

A RELEVÂNCIA DO DESIGN EM UM PROJETO DE ROBÓTICA MODULAR

Thaís França Galembeck, tfrancag@gmail.com¹

Dianne Magalhães Vianna, diannemv@unb.br¹

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

Carla Maria Chagas Koike, ckoike.unb.br²

¹Departamento de engenharia mecânica, Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900

²Departamento de ciência da computação, Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900

Resumo: A validação de um projeto em robótica pode ser feito por simulações computacionais ou testes experimentais, sendo que em ambos os casos deve-se definir um modelo, computacional ou físico, inicial do robô a ser desenvolvido cuja geometria e características mecânicas sejam capazes de realizar as tarefas objetivas especificadas em projeto. Neste trabalho é apresentado o processo de criação de um modelo físico e o projeto do protótipo de robô modular adequado aos estilos de movimentação desejados e às limitações quanto a viabilidade dos processos de manufatura de forma a obter a menor propagação de erros durante o período de validação de projeto.

Palavras-chave: design, robótica modular, movimentação cobra

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes motivações dos estudos em tecnologias bioinspiradas trata-se do processo de aperfeiçoamento pelo qual os seres vivos passaram ao longo de sua evolução para melhor adaptação ao meio em que se encontram, de forma a assegurar que cumpram a missão que lhes é atribuída: a sobrevivência. Entretanto, diferentes animais a cumprem de diferentes maneiras, de acordo com o contexto em que se inserem e é por isso, por exemplo, que a estrutura biológica de um peixe é diferente da de uma águia: eles atuam em meios distintos com seus próprios estilos de movimentação, alimentação e reprodução.

Em termos de robótica, um dos principais exemplos de projeto bioinspirado trata-se do **robô modular**, conceito introduzido por Fukuda *et al.* (1988) com o projeto CEBOT, ou o "*Robô Celular*", baseado na conexão entre *Módulos* homogêneos em uma estrutura redundante, a qual será chamada *Robô*, como indicado na Fig. 1. O esquema apresentado é similar ao de tecidos biológicos formados pela repetição de conjuntos de células capazes de interagir entre si em prol de uma missão específica. No caso de células, as *missões* costumam envolver criação, regeneração e alteração de tecidos enquanto as missões do robô podem ser resumidas em movimentar-se.

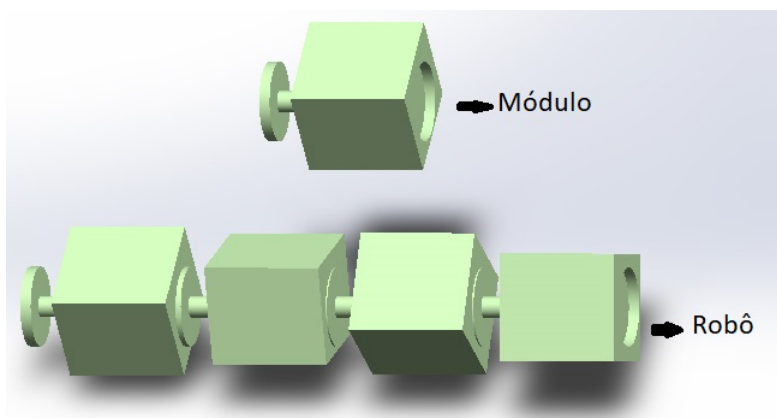


Figura 1: Distinção entre módulo e robô, tal qual será seguida neste trabalho.

O robô modular aqui apresentado tem como missão, a qual deve guiar seu design, o **deslocamento em terreno não especificado usando movimentação inspirada em cobras, comumente chamada de movimentação cobra**. Uma vez definida a missão e consequentemente o conceito do robô, é necessário planejar sua manufatura, a qual vai depender das necessidades a serem supridas pelo protótipo, o que por sua vez define os materiais adequados e técnicas e maquinário a ser procurado. É um processo em espiral, onde cada volta depende da anterior, afeta a primeira, e o distúrbio em qualquer ponto altera suas características. No caso de modelo físico, por exemplo, é necessário obter um balanço entre custos de produção e a necessidade de um projeto com tolerâncias construtivas extremamente altas, devendo-se levar em conta até a possibilidade de reformulação de geometria e parâmetros geométricos do modelo teórico para sua adequação com os meios de manufatura disponíveis. É preciso também manter em mente a etapa de desenvolvimento na qual o modelo será empregado. Ainda que modelos em papel sejam bons para se ganhar noção de dimensão e interação entre módulos, não é razoável planejar um protótipo de testes em terrenos sujeitos à umidade, poeira e detritos e que deve carregar componentes eletrônicos de papel.

