen, 2005). A utilização da biomimética neste projeto consiste na representação dos movimentos das cobras do deserto em um robô modular apodal, que possui a capacidade de se locomover sem utilização de rodas. No movimento realizado pelas cobras do deserto, utiliza-se dois pontos de apoio ao longo de seu comprimento e realiza-se duas ondulações, como afirma Gomez (2008). Já Hirose (2009, apud França, 2016), enfatiza a importância desse tipo de estudo devido aos mecanismos utilizados e na futura aplicabilidade.

O robô é constituído de módulos que são conectados através de juntas, onde todos os módulos possuem a mesma estrutura e mesmos componentes internos e podem a qualquer momento serem reparados. Este padrão vêm sendo utilizado em antigos robôs que haviam sendo trabalhados, entretanto, o que difere do trabalho atual é a quantidade de graus de liberdade, estrutura e design.

Os pioneiros apresentam um grau de liberdade, ou seja, possuem apenas um motor em cada módulo, podendo assim realizar apenas movimentos horizontais ou verticais, sendo possível apenas a realização do movimento vertical (*pitch*), pois o movimento horizontal (*yaw*) é impossibilitado nessas condições devido a grande quantidade de atrito na superfície de contato com o solo.

Já o atual possui dois graus de liberdade, ou seja, possuem dois motores em cada módulo, podendo assim realizar movimentos combinados verticais e horizontais que proporcionam ao robô mais opções de configurações para realização de diferentes tipos de movimentos como por exemplo, subir escadas.

Sendo assim, o objetivo na construção e simulação do robô, é obter a reprodução da movimentação em três dimensões a partir de simulação computacional. Para alcançar tal objetivo, utilizou-se as equações do movimento descritas por Gomez (2008) para uma orientação acerca da locomoção do robô, baseou-se também nos estudos de França (2016) para uma orientação acerca do atrito que tem um papel fundamental na locomoção. Foi utilizado o software V-REP PRO EDU para simular a movimentação em diferentes cenários e o software SolidWorks para

realização de desenho mecânico e geração de dados como centro de massa. Utilizou-se também a simulação para representação do robô no momento da realização do movimento *pitch-pitch* com a estrutura e design do atual.

2. EQUAÇÕES DISCRETAS DO MOVIMENTO

Em primeiro instante foi analisado a cinemática do movimento das cobras, através da Eq. (1) e Eq. (2), que descrevem o movimento horizontal e vertical, respectivamente e são utilizadas nos estudos de Gonzalez, Gomes (2008). As equações podem ser descritas senoidalmente, devido a isso, o movimento pode ser chamado de movimento sinuoso e seus parâmetros encontram-se descritos na Tab.1.

$$\varphi_{Hi}(\phi) = \theta_H(\phi):_{s=(i-1)d+d_0} = 2\alpha_H \sin\left(\frac{2\pi k_H}{M}\right) \sin\left(\varphi + \frac{4\pi k_H}{M}\left(i - 1 + \frac{d_0}{d}\right) + \Delta\phi_{VH}\right) \quad (1)$$

$$\varphi_{Vi}(\phi) = \theta_V(\phi):_{s=(i-1)d+d_0} = 2\alpha_V \sin\left(\frac{2\pi k_V}{M}\right) \sin\left(\varphi + \frac{4\pi k_V}{M}\left(i - 1 + \frac{d_0}{d}\right)\right) \quad (2)$$

Tabela 1. Parâmetro das equações.

Parâmetros	Descrição	Variação
K	Número de ondulações	$k \geq 1$
A	Ângulo	$\alpha \in [0, 120]$
M	Número de articulações	$M \geq 2$
D	Distância entre as juntas	$d > 0$
d_0	Seguimento esquerdo	$d_0 > 0$
ϕ	Fase	$\varphi \in (-180, 180]$
I	Número da junta	$i \in \{1, M\}$

A Figura 1 foi desenhada com base nas referências de curva em duas dimensões utilizadas por Gomez (2008), ela representa o movimento *pitch-yaw*, realizado em três dimensões, onde no modelo com dois graus de liberdade, a letra “d” representa um módulo e cada “d0” representa o eixo que o servo motor se conecta. Esta representação é chamada de representação discreta da curva senoidal, pois são utilizadas barras e pontos para tal descrição de movimento.

