

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MODULAR

Nathan Costa Alves Souza, nathansouza110@gmail.com¹
Rafael da Costa Dutra, costa_rafas@hotmail.com¹
Lucas Soares de Brito, lucas.soaresbrito@hotmail.com²
Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, ckoike@unb.br³
Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, FT, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900.

² Departamento de Engenharia Elétrica, FT, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900.

³ Departamento de Ciência da Computação, ICC, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900.

Resumo: *Robôs modulares reconfiguráveis são máquinas constituídas de módulos autônomos capazes de se conectarem e assumirem novas formas e funções por meio de rearranjos dos seus módulos. Características de versatilidade, robustez e baixo custo abrem possibilidades para que estas máquinas possam adaptar-se a novas circunstâncias, recuperar-se de danos e realizar novas e complexas tarefas. No presente trabalho são mostrados os aspectos de desenvolvimento e construção do protótipo de um robô constituído de quatro módulos idênticos. O módulo de dimensões 70 mm x 70 mm x 70mm foi construído em alumínio e é formado de uma parte semicilíndrica e uma placa plana conectada por uma articulação. Cada parte possui quatro superfícies para conexão. O módulo possui um grau de liberdade, no entanto, um grupo de módulos pode gerar estruturas mais complexas capazes de realizar vários tipos de movimento para se locomover. No presente estágio de desenvolvimento é possível realizar a locomoção apodal inspirada no movimento dos ofídios. Neste protótipo os módulos são controlados por um circuito externo com fonte de alimentação também externa. Algoritmos de geração de movimento foram elaborados para configurar e executar o movimento coordenado dos quatro módulos. De modo a validar a etapa atual são realizados testes de reconfiguração e de comunicação com os módulos.*

Palavras-chaves: *robótica modular, robôs reconfiguráveis, locomoção apodal.*

1. INTRODUÇÃO

Um robô modular pode ser definido como um sistema robótico constituído por componentes básicos e independentes que se conectam (manual ou automaticamente) de maneira a compor sistemas robóticos com formas e funcionalidades diferentes. Robôs modulares são particularmente úteis na execução de tarefas difíceis para um robô com configuração fixa.

O componente básico e independente é denominado módulo e é constituído de carenagem, atuadores, mecanismos especializados como ganchos, imãs, rodas, câmeras, carga paga e módulos energéticos ou processadores. Cada módulo possui interfaces de conexão que permitem transmitir forças mecânicas, momentos, dados e energia elétrica para outros módulos através do sistema robótico.

Características como versatilidade, robustez e baixo custo abrem possibilidades para que estas máquinas possam adaptar-se a novas circunstâncias, recuperar-se de danos, autoconfigurar-se e realizar novas e complexas tarefas. As possibilidades do uso prático dos robôs modulares ainda estão sendo exploradas: as aplicações avaliadas na literatura são relativas a operações de busca e salvamento, inspeção de tubulações e de pontes e exploração espacial.

No presente trabalho são mostrados os principais aspectos de desenvolvimento e construção do protótipo de um robô modular constituído de quatro módulos. Os módulos foram construídos em alumínio, possuem dimensões 70 mm x 70 mm x 70 mm e são formados de uma parte semicilíndrica e uma placa plana conectada por uma articulação. Cada módulo possui apenas um grau de liberdade, no entanto, um grupo de módulos pode gerar sistemas capazes de realizar vários tipos de movimento.

Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica sobre robótica modular, incluindo as principais arquiteturas e projetos existentes. Em seguida é realizada uma abordagem sobre a cinemática da topologia 1D com base na formulação da curva “serpentóide” proposta por Hirose. Definido o modelo utilizado, são apresentados de forma mais detalhada os aspectos de projeto e construção do protótipo ErekBot β-5. Por fim são realizadas considerações sobre os resultados obtidos.

2. ROBÓTICA MODULAR

Esse campo especial da robótica moderna apresenta vários desafios interessantes em seus aspectos mecânicos - acionamento de motores, conexão entre módulos, novos materiais -, de comunicação e processamento de informações. Tecnologias recentemente aplicadas à robótica, como atuadores inteligentes, encaixes magnéticos e controle distribuído são frequentemente associadas aos projetos em robótica modular.

A pesquisa sobre robôs modulares teve como um dos marcos o trabalho desenvolvido por Mark Yim que propôs em sua tese de doutorado uma nova abordagem para o problema de locomoção de robôs (Yim, 1995, apud Gomez, 2008). As soluções para locomoção de robôs até então se focavam em projetar um robô específico para movimentação em um determinado tipo de terreno. Yim propôs usar robôs com base em módulos que poderiam alterar a sua forma adotando diferentes configurações de acordo com o terreno onde eles estavam operando em um determinado momento.

Um robô modular poderia, por exemplo, assumir a forma de uma cobra, com seus módulos conectados de modo longilíneo e se locomover através de um tubo. Ao sair do tubo, ele mudaria novamente sua forma para quadrúpede ou mesmo hexápode e atravessaria um terreno rochoso com superfícies irregulares. Ao chegar a um terreno plano e uniforme, ele poderia mudar para outra forma que possibilitasse uma rápida locomoção (como um círculo) e, então, poderia se tornar um objeto estático de alguma funcionalidade.