Com os fatores acima listados em mente, este trabalho visa expor as etapas de processo de concepção e design do modelo a ser desenvolvido, baseando-se tanto nos conceitos obtidos através de revisão bibliográfica quanto em conclusões tiradas da análise de trabalhos anteriores.

2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

2.1 Robótica Modular

Os estudos em robótica modular para missões de busca e salvamento são impulsionados principalmente pela possibilidade de rearranjo estrutural proporcionando uma maior adaptabilidade ao terreno no qual o robô se movimentará, sendo um dos exemplos mais relevantes neste âmbito o projeto M-Tran desenvolvido por Kurokawa *et al.* (2002), em função de suas características de reconfiguração, como ilustrado na Fig. 2.

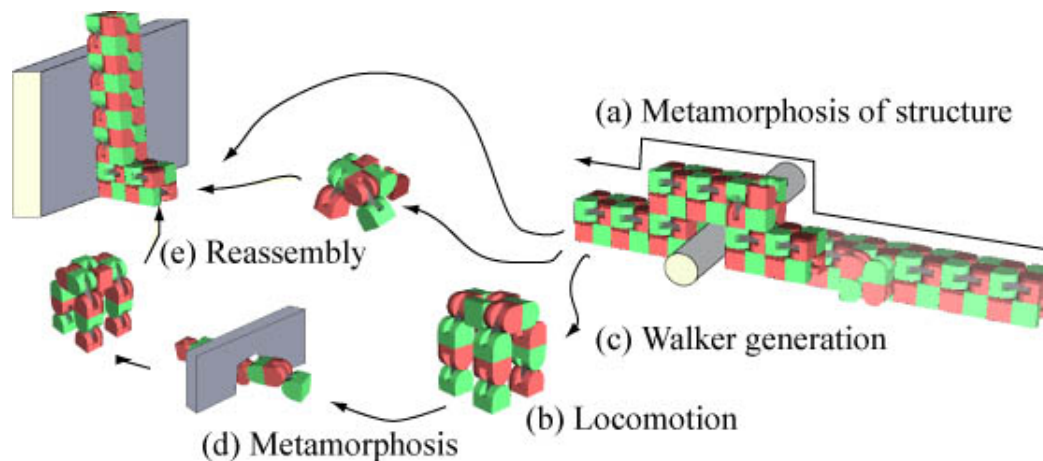


Figura 2: Exemplo de Robô Modular reconfigurável e sua transição entre diferentes estilos de movimentação: M-TRAN. Fonte: <https://unit.aist.go.jp/is/frrg/dsysd/mtran3/what.htm>, acessado em 24/09/2017

Em geral, o módulo é constituído de uma **armadura**, estrutura rígida responsável pelo contato com meio pelo qual se locomove e na qual são embarcados os componentes de alimentação, controle e acionamento, e por uma **junta**, que funciona tanto como conexão com o módulo seguinte como acionador. Na Fig. 3 é apresentada uma representação simplificada de módulo.

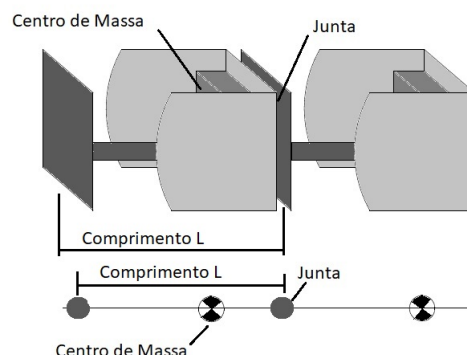


Figura 3: Representação discreta de um módulo genérico

Neste trabalho, a principal influência prática deu-se pelos projetos desenvolvidos pela equipe EREKO da Universidade

de Brasília, sobretudo por Souza *et al.* (2011) e Guimarães *et al.* (2016). Foram analisados os resultados anteriores quanto à movimentação e performance obtidos por modelos já consolidados, sendo alguns apresentados na Fig. 4