O tipo de seção na geometria do desenho impõe restrições no valor de α que contribui para o robô não rolar quando $\alpha < \alpha$ máximo e contribui também para não haver tombamento no momento que os módulos estiverem no ar se esse α for minimizado respeitando os parâmetros de número de onda, diferença de fase, distância do motor ao eixo e amplitude.

Para realizar o movimento com dois graus de liberdade, cada módulo deve possuir dois motores em suas extremidades e, de acordo com a posição do motor, ele realizará o movimento *pitch* (vertical) em uma extremidade e na outra o *yaw* (horizontal). Para obter o robô cobra deve-se agrupar os vários módulos. Segundo Gomez (2008), o número de módulos por ondulação depende do torque do motor, pois, quanto maior o número de módulos realizando uma onda, maior o número de módulos suspensos, sendo assim, o torque deve ser suficiente para levantar $M-1$ módulos suspensos, considerando o peso de 3 Newtons de cada módulo incluindo os componentes internos..

Segundo França (2016), as serpentes se locomovem alterando a forma de seu corpo, ancorando regiões com o intuito de se impulsionar para frente, isso torna evidente a importância do atrito na locomoção. Sendo assim, é necessário a reprodução do atrito anisotrópico no estudo da locomoção, entretanto, no simulador os parâmetros utilizados como coeficiente de atrito não representam um valor de atrito real.

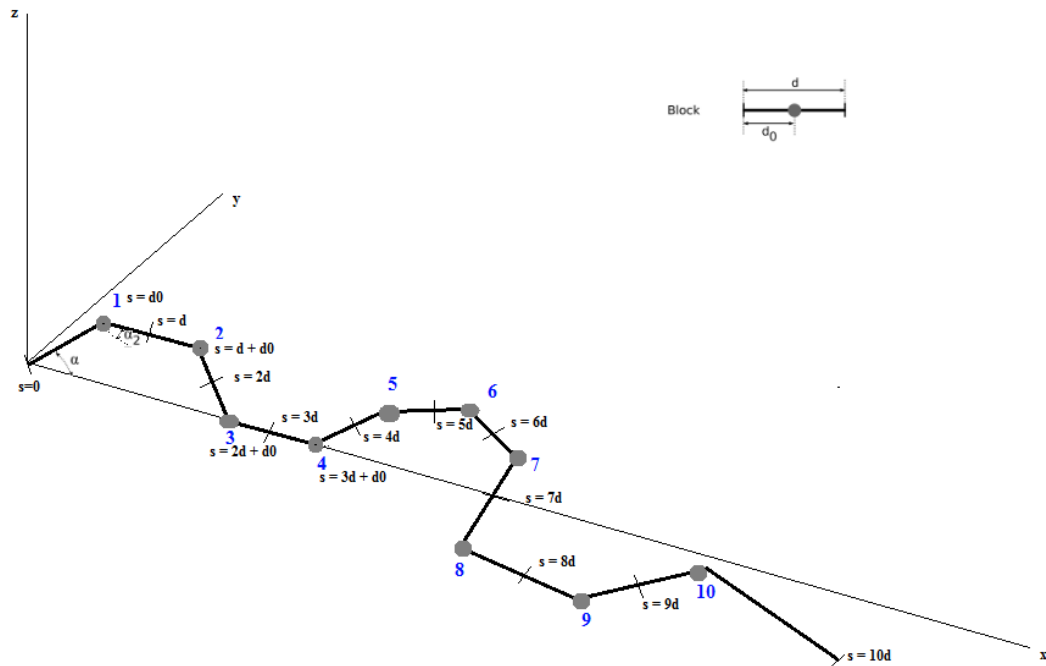


Figura 1 - Exemplo de curva senoidal para $M=10$.