A forma do sistema modular depende de quantos módulos são necessários, dos seus tipos e de como esses módulos se conectam: isso define o tamanho do sistema e o número de graus de liberdade que este possui. Pode haver vários tipos diferentes de módulos, que consistem em elementos básicos como eletrônica, sensores, processadores, memória e fonte elétrica. Um módulo pode ter atuadores para locomoção ou conexão com outros módulos.

2.1. Vantagens da Utilização de Sistemas Modulares Robóticos

O uso de sistemas robóticos modulares em vez de sistemas robóticos de configuração fixa baseia-se em três principais motivações (Yim et al., 2001):

- **Baixo custo**, já que sistemas modulares podem apresentar um ganho econômico na avaliação do projeto. Eles diminuem os custos de fabricação e manutenção por serem máquinas complexas feitas de um ou poucos tipos de unidades produzidos em massa;

- **Versatilidade**, pois sistemas modulares reconfiguráveis possuem maior número de funções potenciais do que a robótica convencional pode oferecer. A variação de morfologia do robô permite novas funcionalidades, que são avaliadas como melhores ou mais eficientes para completar uma determinada tarefa, ou mesmo adaptar-se a situações ou ambientes não controlados;

- **Robustez aumentada**, devido ao fato do robô ser feito de módulos idênticos e à possibilidade da substituição de módulos defeituosos ser realizada automaticamente, pelo próprio robô ou por outras máquinas. Isso torna o robô modular menos dependente da intervenção humana.

Mesmo que os aspectos acima sejam motivadores do uso da robótica modular reconfigurável é preciso verificar se a escolha de um sistema modular ou de um sistema robótico convencional estabelece um compromisso em relação ao desempenho esperado do sistema na execução das tarefas: um robô projetado para uma tarefa específica terá sempre um melhor desempenho que um sistema modular na execução dessa tarefa específica. Também os ganhos em versatilidade e robustez são uma questão de compromisso, pois as complexidades mecânicas e computacionais aumentam expressivamente com a modularidade e a configurabilidade.

Um sistema modular seria, portanto, melhor indicado para missões no qual o robô precisa adaptar-se morfologicamente a um ambiente suscetível a mudanças não previstas, com múltiplas funcionalidades para completar diferentes tarefas e independente de intervenção humana.

2.2. Propriedades Gerais de um Robô Modular

Vários grupos de pesquisa trabalham com robótica modular, em razão das vantagens já mencionadas. No entanto, as soluções em desenvolvimento ainda estão restritas ao meio acadêmico e são constituídas de poucos módulos, com exceção do Projeto PolyBot G3, um sistema constituído de 56 módulos (Garcia, 2008).

Os projetos de pesquisa atuais nesta área concentram grande parte do trabalho em soluções testadas em ambiente de simulação, onde as complexidades eletromecânicas de montagem dos módulos são evitadas.

Entre os projetos que constroem fisicamente os módulos, os primeiros projetos consistem em módulos idênticos cuja conexão com outro módulo ocorre somente com intervenção externa. Este sistema de encaixe manual impede a caracterização desses robôs como reconfiguráveis. À medida que os projetos vão ficando mais sofisticados, os módulos ganham componentes como sensores, sistema de encaixe automático, comunicação sem fio, entre outras características.

Robôs modulares são classificados de acordo com os tipos de módulos, com o arranjo geométrico de seus módulos, com o tipo de conexão e com o processo de controle da sua morfologia. Abaixo, segue uma descrição dos principais critérios de classificação de robôs modulares, segundo Yim et al (2007).

Dependendo do arranjo geométrico de seus módulos, os robôs modulares podem seguir as arquiteturas *lattice* ou *chain*, ou serem híbridas desses dois arranjos.

- **Arquitetura *lattice***: É caracterizada por sistemas que apresentam módulos arranjados regularmente em uma matriz tridimensional. O controle da morfologia e a locomoção do robô podem ser executados em sequência ou

paralelamente. Essa configuração possui a vantagem de possibilitar uma reconfiguração mais simples, já que os módulos se deslocam somente para posições vizinhas e esse tipo de deslocamento pode ser feito sem a necessidade de malha de controle fechado. A complexidade computacional de sistemas do tipo *lattice* é melhor no caso de sistemas complexos.

- **Arquitetura *chain*:** É caracterizada por sistemas cujas unidades são conectadas em série, como uma corda ou corrente. A estrutura pode eventualmente se dobrar para diminuir a ocupação de espaço, mas os módulos continuam conectados em série. Através de articulações dos módulos, um robô de arquitetura *chain* poderá atingir qualquer ponto no espaço, sendo limitado somente pelo tamanho do módulo. Isso o torna mais versátil e de construção mais fácil, porém aumenta as complexidades de análise e cálculo computacional, sendo uma estrutura mais difícil de controlar.

Os sistemas robóticos modulares também podem ser classificados de acordo com a maneira pela qual os módulos se movimentam para alterar a morfologia do robô:

- **Reconfiguração determinística:** Característica de sistemas nos quais os módulos são manipulados durante a reconfiguração para uma posição alvo no sistema. A posição exata onde o módulo deve se posicionar é conhecida, mesmo se a trajetória para que o módulo alcance essa posição possa ser alterada. Para esse tipo de reconfiguração, é essencial o controle em malha fechada, especialmente em sistemas de arquitetura *chain*, devido à vasta gama de posições alcançáveis no espaço da reconfiguração.