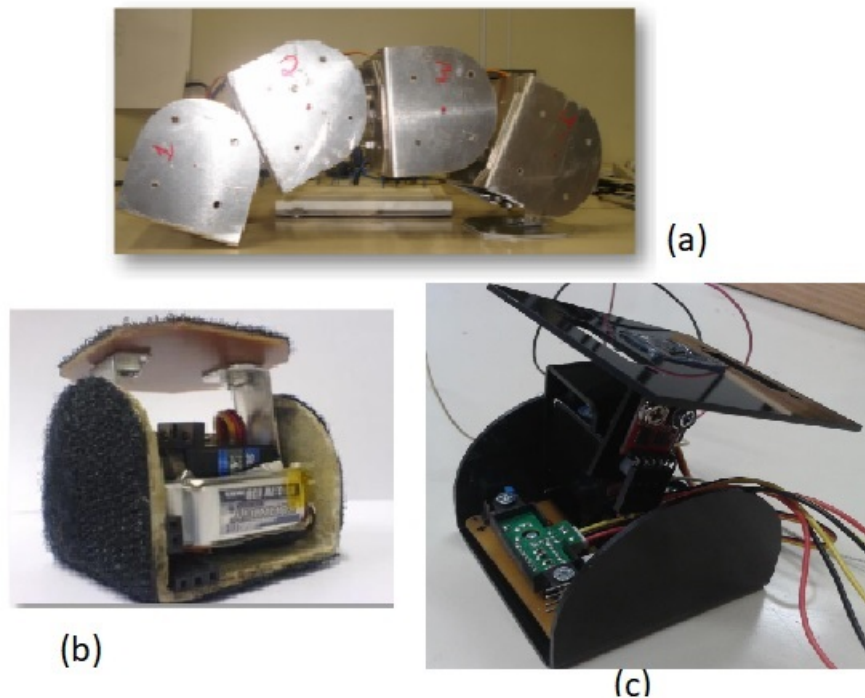


Figura 4: Alguns modelos da série Ereko, sendo a) Ereko *alpha*, b) Ereko *beta* c) Sigma Lily

Um dos principais desafios que se observa nos modelos da Série Ereko é precisamente a limitação que seus designs trazem à realização de alguns estilos de movimentação cobra.

2.2 Movimentação Cobra

Entre robôs modulares é comum encontrar projetos que possuem movimentação **apodal**, ou seja, sem uso de membros auxiliares como braços ou patas, sendo as cobras um dos melhores exemplos de animais que a executam. De fato, as principais equações de movimentação neste meio, e as que foram aqui consideradas, recebem os nomes de *Serpentóide* e *Serpentina*, desenvolvidas por Ma (1999) e Yamada *et al.* (2013) respectivamente. Estas recebem o nome de *Curvas de Movimentação*, posto que sua execução se assemelha à curva realizada pelo corpo das cobras durante seu deslocamento, como indicado na Fig.5.

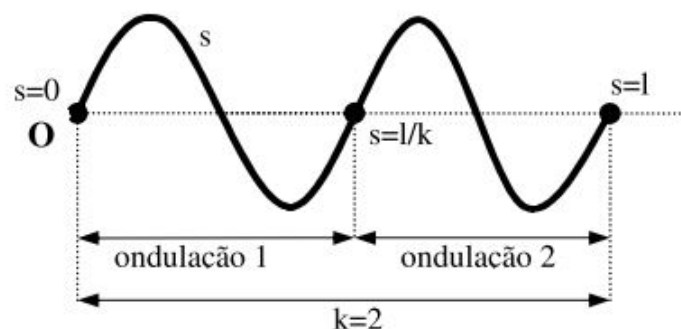


Figura 5: Esquematisação da curva Serpentóide. Fonte: Hirose *et al.* (1993)

O motivo para o extenso uso destas curvas dá-se pelas vantagens observadas no deslocamento de animais ápodas, discutidas por Dowling and Whittaker (1997), sendo as principais: estabilidade e adaptabilidade de terreno, ambas relevantes no escopo da missão aqui desejada (locomção por terrenos desconhecidos).

Mais relevante do que as curvas matemáticas, entretanto, foram os aspectos biológicos da movimentação cobra, principalmente quanto aos apresentados por Liljeback (2011) e resumidos na Tab.2.2

Pensar nos mecanismos que permitem a cobra mover-se, e como o animal as utiliza, é possível planejar um protótipo capaz de traduzir de forma mais ampla e fidedigna as curvas de movimento.

Ao se analisar os tipos de deslocamento, é impossível ignorar a importância de suas escamas. A movimentação das cobras faz uso de propriedades anisotrópicas de sua superfície, garantidas pelo formato e mobilidade de sua estrutura de escamas - que não devem ser confundidas com sua pele- para aplicar uma condição de limitação de escorregamento lateral (*side-slip condition*), a qual pode ser imitada pelo uso de rodas, como em Toyoshima *et al.* (2014) e exemplificadas na fig. 6 com um robô da série ACM.

