

EREKOBOT SIGMA: PROTÓTIPO DE UM ROBÔ MODULAR RECONFIGURÁVEL COM SENSORES

Ana Carolina Cardoso de Sousa, anacsousa1@gmail.com¹

Ricardo Diniz Caldas, ricardodinizcaldas@gmail.com¹

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br¹

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, ckoike@unb.br²

¹Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica. Campus Universitário Darcy Ribeiro.

²Universidade de Brasília, Departamento de Ciências da Computação. Campus Universitário Darcy Ribeiro.

Resumo: A vistoria em tubulações é essencial para um diagnóstico atualizado na indústria de petróleo e gás, e um alcance manual de tubulações remotas implica grande despesa em longo prazo. Logo, a otimização desses processos requer sistemas autônomos e versáteis. Os robôs modulares autorreconfiguráveis são máquinas autônomas que possuem morfologia variável, portanto possuem potencial para lidar com esse problema. Com a reorganização das conectividades de suas partes, esses robôs oferecem um maior grau de flexibilidade e tolerância a falhas por um custo menor. Este trabalho objetiva projetar um robô modular reconfigurável adequado à inspeção em tubulações, partindo da escolha dos sensores: IR e uma unidade eletrônica IMU. Esses sensores serão utilizados para informar a presença de obstáculos e a orientação de cada módulo e, a partir desses dados, os módulos poderão se alinhar, se encaixar e desviar de obstáculos. Cada parte (ou módulo) desse robô terá a capacidade de se conectar ao robô principal, que por sua vez poderá detectar e desviar de obstáculos. A exploração e produção petrolífera envolve uma grande variedade de terrenos, como plataformas, balsas, oceanos e tubulações. Em um típico cenário de vazamentos em tubulações, os robôs modulares autorreconfiguráveis podem ajudar a eliminação de custos de perda de produção, ao realizar inspeções, reparos e manutenções nos oleodutos. Essa área da robótica promete um sistema tão versátil que pode mudar a automação de processos de inspeção, reparo e manutenção em ambientes remotos, como os oleodutos.

Palavras-chave: Robótica Modular, Instrumentação, Protótipo.

1. INTRODUÇÃO

Oleodutos são os meios mais eficientes, seguros, ecológicos e economicamente viáveis para transportar petróleo bruto a longas distâncias (Wang et al. (2010)). Mas esse petróleo transportado e o meio em que o oleoduto se encontra podem corroer o metal a ponto de surgir falhas nas tubulações, que pode não só afetar a produção, mas também causar um impacto ambiental. Vistorias recorrentes são necessárias nessa indústria, o que tem motivado o desenvolvimento de novas tecnologias para a detecção e manutenção de vazamentos (Bengel et al. (2009)), como sistemas autônomos - robôs móveis e manipuladores (Bjerkeng et al. (2011)).

Mas esses robôs comerciais não estão preparados para realizar tarefas não previstas na sua programação original, principalmente por limitações mecânicas. Ainda existe uma falta de robôs mais robustos e versáteis (sem um grande comprometimento de custo) (Wang et al. (2008)). Os robôs modulares autorreconfiguráveis atendem esses requisitos por serem máquinas autônomas com morfologia variável (Yim (1995)), podendo ser utilizados para inspeção, manutenção e reparo em oleodutos.

Um robô dito inteligente tem a capacidade de perceber o mundo e a si mesmo, adaptando-se a mudanças no ambiente. E a escolha dos sensores e suas combinações representam um papel importante nessa percepção. Este projeto apresenta a eletrônica e a mecânica necessária para a implementação de sensores em um robô modular reconfigurável adequado à inspeção em tubulações. Cada parte (ou módulo) desse robô terá a capacidade de se conectar ao robô principal, que por sua vez poderá detectar obstáculos.

2. METODOLOGIA

O protótipo foi construído baseado na pesquisa do estado da arte de um robô já existente na Instituição Universidade de Brasília, o *ErekoBot α* (Souza et al. (2011)), e de outros grupos de robótica modular. Com o projeto pronto, o robô foi construído respeitando os requisitos de dimensão, massa e custo.

2.1. Estado da Arte

O sistema do ATRON (Jorgensen et al. (2004)), desenvolvido na University of Southern Denmark, consiste em dois hemisférios de diâmetro $\phi 110\text{ mm}$ e massa 850 g . Cada módulo possui uma bateria externa, dois microcontroladores, um motor DC e sensores de posição, proximidade e orientação. Já o M-Tran (Kurokawa et al. (2008)), desenvolvido na AIST/Tokyo Institute of Technology, combina dois cubos de $66\text{ mm} \times 66\text{ mm} \times 66\text{ mm}$ e massa total 440 g . Os módulos possuem um microcontrolador, dois servo motores e sensores de posição, proximidade e orientação.