- **Reconfiguração estocástica:** Característica de sistemas nos quais os módulos se locomovem de maneira aleatória. A localização exata do módulo só é conhecida quando o módulo é conectado a estrutura principal da nova morfologia e as trajetórias dos módulos são aleatórias durante o processo de reconfiguração. O tempo de reconfiguração só pode ser determinado estatisticamente. Esse tipo de reconfiguração favorece sistemas de menor escala. Outra característica consiste no ambiente normalmente fornecer a energia necessária para transportar os módulos pelo sistema.

Outra classificação útil é com relação aos tipos de módulos envolvidos no projeto:

- **Tipo homogêneo:** os módulos são idênticos no que se refere à geometria, eletrônica, comunicação e funcionalidade.

- **Tipo heterogêneo:** quando existem módulos que podem ser caracterizados como módulos específicos e possuem uma funcionalidade que poderá beneficiar o sistema completo durante a execução de uma tarefa. Como exemplos podem ser citados robôs onde alguns módulos possuem câmera embutida, enquanto outros possuem um sistema central de processamento. Outros módulos podem possuir *link* de comunicação especial, podem também conter rodas ou, ainda, hélices.

2.3. Projetos Existentes

Atualmente existem alguns projetos de sistemas modulares construídos por intuições e universidades no mundo que exploraram as funcionalidades e a dinâmica dos vários tipos de robôs modulares descritos acima. A maioria tem explorado a arquitetura *chain*, principalmente por ser mais fácil de construir, porém, observam-se também significativos avanços em projetos com base na arquitetura *lattice*, bem como alguns projetos que propõe arquiteturas classificadas como híbridas.

Entre os projetos existentes, quatro são apresentados a seguir, cujas características de projeto e desenvolvimento influenciaram o estudo e o desenvolvimento do projeto Erekebot.

2.3.1. M-TRAN

O M-TRAN - *Modular Transformer* (Kurokawa et al, 2008) é um sistema robótico projetado e construído pelo *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology of Japan* (AIST) e pelo *Tokyo Institute of Technology* (TIT). O MTRAN é considerado um dos projetos mais bem sucedidos na característica de reconfiguração automática feita por ligamentos e desligamentos sucessivos dos módulos. Atualmente, o projeto MTRAN está com a 3ª versão do seu módulo, após passar por modificações na estrutura do módulo, na mecânica de encaixe e na eletrônica.

Os módulos do MTRAN III são compostos de duas partes semicilíndricas, uma passiva e uma ativa (classificação de acordo com o mecanismo de conexão) e uma conexão entre essas partes, conforme a Fig. (1). A dimensão dos módulos é de 65 mm X 65 mm X 130 mm e seu peso é 420 g. Cada módulo é encapsulado em Polyacetel, e possui 5 motores: dois para a locomoção e três para as conexões.

Dois motores DC controlam a rotação, portanto, a locomoção do módulo. Potenciômetros são utilizados para realizar a medida angular: um processador é dedicado a controlar dos dois ângulos.

A parte passiva ainda possui um sensor de aceleração para informar a orientação dos módulos, especialmente durante a inicialização e 10 pares de sensores infravermelhos que funcionam como sensores de proximidade em cada face.

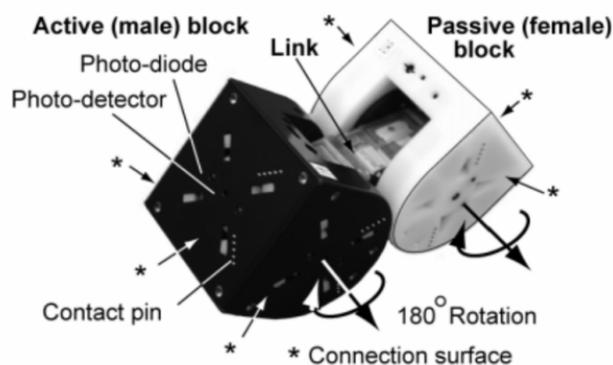


Figura 1. Esquema de um módulo MTRAN III. Fotos da AIST publicadas com autorização.

Cada módulo possui um microprocessador mestre de 32 bits na parte passiva e três processadores de 16 bits, dois na parte ativa e um na parte passiva. Uma bateria recarregável de 730 mAh e 7,4 V é embarcada no módulo, localizado na parte passiva. Os processadores se comunicam via linha serial, sendo o processador mestre responsável por coordenar as tarefas de controle dos motores e dos sensores dos outros três processadores. Os módulos se comunicam entre si de várias maneiras: utilizando barramento *CAN bus*, para comunicação entre os processadores mestres dos módulos; por conexão sem fio *bluetooth* em cada módulo, para comunicação entre módulos ou entre módulo e um servidor externo; também os sensores infravermelhos são utilizados para comunicação com o módulo adjacente.