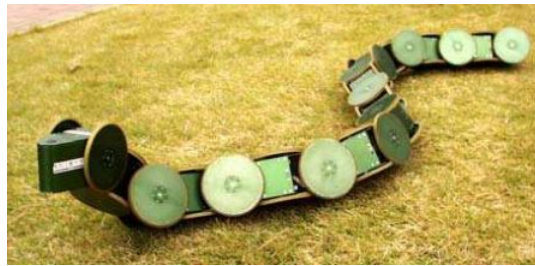


Figura 6: ACM-R3-21, robô cobra com rodas auxiliares, fonte: Toyoshima *et al.* (2014)

A sigla ACM significa *Active Cord Mechanism*, ou seja, um mecanismo ativado com estrutura mecânica e geométrica aproximada de uma corda - ou de uma cobra. São robôs ACM aqueles cuja seção transversal seja aproximadamente circular e cujo comprimento total (de uma ponta até a outra) seja relativamente maior que a dimensão transversal de suas partes. Em geral, são robôs redundantes e homogêneos, com repetição de uma mesma configuração por toda sua extensão.

Tabela 1: **Tipos de movimentação cobra mais comuns, aplicações e funcionamento**

Movimento	Utilização	Interação com Terreno
Movimentação Lateral	Terrenos de baixo escorregamento ou debaixo d'água	A cobra faz uso das irregularidades do solo - ou da resistência da água - e de suas distribuições desigual de peso para empurrar seu corpo. Neste caso, não há contato estático em nenhum ponto do movimento
Movimentação Linear	Usado antes do bote. O menos eficiente porém mais silencioso	A cobra distende e contrai partes do seu corpo de forma alternada, de forma a esticar suas escamas e usá-las como anzóis, enganchando-as em irregularidades do terreno
Concertina	Espaços estreitos e de movimento limitado	A cobra usa paredes do local e a disposição de suas escamas para se movimentar num sistema de ancoragem alternada: ela enrola parte do corpo, aumentando a influência do atrito ali, e movimenta o restante

Em termos biológicos, a necessidade das escamas é indiscutível, com resultados extensos de sua influência e controle sendo apresentados por Huang and Yang (2014), mas ainda existe algum debate quanto à sua reprodução nos âmbitos da robótica.

Em 2002, Grabec (2002) concluiu que a adição de anisotropia era antes um problema do que uma solução, mas seus resultados são pouco aplicáveis aqui posto que seus estudos baseiam-se apenas na movimentação linear. Em 2008, Transteth *et al.* (2008) foca mais em situações de desmoronamento e confirma que diferentes parâmetros na superfície de contato de fato dificultam a modelagem, mas também afetam diretamente o desempenho do robô. Em 2015, Serrano *et al.* (2015) faz testes empíricos para provas que a eficiência de um robô pode ser alterada de acordo com diferentes estruturas de escama feitas em prototipagem rápida.

Uma conclusão mais aceitável, e que será usada neste trabalho, é que a anisotropia não é indispensável para que um robô ápole se movimente, mas é necessária para que ele possa efetuar uma gama maior e mais interessante de movimentos.

3. METODOLOGIA

Animais que vivem em meios diferentes possuem características biológicas e fisiológicas distintas. A mesma lógica se aplica aos robôs, o projeto de um robô cirurgião provavelmente não servirá à demanda de um robô de exploração submarina - corre-se o risco tanto de sub quanto de super dimensionamento, além da possibilidade de um projeto conceitual simplesmente inútil para a função atribuída. Isso não diz respeito apenas à aparência externa ou mesmo à geometria do robô mas também à lógica de sua modelagem.

Um robô utilizado em cirurgias precisa de um nível de precisão para sua movimentação extremamente alto, o que implica na necessidade de um sistema de controle e compensação de atrito durante sua movimentação, como discutido por Bona and Indri (2005). Assim, ao se considerar atrito, deve-se selecionar modelos de atrito e as formas de aquisição de seus parâmetros, além da necessidade ou não de sensores capazes de obter tais parâmetros, e também sua forma de

alimentação e funcionamento. De certa forma, a missão é a única parte fixa de uma espiral de projeto que se monta e remonta ao longo do avanço do mesmo.