Robôs menores e mais leves também foram construídos, como o CONRO (Shen et al. (2002)), com $108\text{ mm} \times 54\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ e massa 115 g , e o PolyBot (Golovinsky et al. (2004)), com $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ e 200 g . O CONRO só possui um microcontrolador, dois servo motores e sensores de posição, proximidade e orientação. E cada módulo do PolyBot possui um microcontrolador, um servo motor e sensores de posição, orientação e força.

Em geral, robôs modulares com sensores são maiores e mais pesados que o ErekoBot α , possuem alimentação externa, um microcontrolador, um servo motor, quatro conectores e sensores de orientação e proximidade, (Tab. Tabela 1).

Tabela 1. Resumo das características de alguns robôs modulares.

Nome	Atron	CONRO	M-Tran	PolyBot
Dimensões (mm)	$\phi 110$	$108 \times 54 \times 45$	$66 \times 66 \times 66$	$50 \times 50 \times 50$
Massa (g)	850 g	115 g	440 g	200 g
Alimentação	Bateria Externa	Bateria Externa	Bateria Externa	Bateria Externa
Microcontrolador	2 \times ATmega128 e 2 \times ATmega8	1 \times STAMP II	1 \times STAMP II	1 \times Motorola PowerPC 555
Motor/GDL ¹	1 \times Motor DC/1	2 \times Servo Motor/2	1 \times Servo Motor/1	1 \times Servo Motor/1
Conectores	4: 2 machos e 2 fêmeas	4: 1 macho e 3 fêmeas	6: 3 machos e 3 fêmeas	2: 2 hermafroditas
Sensores	Posição de junta, orientação e proximidade.	Posição de junta, orientação e proximidade.	Posição de junta e orientação.	Posição de junta, orientação e força.

2.1.1. ErekoBot α

Atualmente, o robô utilizado na Universidade de Brasília é o ErekoBot α (Fig. Figura 1), um módulo homogêneo de reconfiguração manual, dimensões $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ e revestido por uma armadura de acrílico. Para conexão intermodular, cada ErekoBot α possui tiras de Velcro® macho e fêmea coladas ao acrílico. Esse módulo foi projetado para ser pequeno, leve, simples e de baixo custo.

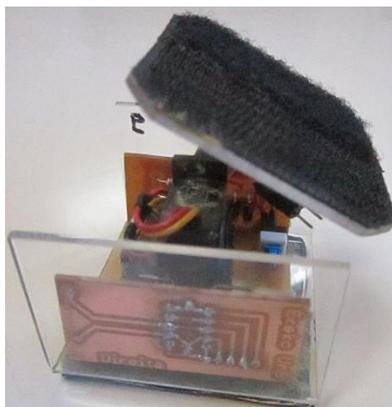


Figura 1. ErekoBot α .

2.2. Projeto ErekoBot σ

A partir das características do ErekoBot α e dos outros robôs modulares estudados, o projetado do ErekoBot σ visou um módulo barato, pequeno e leve que permite a utilização de sensores de orientação e proximidade. Na primeira fase do projeto, o módulo encontra uma tubulação e segue o seu formato, logo, o ErekoBot σ precisa estimar sua própria orientação e a do plano (simulando a face de uma tubulação).

¹ Graus de liberdade.

Baseado nesses requerimentos, escolhemos os sensores, o microcontrolador, a forma de conexão intermodular, os componentes eletrônicos, o motor, o material da armadura e a alimentação. Após todas essas definições, realizou-se uma análise de massa e todos componentes foram reanalisados até que o módulo possuísse uma massa adequada (Fig. Figura 2).

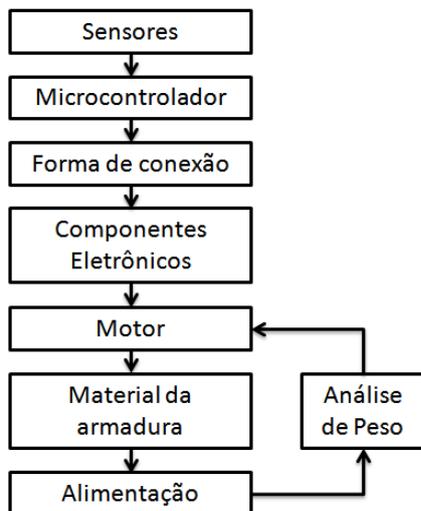


Figura 2. Decisões de projeto.