2.1. Representação geométrica do módulo

Na construção do modelo foi utilizado um octaedro como base para acoplar todos os componentes internos com exceção do motor, que é encaixado em cada extremidade de forma alternada, com isso, além de possibilitar a movimentação pitch-yaw, a posição do motor auxilia no equilíbrio de massa do módulo.

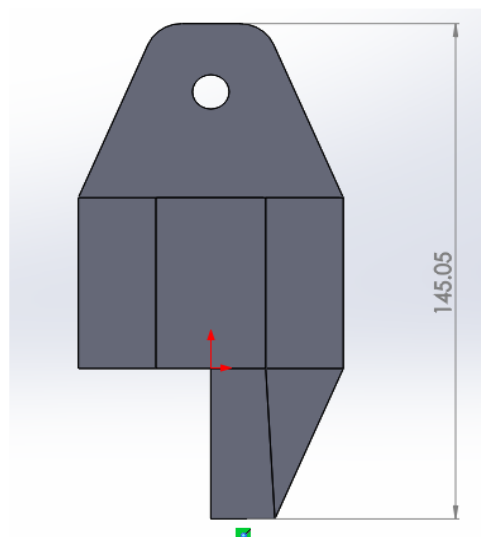


Figura 2. Vista Frontal módulo com dimensão de comprimento em milímetros (0.145 metros)

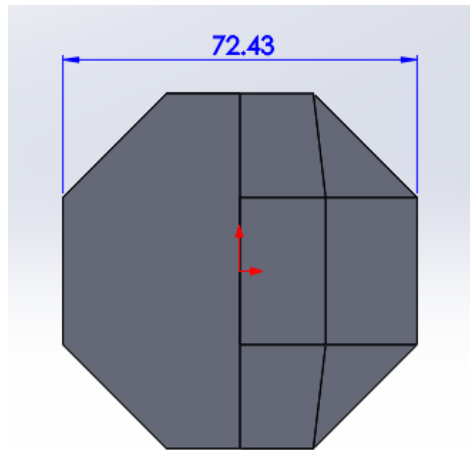


Figura 3. Vista Superior do módulo com dimensão em milímetros (0.07243 metros) da base octaédrica

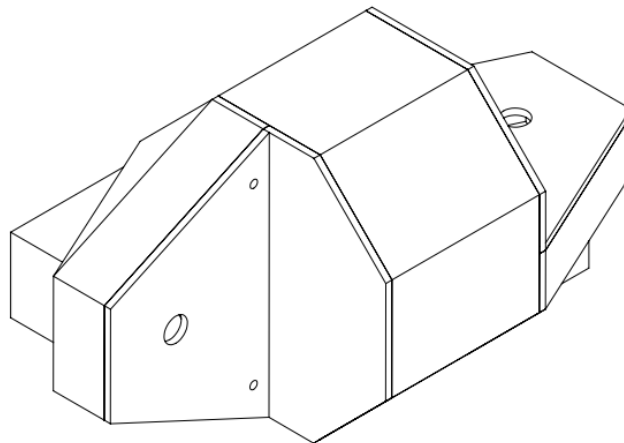


Figura 4. Desenho isométrico do módulo

2.2. Modelo Computacional

A importação completa da geometria gerada no programa SolidWorks seria inviável para a simulação. Por conseguinte foi necessário recriá-la de forma simplificada, onde a estrutura externa que tem contato com o ambiente e todas as características mecânicas do módulo foram adaptadas, como mostra a Fig. 5. Por outro lado, a massa, o centro de massa e os momentos de inércia, foram calculados pelo SolidWorks e transportados para o modelo computacional. Os módulos foram conectados utilizando juntas, representadas pelos cilindros laranjas da Fig. 5, que fazem o papel dos servomotores e hastes móveis que possibilitam o movimento com dois graus de liberdade.