A inovação substancial do MTRAN III em relação aos modelos anteriores consiste no sistema de encaixe mecânico – o anterior era magnético. A parte ativa possui atualmente um mecanismo formado por engrenagens e um motor DC controlado por um processador. Deste modo, o encaixe mecânico é rápido e robusto e não causa interferência magnética na transmissão de dados.

Na Tab. 1 é apresentado um resumo das principais características do MTRAN III.

Tabela 1. Características do sistema modular MTRAN III

Especificações	MTRAN III
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Auto
Faces de Conexão	6
Graus de Liberdade (DOF)	2
Locomoção Própria do Módulo	Sim (2D)

2.3.2. SuperBot

O SuperBot é o robô modular desenvolvido pela University of Southern California (USC). Este sistema robótico foi construído para demonstrar a capacidade de reconfiguração em aplicações reais e várias morfologias foram testadas.

O módulo do SuperBot é constituído de dois cubos ligados de dimensões 84 mm X 84 mm X 84 mm e 6 faces de conexão idênticas. A mudança de configuração ainda é manual, mas existem trabalhos atuais na tentativa de torná-lo reconfigurável.

Cada metade do módulo possui um micro controlador ATmega128 de 8 bits e 16MHz. Cada face de conexão possui um conjunto de barramentos que permitem a troca de energia. A comunicação (troca de dados com o módulo vizinho) é feita por infravermelho, por uma linha serial de velocidade 230 Kbps (IrDA). Os transmissores e receptores infravermelhos também são usados como sensores de proximidade e servem de guia para o processo de conexão dos módulos.

Cada módulo possui 3 motores DC que produzem 6,38 N-m de torque: dois são atuadores lineares e o outro rotaciona a parte central. Uma bateria LiPo de 1600 mAh e 7,4V e um acelerômetro também estão embarcados em cada módulo.

O design do SuperBot inovou pelo fato de ter um grau de liberdade a mais que outros robôs modulares: isso assegura agilidade e versatilidade ao robô em uma situação de contorno de um objeto, por exemplo. De forma a superar um obstáculo, o sistema robótico pode encontrar uma solução com menos movimentos que outros robôs, que o torna energeticamente mais econômico e mais rápido (Garcia, 2008).

Na Tab. (2) é apresentado um resumo das principais características do SuperBot.

Tabela 2. Características do sistema modular SuperBot

Especificações	SuperBot
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	6
Graus de Liberdade (DOF)	3
Locomoção Própria do Módulo	Sim (2D)

2.3.3. Yamor

O robô modular YAMOR (*Yet Another Modular Robot*) foi desenvolvido pelo *Biologically Inspired Robotics Group* (BIRG) da *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL), na Suíça. Esse projeto foi construído pelos estudantes do grupo e tinha por objetivo ser um projeto simples e barato de um sistema modular.

O módulo YAMOR possui a forma de um paralelepípedo com extremidade semicilíndrica, Fig. (2), com o projeto inspirado no MTRAN II. Suas dimensões são 90mm X 50mm X 45mm.



Figura 2. Módulo YAMOR. Fotos da EPFL Biorobotics Lab publicadas com autorização.

Seu sistema elétrico é constituído de duas baterias de lítio recarregáveis de 3,7 V com 700 mAh de corrente, um microcontrolador FPGA, comunicação sem fio via *Bluetooth* e um servomotor de 73 N-cm de torque como atuador.

O robô YAMOR não possui mecanismo específico de encaixe. Faixas de velcro são usados para a conexão manual, tendo uma faixa em cada face do robô. Segundo Dittrich e Ijspeert (2004), o velcro revelou-se uma boa solução para encaixe de módulos com baixo peso e baixos esforços.

Este projeto possui como característica principal a sua simplicidade e traz grandes avanços no controle de robótica modular. O grupo BIRG conseguiu desenvolver um software de controle simultâneo chamado *Bluemove*, que possibilita ao usuário controlar o movimento característico de cada módulo do sistema instantaneamente. Isto facilita a análise da dinâmica de todos os módulos em uma determinada configuração (Moeckel, 2005).

Na Tab. (3) é apresentado um resumo das principais características do Yamor.

Tabela 3. Características do sistema modular YAMOR

Especificações	YAMOR
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	4
Graus de Liberdade (DOF)	1-2
Locomoção Própria do Módulo	Sim

2.3.4. PolyBot

O projeto PolyBot é um sistema modular desenvolvido pelo *Palo Alto Research Center* (PARC). De acordo com Garcia (2008), o projeto se caracteriza pela versatilidade demonstrada em suas configurações, sendo o sistema com o maior número de módulos ativos (total 56 módulos). Ensaio realizados com o PolyBot demonstraram as diversas possibilidades de controle de espaço e locomoção do sistema robótico de arquitetura *chain*.

O sistema PolyBot G3 (terceira geração) possui dois tipos de componentes, o módulo e o bloco de encaixe. O módulo é composto de dois cubos com cortes semicilíndricos encaixados de dimensões 50 mm X 50 mm X 50 mm. Os blocos são rígidos e possuem 6 faces que possibilitam conexão com módulos em série ou com defasagem de 90 graus.