2.2.1. Sensores

O ErekoBot σ possui:

- Unidade de Medição Inercial (IMU): dispositivo eletrônico que mede velocidade, orientação e força gravitacional. Esse dispositivo combina acelerômetros, giroscópios e, às vezes medidores magnéticos. Os dados da IMU permitem descobrir a posição do robô. No ErekoBot σ é possível estimar quando dois módulos se conectam e se desconectam baseado nas leituras da IMU.
- Sensores Infravermelhos (Sensor IR): no ErekoBot σ , o sensor IR emite e/ou recebe a radiação infravermelha para detectar outros módulos e obstáculos. Com dois sensores IR também é possível alinhar os módulos e o oleocuto.

O ErekoBot σ possui uma IMU com um acelerômetro ADXL345 e um giroscópio ITG-3200 (Fig. Figura 3 (a)), além de quatro sensores IR SHARP GP2Y0A41SK0F (Fig. Figura 3 (b)).

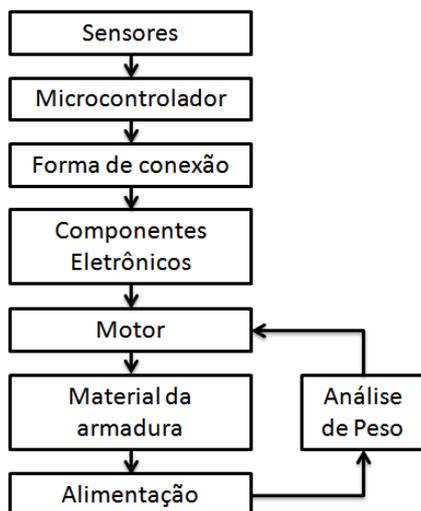


Figura 3. Sensores (a) IMU. (b) Sensor IR.

2.2.2. Microcontrolador

O ErekoBot σ possui um Atmel AVR® ATmega8® para controlar comunicações, as posições do servo motor e a resposta dos sensores.

2.2.3. Conexão Intermodular

O ErekoBot σ possui conexão por Velcro® por simplicidade, o que torna a autorreconfiguração impossível, mas a reconfiguração manual fácil de ser realizada.

2.2.4. Dispositivos Eletrônicos - projeto eletrônico

Existem duas placas de circuito impresso no módulo: (1) a Placa Base que contém o circuito de alimentação, o circuito lógico e o circuito do servo motor e (2) a Placa Lateral, que contém o circuito de pinos.

A fonte de alimentação é uma fonte externa que fornece 12 V para cada um dos módulos. Na placa base, essa tensão passa por reguladores de tensão fornecendo 3.3 V, 5 V e 6 V para o resto do circuito. Capacitores filtram o sinal, resultando em um sinal DC limpo para as saídas lógicas corretas e dois LEDs são responsáveis por informações de depuração. A Placa Lateral possibilita a utilização de componentes externos ao módulo, pela simples conexão de pinos GND, 5V, 3.3V, analógicos, SDA e SCL.

A Figura 4 mostra uma comparação entre os esquemáticos dos circuitos do ErekoBot α e do ErekoBot σ .

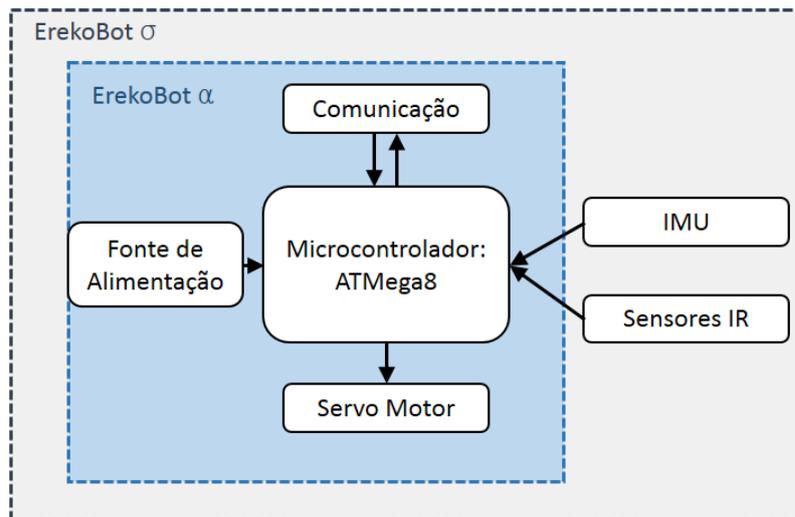


Figura 4. Comparação entre os circuitos do ErekoBot α e do ErekoBot σ .