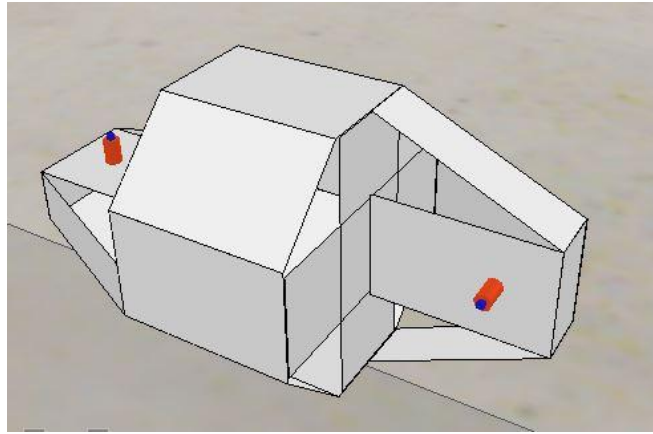


Figura 5. Módulo simplificado feito no V-REP PRO EDU

3. RESULTADOS

.Definido o valor de torque de 3N.m com base nos esforços necessários para a movimentação do robô, foram realizados testes de simulação por meio do programa V-REP PRO EDU. O movimento *pitch-pitch*, ou seja, o movimento em que permite apenas movimentação na horizontal, utiliza apenas os motores que levantam os módulos no eixo Z e utiliza a Eq. (1) para o controle das juntas. Foi feita uma simulação de 50 segundos utilizando o valor de $k = 1,5$ e $\alpha = 10^\circ$ para se obter os gráficos de deslocamento nos eixos X, Y e Z. A Figura 6 mostra a visão superior no momento de início da simulação e a Fig. 7 mostra a visão superior no final após os 50 segundos de simulação



Figura 6. Posição inicial na simulação

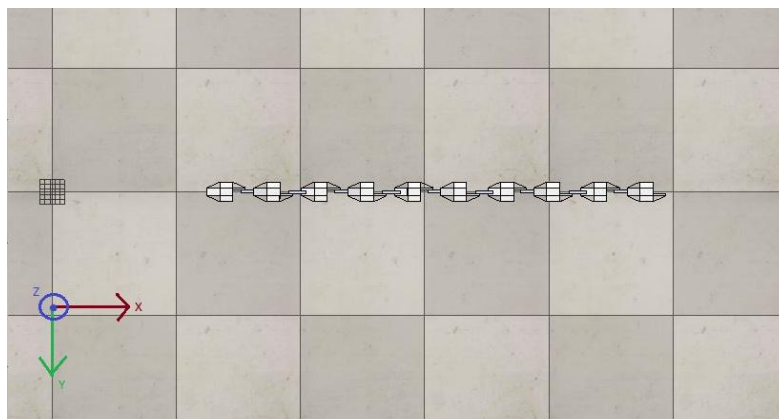
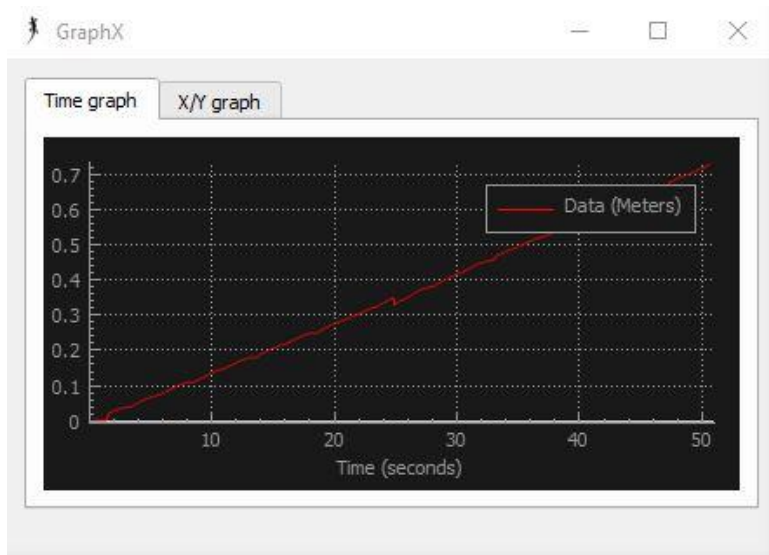