Assim sendo, foi planejado e seguido um roteiro a ser seguido para o design do robô em questão, a fim de obter um design aplicável em robótica modular capaz e realizar os movimentos mais comuns e gerais dentro do tipo de locomoção escolhido. Todas as etapas tiveram que ser justificadas tanto pelas vias teóricas quanto pelas práticas - incluindo realização de testes de parâmetros isolados (como estabilidade, movimento relativo entre módulos e curvas de movimentação)

3.1 Parâmetros da Missão

O robô modular deve ser capaz de se locomover em ambiente desconhecido para missões de reconhecimento, busca e salvamento, fazendo uso das curvas de movimentação inspiradas em cobras. Assim sendo, trata-se de um robô ápole, sem estruturas extras capazes de auxiliar sua locomoção.

Para se realizar as curvas de movimentação é preciso que os atuadores dos módulos sejam capazes de executar graus de liberdade (GDL) adequados para com a curva utilizada. Os graus de liberdade possuem dois parâmetros: valor e direção, sendo importante evitar confusão entre a direção local (executada pelo atuador) e a global (resultante das direções locais dos módulos observada no deslocamento do robô). Para movimentações 3D, que seriam uma aproximação mais fiel às movimentações Lateral e Concertina apresentadas na Tabela 2.2 faz-se necessária a combinação de no mínimo duas direções de graus de liberdade, como sugerido na Fig. 7. Esse é o primeiro ponto a ser considerado: a capacidade do módulo de suportar atuadores e garantir que sua geometria e modo de conexão não atrapalhe a execução de qualquer GDL necessário.

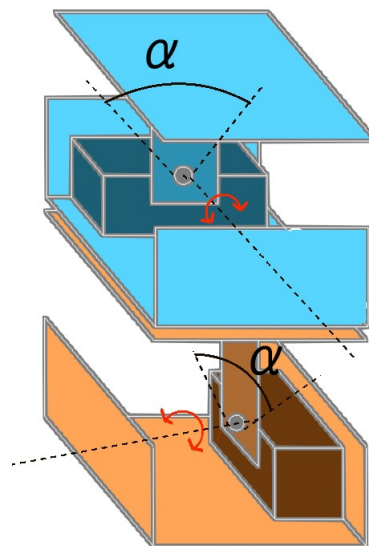


Figura 7: **Representação de grau de liberdade nos atuadores. No caso, os dois módulos são 1-GDL, com GDLs perpendiculares, ambos relacionados e um grau máximo de movimentação α**

Além disso, tratando-se de um robô ápole, conclui-se de que a estrutura de armadura dos módulos estará em contato constante com o solo no qual se movimenta, definindo assim que a armadura deve ser idealmente, ser fechada, protegendo seus componentes internos (sistema de alimentação, controle, conexão, atuadores e demais sensores) de poeira e elementos externos. Ao se considerar em conjunto a questão da atuação e da movimentação por contato, limita-se os materiais possíveis na confecção da armadura àqueles que apresentem baixos níveis de deformação. A deformação excessiva pode causar erro de coordenadas de movimentação, danos à estrutura e inadequação do protótipo em relação às equações das curvas de deslocamento, dificultando uma análise comparativa entre teoria e prática.

Tratando-se de um ambiente desconhecido, o uso de rodas que garantam a condição de deslocamento lateral é descartada, posto que as rodas adicionam a necessidade de mais um atuador, maior consumo elétrico além de serem em si um novo ponto para acúmulo de detritos que podem não apenas causar mal funcionamento externo mais contaminarem o ambiente interno do módulo e seus equipamentos.

Ao se descartar o uso de rodas de auxílio laterais, e tendo em vista os resultados quanto à influência do atrito anisotrópico na movimentação cobra, acaba-se por ser necessária a adoção um design de armadura que consiga reunir a liberdade de movimentação com a aplicação de escamas, a fim de garantir que o robô consiga obter condição de deslocamento lateral. Possíveis configurações de escama são oferecidas no trabalho de Jayme (2016). Pode-se tanto fazer um módulo com acabamento superfícies anisotrópico ou criar uma superfície à parte removível.

4. RESULTADOS

Ao fim das análises quanto à missão, seus parâmetros e limites além de uma análise retrospectiva de designs anteriores utilizados em robótica modular de movimentação ápole foram desenvolvidos três modelos de protótipo a serem utilizados

na composição do robô denominado **VDM**.