2.2.5. Motor

Para decisão do motor, foram necessários cálculos de dimensões e massa do módulo. Para isso consideramos:

1. Um módulo com um grau de liberdade, dimensões $L \times L \times L$ e peso $W_t = m_t g$, onde m_t é a massa total do módulo e g é a aceleração gravitacional;
2. O atuador posicionado no centro do módulo;
3. Os módulos conectados no mesmo plano;
4. Os movimentos possíveis: plano vertical, *pitch*, e plano horizontal *yaw*.

Em *pitch* (Eq. 1), a intensidade de torque (τ_{pitch}) necessária para um módulo A levantar um módulo B é definida a partir da força aplicada (ou o peso W_t), a largura da barra (L) e o ângulo entre os vetores de força e da largura da barra (α).

$$\tau_{pitch} = m_t g L \sin(\alpha) \quad (1)$$

Em *yaw* (Eq. 2), a intensidade de torque (τ_{yaw}) necessária para um módulo A levantar um módulo B também é definida a partir da força aplicada (W_t), a largura da barra (L) e o atrito no plano horizontal (μ_s).

$$\tau_{yaw} = m_t g L \mu_s \quad (2)$$

O torque máximo (Eq. 3) nos planos vertical e horizontal é considerado máximo quando $\alpha = \pi/2$ e $\mu_s = 1$, respectivamente. Para os movimentos previstos do ErekoBot, é necessário que um módulo carregue no mínimo outros dois. A Eq. 4 estima o torque necessário do atuador (τ_A), de acordo com o diagrama de corpo livre da Fig. Figura 5.

$$\tau_{max} = m_t g L \quad (3)$$

$$\tau_A = m_t g L + m_t g (2L) = 3(m_t g L) \quad (2)$$

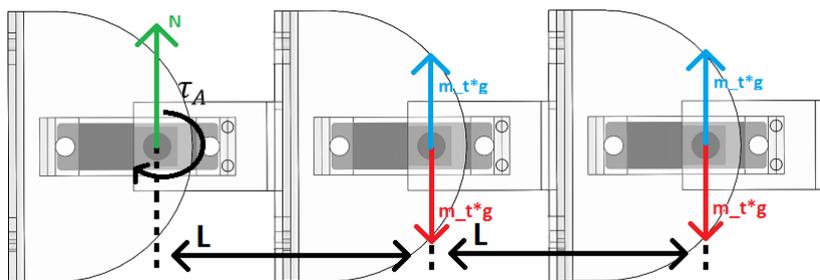


Figura 5. Diagrama de Corpo Livre para análise do motor.

Foram estimados as massas do módulo com base nas documentações oficiais dos componentes e nos resultados obtidos com o SolidWorks® (Tab. Tabela 2). O peso máximo estimado para o módulo é 107.62 g.

Tabela 2. Massas estimadas.

Peça	Massa Estimada (g)
Base	22.72
Encaixe do motor	3.94
Haste e Tampo	12.46
Circuito Eletrônico	35
Servo Motor	19
Sensores IR	4×3.5
IMU	0.5
Total	107.62

Para a análise de massa, consideraremos um erro de aproximadamente 15 % entre os resultados estimados e reais, logo, o módulo pode ter uma máxima massa de 125 g.

Substituir $L = 0.070 \text{ mm}$, $m_t = 0.125 \text{ kg}$ e $g = 9.82 \text{ m/s}^2$ na Eq. 4 resulta em um torque de 0.26 N.m (Eq. 5).

$$\tau_A = 3 * (0.125 * 9.82 * 0.070) = 0.257775 \text{ N.m} \quad (5)$$

Para a escolha do motor, consideraremos um fator de segurança de 30 %, resultando em um torque de 0.34 N.m (Eq. 6).

$$\tau_A = 0.25777 * 1.3 = 0.3351075 \text{ N.m} \quad (6)$$

Como encontrados estão em $[\text{N.m}]$ e os valores comerciais de servo motores estão em $[\text{cm.Kg}]$, é necessária uma conversão (Eq. 7). Disso conclui-se que o projeto necessita de um motor com torque mínimo de 3.41 cm.Kg e massa pequena (menor que 20 g).

$$\tau_A = 0.3351075 * 100 / 9.82 \text{ N.m} = 3.4125 \text{ cm.Kg} \quad (7)$$

O motor utilizado no módulo é um servo motor Hitec HS-85BB, que, alimentado com 6V, sustenta 3.50 Kg.cm e possui uma massa de 19 g.