Cada módulo e bloco do PolyBot possui um chip Motorola PowerPC 555 de 32 bits e 40 MHz, com 1Mb de memória RAM. Energia e dados são transmitidos através das faces de conexão. O sistema de comunicação é feita por um barramento CAN. Cada módulo possui um motor DC como atuador, sensores de posicionamento e rotação e 2 acelerômetros para orientação.

Na Tab. (4) é apresentado um resumo das principais características do PolyBot.

Tabela 4. Características do sistema modular PolyBot G3

Especificações	PolyBot G3
Tipo	Heterogêneo
Arquitetura	Chain
Reconfiguração	Determinística
Reconfiguravel	Sim / Manual
Faces de Conexão	2
Graus de Liberdade (DOF)	1
Locomoção Própria do Modulo	Não

Na pesquisa de robôs modulares reconfiguráveis, o início dos estudos pelas topologias unidimensionais da arquitetura *chain* é uma estratégia atraente pelo baixo custo e maior simplicidade em função do menor número de módulos necessário para realizar e controlar os deslocamentos em linha reta. Robôs modulares reconfiguráveis ao assumirem uma configuração apodal podem dobrar-se e adaptar-se à forma do terreno como uma cobra.

3. CINEMÁTICA DA TOPOLOGIA UNIDIMENSIONAL

Assim como ocorre no reino animal, onde a locomoção dos indivíduos é adaptada ao seu meio ambiente, ao projetar-se um robô móvel deve-se conhecer o terreno em que este vai se mover. O ambiente definirá a marcha e, por conseguinte, a configuração e a topologia a ser implementada. Deste modo, se o robô irá se mover em superfícies planas e lisas onde não há necessidade de ultrapassar os obstáculos, o uso de rodas pode ser o mais adequado. Gomez (2008) afirma que “Um dos maiores desafios no desenvolvimento de um robô é torná-lo capaz de se mover em todos os tipos de terreno”.

Os seres vivos são adaptados para superar obstáculos seja por meio de pés ou, de movimentos corporais, na ausência de pés. Os robôs que se utilizam destes últimos para se locomoverem são denominados robôs apodais e os seus movimentos se assemelham aos dos ofídios.

Embora a pesquisa sobre robôs modulares tenha se iniciado na década de 90, o estudo da biomecânica das cobras para aplicação em robôs data da década de setenta com os trabalhos pioneiros de Hirose (Hirose, 1974, apud Gomez, 2008). Uma importante contribuição de seus estudos consistiu na formulação da curva “serpentóide” que representa a forma adotada pelos ofídios para se locomoverem, Fig. (3a).

O ângulo de curvatura θ da curva serpentóide (s), Fig. (3b), varia na direção seno a partir de zero no ponto O até um máximo em P segundo a equação:

$$\theta(s) = A \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{s}{l} \right) \right] \quad (1)$$

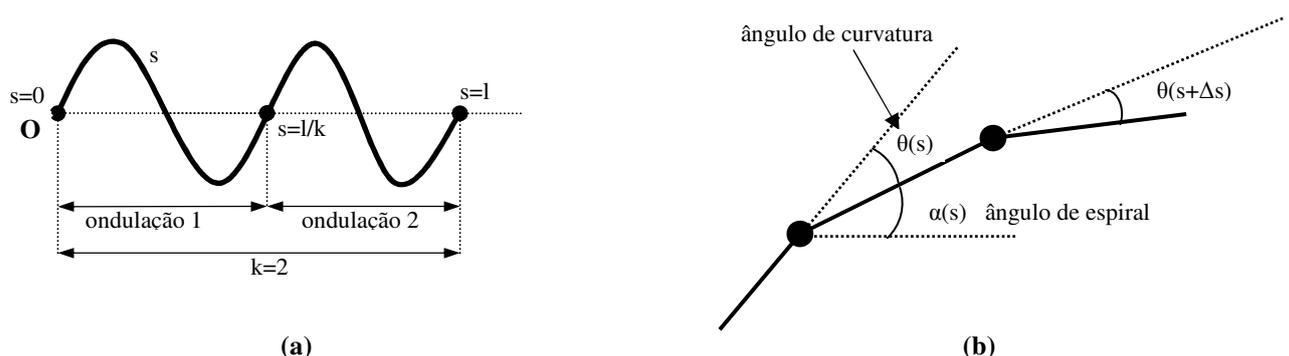


Figura 3. Curva “serpentóide”: a) esquema representativo; b) ângulo de curvatura (Hirose, 1993 apud Dalilsafaei, 2007).

As relações para a função que define a variação da curvatura e para as coordenadas dos pontos da curva no sistema de coordenadas cartesianas são (Gomez, 2008):

$$\theta(s) = \frac{\pi}{2} \alpha \frac{\delta s}{l} \sin\left(\frac{\pi s}{2l}\right) \quad (2)$$

$$x(s) = \int_0^s \cos(\alpha_s) ds = \int_0^s \cos\left(\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{l}s\right)\right) ds \quad (3)$$

$$y(s) = \int_0^s \sin(\alpha_s) ds = \int_0^s \sin\left(\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{l}s\right)\right) ds \quad (4)$$

As expressões definidas por Hirose podem ser utilizadas em um modelo simplificado em que cada módulo é representado por um elemento formado de duas barras e uma articulação, Fig. (4). Um sistema em linha constituído por vários destes elementos seria capaz de representar o movimento na forma de uma curva serpenteada. As relações de ângulo e posição definidas nas equações acima são aplicadas nas articulações. O modelo é válido considerando o regime permanente de uma locomoção sem obstáculos a vencer.