Figura 7. Posição do robô após 50 segundos de simulação para o movimento *pitch-pitch*

As Figuras 8, 9 e 10 mostram o deslocamento do robô durante toda a simulação. A Figura 8 mostra o deslocamento do robô no eixo X, que é linear e com uma velocidade aproximada de 0,84 m/min. A Figura 9 mostra o deslocamento do robô no eixo Y, que é para ser aproximadamente 0 se o robô estiver bem balanceado e se os centros de massa dos módulos estiverem alinhados. Alguns erros na simulação causam um deslocamento instantâneo no robô, porém, mesmo após esses erros instantâneos, o deslocamento no eixo Y é muito baixo até outro erro acontecer. A Figura 10 mostra o deslocamento de um dos módulos no eixo Z, medido no módulo da esquerda na Fig. 6, e, como o movimento *pitch-pitch* levanta os módulos no eixo Z, o deslocamento deste módulo, e de todos os outros, é definido pela Eq. (1) e seus parâmetros.

**Figura 8. Gráfico do deslocamento no eixo X para o movimento *pitch-pitch*.****Figura 9. Gráfico do deslocamento no eixo Y para o movimento *pitch-pitch*.**

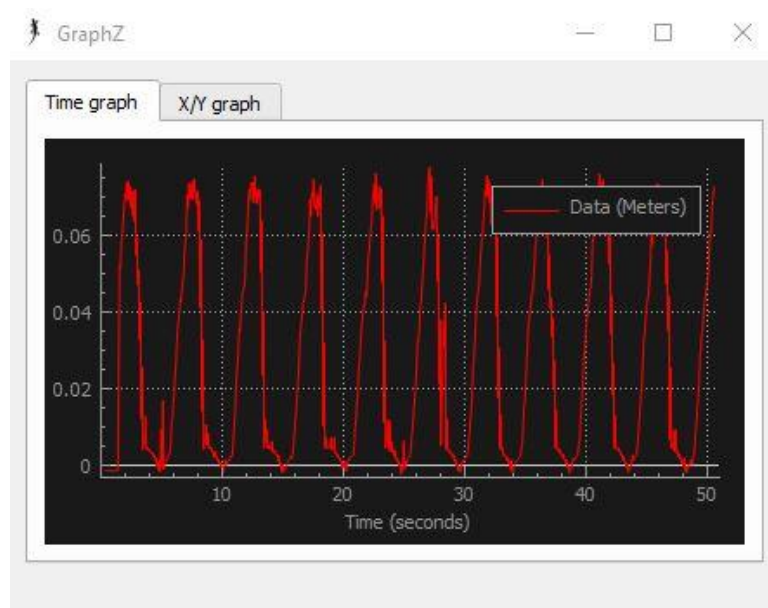


Figura 10. Gráfico do deslocamento no eixo X para o movimento *pitch-pitch*.

Para determinar a influência de α no deslocamento em X, repetiu-se a simulação alterando apenas o valor de α . Os dados obtidos estão na Tab. 2.

Tabela 2. Influência do parâmetro α no deslocamento em X.

Valor de α ($^\circ$)	5	7	9	10	11	13	15
Deslocamento X(m)	0.35	0.45	0.62	0.7	0.81	0.95	1.03

Além da simulação do movimento *pitch-pitch*, foi feita a simulação do movimento *sidewinding*, utilizando as Eq. (1) e (2) com os mesmos parâmetros da simulação anterior, e obteve-se os gráficos de deslocamento em X, Y e Z. A Figura 6 mostra a visão superior no momento de início da simulação e a Fig. 11 mostra uma vista superior do robô após 50 segundos de simulação do movimento *sidewinding*.