Os modelos estão apresentados na Fig. 8. Os dois primeiros modelos são denominados VDM-Y e VDM-T, Módulo de **Movimentação** e **Transição**, respectivamente. Ambos tem por função exclusiva realização de movimentos pitch-pitch, ywa-ywa e pitch-yaw. Quanto ao terceiro modelo, VDM-C, suas principais diferenças são o tamanho e o fato de possuir apenas uma estrutura de junta podendo assim receber um número maior de sensores além de, graças à sua face com estrutura de gancho pode permitir ao robô agarrar-se à uma superfície irregular para guinadas ou estabilidade.

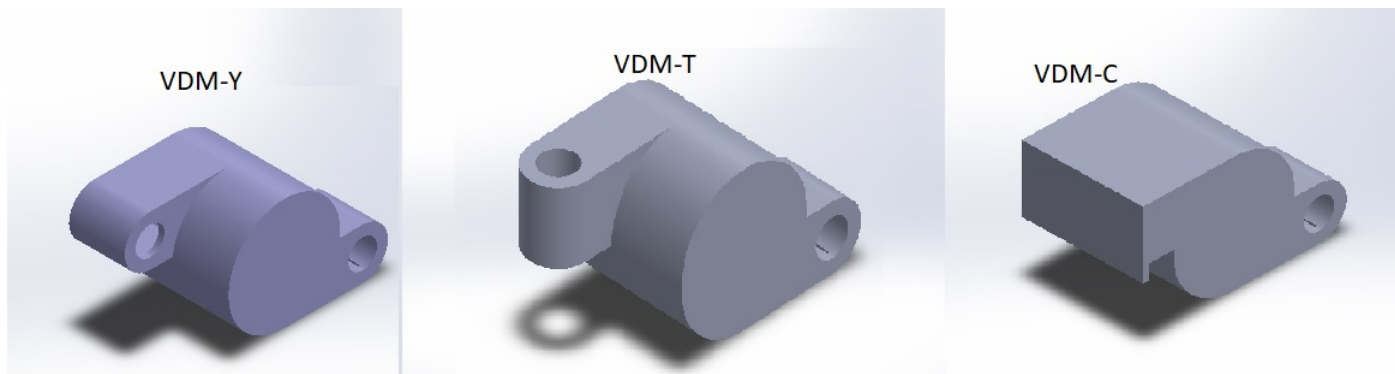


Figura 8: Design dos três protótipos da série VDM

A geometria externa dos módulos permite conexão intercambiável entre eles (respeitando-se à limitação de conexão do VDM-C), como mostrado na Fig. 9. Por um lado, essa configuração quebra o princípio da homogeneidade observado em robôs modulares, principalmente por facilitar sua modelagem e movimentação no que diz respeito à equilíbrio e estabilidade. Entretanto, da forma com foram construídos, nenhum dos modelos VDM fere a ideia de um robô ACM, enquanto o robô é capaz de manter um perfil que caiba em um cilindro. Assim, o robô heterogêneo é plenamente capaz de realizar as curvas de movimentação cobra.

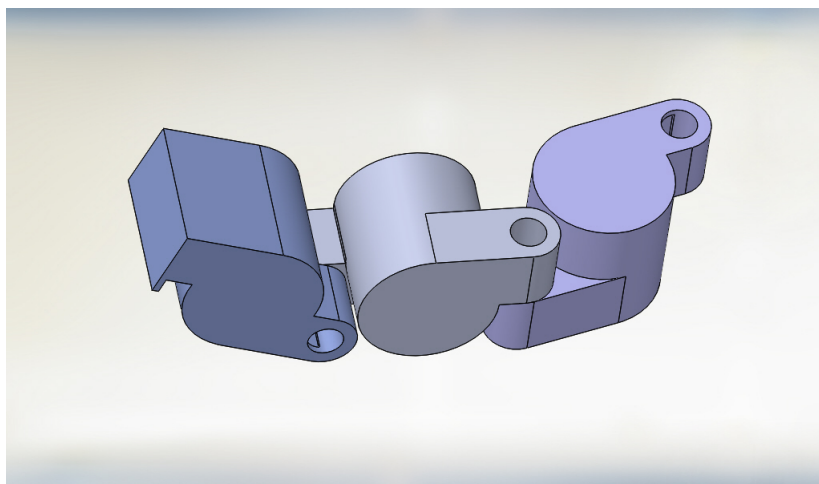


Figura 9: Conexão entre os três modelos VDM

Além disso, graças à possibilidade de misturar módulos com diferentes orientações de GDL, pode-se garantir que com a fabricação desses 3 modelos possa-se realizar testes de validação para movimentação Pitch-Pitch e Pitch-Yaw apenas com remanejamento da ordem de conexão, como indicados em Fig.10 e Fig.11.