Com base nos estudos realizados por Hirose, Gomez (2008) propõe em seu trabalho o uso de geradores senoidais (osciladores de frequência fixa) que controlam diretamente a posição das articulações. Esta simplificação possibilita o estudo da locomoção em regime permanente.

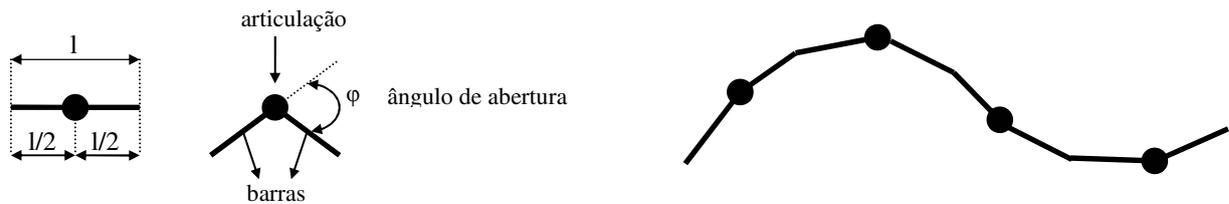


Figura 4. Modelo de barras.

O ângulo de abertura φ é o ângulo definido a partir da posição em que as barras estão alinhadas. É determinado pelas articulações. O valor desse ângulo varia no intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$, o que é comumente encontrado nos servomotores comerciais. A variação total é de 180° ; l é o comprimento total do módulo, em $\varphi = 0$.

Assume-se que a massa do módulo é igualmente distribuída nos dois segmentos e a articulação não possui massa, para fins de cálculo.

4. EREKOBOT β -5

O Erekobot β -5 é o primeiro protótipo funcional do grupo Erekobot, construído com base na análise dos resultados de um modelo preliminar, o Erekobot α -5. Os protótipos foram projetados para serem usados como instrumentos de estudo de aspectos importantes de sistemas modulares como: montagem das diferentes configurações; algoritmos de movimento em diferentes configurações; reconfiguração automática, entre outros.

O Erekobot β -5 possui um desenho bastante similar ao MTRAN, YAMOR e PolyBot. O objetivo era criar um robô modular híbrido, com 4 faces de conexão idênticas com controle simples de movimento, Fig. (5).



Figura 5. Módulos Erekobot β -5 (a) conectados em série, em configuração ponte; (b) detalhe de um módulo.

4.1 Aspectos do Projeto dos Módulos

O ErekoBot β -5 possui a geometria de um cubo com corte semicilíndrico e uma face móvel (vide Figura 5) . Esta face é soldada ao braço que, por sua vez, é conectado ao servomotor localizado no interior da gaiola. O servomotor é posicionado de tal maneira que o centro de gravidade do sistema se alinhe com o centro geométrico. Todos os módulos foram confeccionados com chapas de alumínio de 2 mm de espessura, dobradas.

Após os ensaios e análises do primeiro modelo, denominado ErekoBot α -5, concluiu-se que os atuadores dos módulos precisariam de um torque considerável para se locomoverem. O modelo preliminar utilizava motores de passo unipolares, sem redução e mostrou-se instável, causando vibrações ao rotacionar a face móvel.

Conforme mencionado por Garcia (2008) e Ditttrich (2004), no projeto dos módulos MTRAN III e YAMOR, os servomotores são escolhidos pelo seu grande torque, com atenção à distância entre o centro de torque do motor e o centro de gravidade do módulo adjacente. No projeto ErekoBot β -5 definiu-se um modelo que atendesse a relação mais adequada com base nos critérios de torque, peso, tamanho do motor e custo e, ainda, optou-se por um modelo com redução de metal, por questões de resistência. Desta forma foi escolhido o modelo Hxt 12K Metal Gear, de 55 gramas de peso, com capacidade de torque de 10-12 kg-cm. Este motor possibilitou o uso de um módulo com peso médio de 160 gramas, em uma estrutura com dimensões 70mm X 70mm X 70 mm, com a capacidade de torque suficiente para levantar 2 outros módulos adjacentes.

Na fase atual de desenvolvimento do módulo ErekoBot β -5 a fixação entre módulos é realizada por meio de uniões aparafusadas.

Na Tab. (5) é apresentado um resumo das principais características do ErekoBot β -5.

Tabela 5. Características do sistema modular ErekoBot β -5

Especificações	ErekoBot β -5
Tipo	Homogêneo
Arquitetura	Híbrido
Reconfiguração	Determinística
Reconfigurável	Sim / Manual
Faces de Conexão	4
Graus de Liberdade (DOF)	1
Locomoção Própria do Módulo	Sim (1D)

4.2 Eletrônica

O ErekoBot β -5 não possui alimentação elétrica embarcada, mas sim externa. O circuito eletrônico é constituído de uma fonte de tensão DC de 12V com capacidade de 1 A para alimentação do microcontrolador BS1, assim como uma fonte de tensão DC de 6V com capacidade de corrente de 3,5 A para a alimentação dos 4 servomotores Hxt 12K Metal Gear, que necessitam de alimentação de 4V a 6V de tensão e consumem em média 700 mA, cada qual.