Figura 11. Posição do robô após 50 segundos da simulação do movimento *sidewinding*.

A Figura 12 mostra o deslocamento do robô no eixo X, que é linear e com uma velocidade aproximada de 0,35 m/min. No instante $t = 37$ segundos, ocorre um pequeno erro na simulação onde o robô se desloca 0,08 metros

instantaneamente. A Figura 13 mostra o deslocamento do robô no eixo Y, que possui uma componente linear e uma componente senoidal. A componente senoidal vem do controle das juntas através da Eq. 2, e a componente linear mostra que o robô não está andando paralelamente ao eixo X. A Figura 14 mostra o deslocamento do módulo no eixo Z, que é igual à simulação feita para o movimento *pitch-pitch*, uma vez que o movimento *yaw* não interfere nesse eixo.

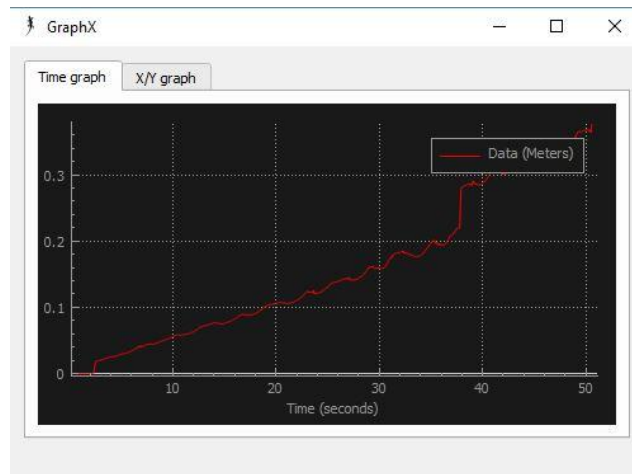


Figura 12. Gráfico do deslocamento no eixo X para o movimento *sidewinding*.

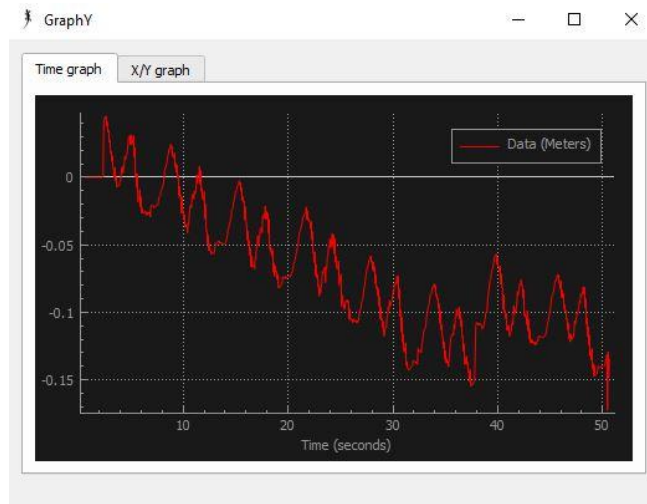


Figura 13. Gráfico do deslocamento no eixo Y para o movimento *sidewinding*.