Figura 10: Configuração de robô para movimentação Pitch-Pitch/Yaw-Yaw

A fim de garantir a intercambiabilidade entre os módulos com menor possibilidade de interferência entre eles durante a execução das curvas determinadas definiu-se um perfil transversal cilíndrico e ao menos suas superfícies planas, capazes não apenas de trazer uma maior estabilidade ao robô durante seu deslocamento como adição de superfícies que simulem

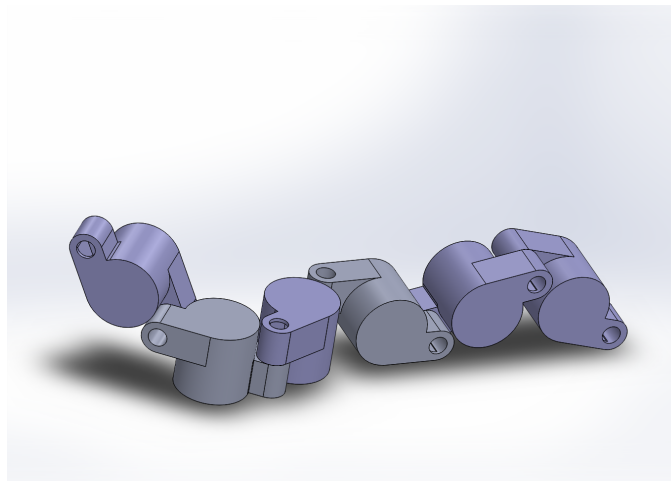


Figura 11: **Configuração de robô para movimentação Pitch-Yaw**

as escamas de cobra garantindo a existência de anisotropia, como indicado na Fig. 12. Além disso a seção transversal mais simples permite um acesso mais rápido aos componentes internos para manutenção.

O design dos modelos VDM também foi tido como ideal para manufatura, pela considerável simplicidade de sua geometria externa e interna. Por fim, o fato da estrutura de escamas ser pensada como removível simplifica sua troca, reparo e permite testes de diferentes configurações de forma mais fácil.

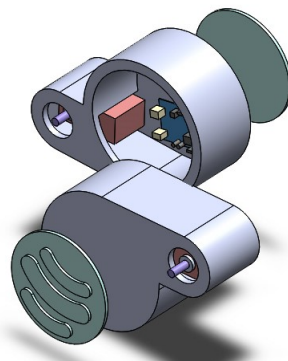


Figura 12: **Módulo VDM Y com vista explodida parcial**

Sua manufatura seria idealmente feita com prototipagem rápida, um recurso cuja acessibilidade foi pesada antes da decisão e concluído como viável. Quanto ao corpo dos modelos VDM, decidiu-se por fazer modelos em prototipagem rápida com especificações de densidade diferentes das escamas ou com usinagem em madeira, sendo o segundo mais atraente para os protótipos iniciais por ser mais rápido de fazer. A justificativa para o uso de dois materiais com propriedades mecânicas diferentes vem das conclusões obtidas por Filippov and Gorb (2013) quanto à melhor forma de reproduzir anisotropia artificialmente. Ambos os materiais (madeira e polímeros de prototipagem) possuem um maquinário acessível e permitem finalização fina manual, garantindo mais liberdade de ajuste em sua manufatura além de custo financeiro mais baixo e menor consumo de tempo para montagem.

5. CONCLUSÃO

Um design adequado é o que permite a tradução entre um projeto teórico e uma aplicação prática em robótica, ainda que esta etapa por vezes não recebe a devida atenção em face de outros desafios, principalmente em robótica modular, como sistemas de controle e modelos de movimentação. Entretanto, ao fim da elaboração deste trabalho pode-se perceber que o processo do design tanto pode ajudar a validação de teorias como as refinar, ajudando a perceber fatores que influenciam o funcionamento do robô mas às vezes passam despercebidos na análise isolada de outras frentes de projeto. A elaboração dos modelos VDM foi satisfatória para com a missão proposta, estando os mesmos num ponto considerado ideal entre a teoria estudada, os parâmetros de funcionamento e as condições de fabricação disponíveis no ambiente acadêmico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília pelo apoio institucional.