Nesta primeira etapa, nem o microcontrolador nem a fonte de alimentação são embarcadas nos módulos. Os circuitos de alimentação e controle foram montados numa placa de protótipo externa ao módulo, com um só microcontrolador conectado a todos os servos dos módulos. O microcontrolador também é conectado pela porta serial (RS232) com o computador host. Neste foram realizadas as etapas de elaboração e compilação dos programas, assim como a comunicação serial e posterior gravação no microcontrolador.

4.3 Programação

O controle dos servomotores embarcados nos módulos é realizado por um microcontrolador BasicStep BS1, o qual foi programado com linguagem TBASIC. O sistema fornecido pelo fabricante já disponibiliza várias funções, com destaque a função Pulsout, que faz o microcontrolador emitir um pulso digital com duração pré-definida e é muito útil para controle dos servomotores. O microcontrolador foi programado por meio de um computador host conectado por via serial.

Os parâmetros utilizados no programa de controle executado no microcontrolador consistem na sequência de ângulos a serem aplicados na articulação da face móvel pelos servomotores de forma a caracterizar o movimento do sistema de acordo com as equações cinemáticas de posição e ângulo. O algoritmo do microcontrolador foi executado em um laço infinito com pausa de 500 ms entre as posições novas calculadas.

4.4 Ensaios

O sistema modular ErekoBot β -5 foi fixado manualmente em série e conectado ao microcontrolador para a realização dos ensaios de locomoção tipo “ondulação lateral” e de mudança de configuração de linha reta para “ponte”.

A locomoção tipo “ondulação lateral” (ou *pitch-pitch* segundo Gomez, 2008) mostrada na Fig. (6), a princípio apresentou problemas por não formar uma onda estável. Conforme previsto na tese de Gomez (2008), uma onda estável só é possível de se obter com pelo menos cinco módulos, caso fossem utilizados intervalos e variações de posições iguais em cada módulo. Assim, o algoritmo foi alterado para que a articulação do módulo 1 (conforme numeração mostrada na Fig. 5) rotacionasse mais lentamente e as articulações dos módulos 2, 3 e 4 rotacionassem simultaneamente. O resultado foi uma progressão de 50 mm para frente em 30 segundos de duração do movimento.

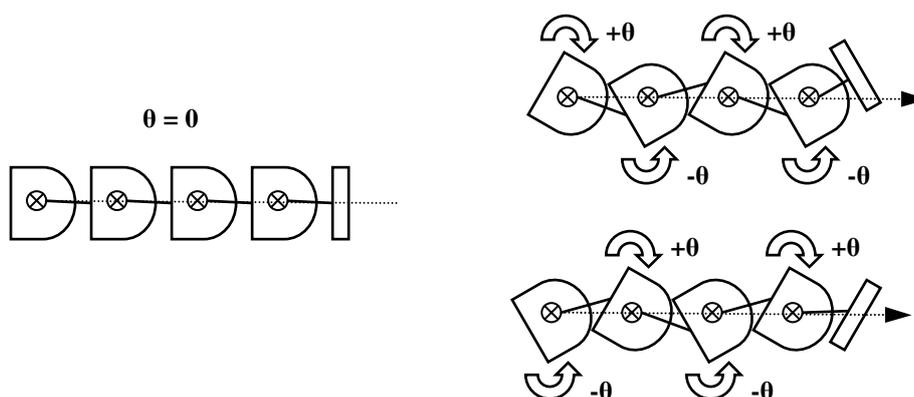


Figura 6. Esquema do movimento de ondulação lateral.

A série de módulos também foi testada quanto à estabilidade estática e força (peso próprio). O sistema foi colocado em configuração “ponte”, como ilustra a Fig. (5) e a Fig. (7). Os servomotores dos módulos extremos (módulos E-1 e E-4) apresentaram vibrações por se aproximarem dos seus limites de torque, porém a estrutura se manteve rígida e imóvel durante todo o ensaio.

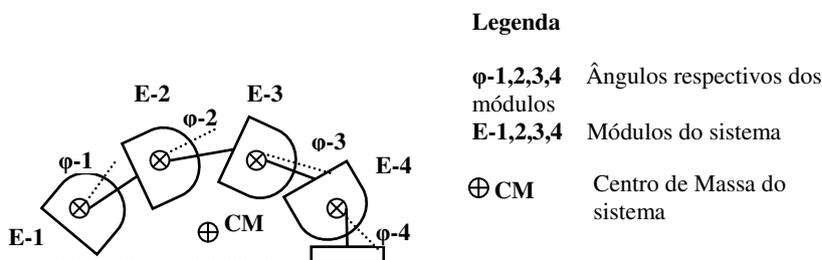


Figura 7. Esquema da configuração “ponte”.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema ErekoBot $\beta-5$ é ainda um robô modular bem rústico, não apresentando circuito embarcado, sensores e um sistema de comunicação. Outros módulos devem ser anexados ao sistema de forma a obter um movimento estável e concorrente com as equações cinemáticas da ondulação lateral em regime permanente. Os algoritmos de locomoção testados ainda necessitam de trabalho para considerar efeitos de atrito da superfície de contato.