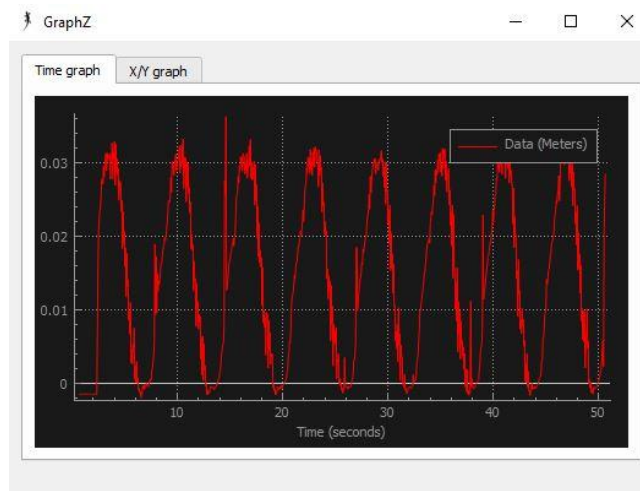


Figura 14. Gráfico do deslocamento no eixo Z para o movimento *sidewinding*.

4. CONCLUSÕES

De acordo com a simulação do movimento *pitch-pitch* pode-se observar que o movimento realizado pelo robô é praticamente todo no eixo X e pode-se alterar esse deslocamento mudando o parâmetro $\square$. As Figuras 9 e 12 mostram a senóide que controla o movimento do robô no eixo Z, que é descrita pela Eq. 1 e a Fig. 11 mostra a senóide descrita pela Eq.2 O movimento *sidewinding* tem um deslocamento duas vezes menor que o do *pitch-pitch* e ainda tem um deslocamento indesejável em Y. O estudo do movimento através da simulação serve para nos direcionar em relação aos possíveis valores de coeficiente de atrito que podemos usar para melhorar o movimento *sidewinding*, de acordo com o torque do motor e analisar como o robô se comporta com base nos parâmetros que são definidos como números de ondulações, articulações e ângulo de inclinação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade de Brasília e ao CNPq pelo suporte ao trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bar-Cohen, Y., 2005, "Biomimetics: mimicking and inspired-by biology", Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, San Diego, CA.
- Gomez, J. G., 2008, "Modular Robotics and Locomotion: Application to Limbless Robots". Ph.D. thesis. Universidad Autonoma de Madrid, Madrid, 471p.
- Hirose, S. Yamada, H., 2009, "Snake-like robots" [Tutorial]. IEEE Robotics & Automation Magazine, v. 16, n. 1, p. 88-98.
- Jayme, R. F., 2016, "Influência do Atrito na Locomoção de Robôs Apodais". Projeto de final de curso. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília. 73p. Brasília.
- Rohmer, E., Singh, S. P. N. and Freese, M., 2013, "V-REP: a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework". Proceedings of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo.
- Schmitt O. H., 1969, "Some Interesting and Useful Biomimetic Transforms," Proceedings of Third International Biophysics Congress, Boston.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ASPECTS OF BIOINSPIRED LOCOMOTION AND SIMULATION OF AN APODAL MODULAR ROBOT

Rute Borges Miranda dos Santos, rute.borges@live.com¹

Vitor Hugo Prado Gomes, vitorhpgomes@gmail.com¹

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br¹

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, carla.koike@gmail.com²

¹Mechanical Engineering Department, University of Brasilia, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900

²Science of Computing Department, University of Brasilia, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900

Abstract. The work was developed based on the studies about the locomotion inspired by the movement of snakes for the application in modular robotics. On terrain involving obstacles like stairs, holes or narrow passages, a conventional mobile robot may not be appropriate. In this case, a modular robot, formed by a set of similar modules connected to each other, has greater versatility than a conventional robot, because it's able to assume different configurations and thus perform the indicated tasks, for example: it can take the form of a snake and go through a narrow hole or move around in rough terrain. In this sense, the objective of the work is to present aspects of this bio-inspired locomotion either in a progressive way, with vertical movement which is only possible due to the friction, which is greater in the transverse direction to the movement, or through the sidewinding movement performed by the snakes desert, which is a combination of horizontal and vertical movements that depend on the position the modules are organized. The representation of these movements were made through computational simulation and the analysis of the results will allow to evaluate geometric characteristics and stability of the locomotion before the construction of a prototype.

Keywords: *Bioinspired locomotion, Modular robotics, Computer simulation, Snakes.*