7. REFERÊNCIAS

- Bona, B. and Indri, M., 2005. "Friction compensation in robotics: An overview". *Proc. 44th IEEE Conf. Decis. Control. Eur. Control Conf. CDC-ECC '05*, Vol. 2005, No. February 2016, pp. 4360–4367. doi:10.1109/CDC.2005.1582848.
- Dowling, K.J. and Whittaker, W.L., 1997. "Limbless Locomotion: Learning to Crawl with a Snake Robot".
- Filippov, A. and Gorb, S.N., 2013. "Frictional-anisotropy-based systems in biology: structural diversity and numerical model". *Scientific reports*, Vol. 3, p. 1240.
- Fukuda, T., Nakagawa, S., Kawauchi, Y. and Buss, M., 1988. "Self Organizing Robots Based on Cell Structures-CEBOT". *IEEE Int. Work. Intell. Robot.* 1988, pp. 145–150. doi:10.1109/ROBOT.1990.126059. URL http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=592421.
- Grabec, I., 2002. "Control of a creeping snake-like robot". In *Advanced Motion Control, 2002. 7th International Workshop on*. IEEE, pp. 526–531.
- Guimarães, P.P., Nunes, M.M., Galembeck, T.F., Kalejaiye, L.B.T., Tenório, R.P., Viana, D.M., Vidal, F.D.B. and Koike, C.M.E.C., 2016. "A bio-inspired apodal and modular robot". In *Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR), 2016 XIII Latin American*. IEEE, pp. 61–66.
- Hirose, S., Cave, P. and Goulden, C., 1993. *Biologically inspired robots: serpentine locomotors and manipulators*. Oxford University Press.
- Huang, P. and Yang, Q., 2014. "Theory and contents of frictional mechanics". *Friction*, Vol. 2, No. 1, pp. 27–39. ISSN 22237704. doi:10.1007/s40544-013-0034-y.
- Jayme, R.F., 2016. "Influência Do Atrito Na Locomoção de Robôs Apodais".
- Kurokawa, H., Kamimura, A., Yoshida, E., Tomita, K., Murata, S. and Kokaji, S., 2002. "Self-reconfigurable modular robot (m-tran) and its motion design". In *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002*. Vol. 1, pp. 51–56 vol.1. doi:10.1109/ICARCV.2002.1234789.
- Liljebäck, P., 2011. *Modelling, Development and Control of Snake Robots*. Ph.D. thesis.
- Ma, S., 1999. "Analysis of Snake Movement Forms for Realization of Snake Like Robots".
- Serrano, M.M., Chang, A.H., Zhang, G. and Vela, P.A., 2015. "Incorporating frictional anisotropy in the design of a robotic snake through the exploitation of scales". In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 3729–3734.
- Souza, N.C.A., de Oliveira, L., Franco, D., Felippes, R., Souza, M., Viana, D., Brito, B. and Koike, C., 2011. "Erekobot alfa project: Design and construction of a modular robot prototype". In *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Vol. 1.
- Toyoshima, S., Tanaka, M. and Matsuno, F., 2014. "A study on sinus-lifting motion of a snake robot with sequential optimization of a hybrid system". *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* ISSN 15455955. doi:10.1109/TASE.2013.2273356.
- Transth, A.A., Leine, R.I., Glocker, C., Pettersen, K.Y. and Liljebäck, P., 2008. "Snake robot obstacle-aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments". *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 88–104.
- Yamada, H., Takaoka, S. and Hirose, S., 2013. "A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism)". *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 1, pp. 47–60.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THE RELEVANCE OF THE DESIGN IN A MODULAR ROBOTICS PROJECT

Thaís França Galembeck, tfrancag@gmail.com¹
Dianne Magalhães Vianna, diannemv@unb.br¹
Rute Borges dos Santos, rute.borges@live.com¹
Carla Maria Chagas Koike, ckoike.unb.br²

¹Departamento de engenharia mecânica, Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900

²Departamento de ciência da computação, Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900

Resumo: The validation of a project in robotics can be achieved by computational simulation or experimental tests, and in both cases there is a need to define a model, be it computational or physical, of the robot to be developed in such a way that both geometry and mechanical characteristics are able to perform the tasks specified in project. In this work, it's discussed the creative process of a physic model and the project of a prototype of a modular robot suitable to the desired movement gaits and to the limitations on the manufacturing process in order to minimize the error spread during the validations of the said project.

Palavras-chave: design, modular robot, snake gait