É importante observar que o sistema desenvolvido por estudantes de graduação de engenharia mecânica e poucos recursos já pode ser considerado uma plataforma para pesquisas sobre locomoção apodal, atuadores de conexão e inteligência eletrônica. Com base neste projeto encontram-se em andamento pesquisas relacionadas à redução de peso do módulo (utilizando alternativas de material como polímeros ou compósitos), redução do tamanho do módulo, embarque do circuito básico de operação, introdução de um sistema de comunicação local e global e, ainda, o projeto de um sistema de encaixe mecânico-magnético entre os módulos.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Decanato de Extensão da Universidade de Brasília e aos técnicos dos laboratórios do SG 9 e SG 11 pelo recurso financeiro e apoio técnico recebidos.

7. REFERÊNCIAS

- Dalilsafaei, S., 2007, Dynamic Analyze of Snake Robot, World Academy of Science, Engineering and Technology, 29.
- Dittrich, E., Ijspeert, A., 2004, "Modular Robot Unit – Characterisation, Design and Realisation". Available online: <http://birg.epfl.ch/page53469.html>. Acessado dia 11/03/2010.
- Duff, D. G. ; Yim, M. H. ; Roufas, K. D. Evolution of PolyBot: A modular reconfigurable robot. Harmonic Drive International Symposium 2001; November 20-21; Nagano, Japan and COE/Super-Mechano-Systems Workshop; 2001 November; Tokyo, Japan.
- Garcia, R., Stoy, K., 2008, "The Odin Modular Robot: Electronics and Communication", The Maersk Mc-Kinney Moller Institute, University of Southern Denmark, Odense, Denmark. Available online: at: <http://www.mip.sdu.dk/~rimen05/Files/GarciaMasterScienceThesis.pdf>. Acessado dia 20/03/2010.
- Gómez, J., 2008, Modular Robotics and Locomotion: Application to Limbless Robots. Universidad Autonoma de Madrid.
- Hirose, S., 1993. Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator). Science Press, Oxford University.
- Kamimura, A., Yoshida, E., Murata, S., Kurokawa, H., Tomita, K. and Kokaji, S., 2007, "Self-reconfigurable modular robot M-TRAN: distributed control and communication", Proceedings of the 1st international conference on Robot communication and coordination, Article No: 21, ACM International Conference Proceeding Series; Vol. 318.
- Kurokawa, H., Tomita, Y., Kamimura, A., Kokaji, S., Hasuo, T. and Murata, S., 2008, Distributed Self-Reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System", The International Journal of Robotics Research.
- Mândru, D., Lungu, I. and Tâtar, O., 2007, "Connection Mechanisms for Modular Self-Reconfigurable Robots", The 1st International Conference ADEMS'07 – Advanced Engineering in Mechanical Systems.
- Moeckel, R., Jaquier, C., Drapel, K., Dittrich, E., Upegui, A., Ijspeert, A., 2005, "YaMoR and Bluemove – na autonomous modular robot with Bluetooth interface for exploring adaptive locomotion". Available online: <http://birg.epfl.ch/page57460-en.html>. Acessado dia 11/03/2010.
- Yim, M. H. ; Homans, S. B. ; Roufas, K. D., 2001, Climbing with snake-like robots. IFAC Workshop on Mobile Robot Technology; 2001 May 21-22; Jeju, Korea.
- Yim, M., 1995, Locomotion with a unit-modular reconfigurable robot. PhD thesis, Stanford University, December. Available on-line: <http://www-db.stanford.edu/TR/CS-TR-95-1536.html>. Acessado dia 15/03/2010.
- Yim, M., Shen, W., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E. and Chirikjian, G., 2007, "Modular Reconfigurable Robot Systems", IEEE Robotics & Automation Magazine.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MODULAR ROBOT

Nathan Costa Alves Souza, nathansouza110@gmail.com¹

Rafael da Costa Dutra, costa_rafas@hotmail.com¹

Lucas Soares de Brito, lucas.soaresbrito@hotmail.com²

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, ckoike@unb.br³

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, FT, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900.

² Departamento de Engenharia Elétrica, FT, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900.

³ Departamento de Ciência da Computação, ICC, Universidade de Brasília, Asa Norte, CEP 70910-900.

Abstract: Reconfigurable modular robots are machines composed of autonomous parts, called modules, able to connect and arrange themselves into new shapes and assume new functions. These kind of robots can adapt to new circumstances in the environment they are situated as well as learn to execute new complex tasks and recover from faults. This work presents the design and building of a modular robot prototype consisting of four identical modules. Each module was built using aluminum, shaped in a semi-cylindric form, with dimensions 70 mm X 70 mm X 70 mm. A flat board is connected to the semi-cylindric form by means of an articulated arm. Each module has one degree of freedom, and four faces are available for connection with other modules in order to compose different robotic shapes which are able to have more degrees of freedom and different types of locomotion: in the present stage of development, only snake-like movement is possible, controlled by the means of algorithms created to coordinate the movement of the four modules and implemented in a microcontroller.

Keywords: modular robotics, reconfigurable robots, apodal locomotion.