2.2.6. Materiais - projeto mecânico

O ErekoBot σ , um cubo de aresta 70 mm, é formado por peças de acrílico, um material leve e resistente a impactos. O módulo é dividido em três peças principais: a Base, o Encaixe do Motor e o conjunto Haste-Tampo.

A placa eletrônica está aparafusada na Peça Base (Fig. Figura 6(a)) e dois sensores IR são encaixados para medir proximidade. Em uma das laterais da Peça Base fica aparafusada a Peça Encaixe do Motor (Fig. Figura 6 (b)), responsável por fixar o motor ao módulo. O Conjunto Haste-Tampo (Fig. Figura 6 (c)) é fixado ao motor. É na haste que a IMU está localizada para medir orientação. O tampo possui espaço para o encaixe dos outros dois sensores IR.

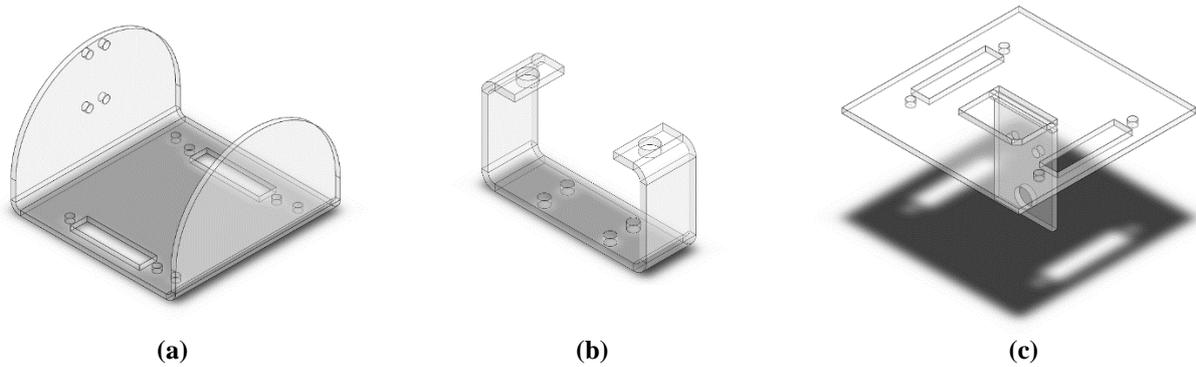


Figura 6. (a) Base. (b) Encaixe do Motor. (c) Conjunto Haste-Tampo.

Respectivamente, o SolidWorks® previu massas de 22.72 g, 3.94 g e 12.46 g para as peças Base, Encaixe do Motor e Conjunto Haste-Tampo. A Figura 7 mostra o conjunto completo totalmente montado.

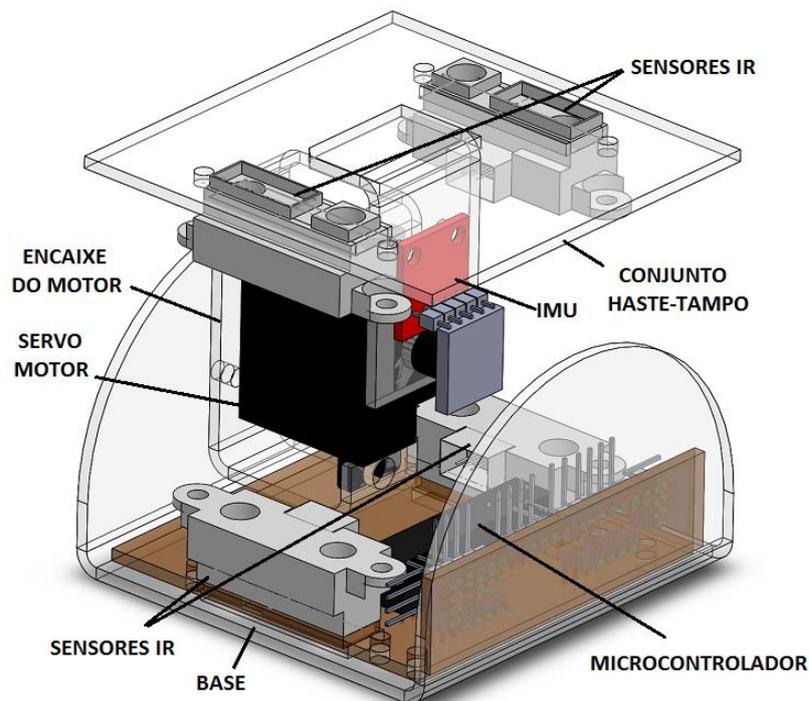


Figura 7. ErekoBot σ completo.

2.2.7. Análise de Massa

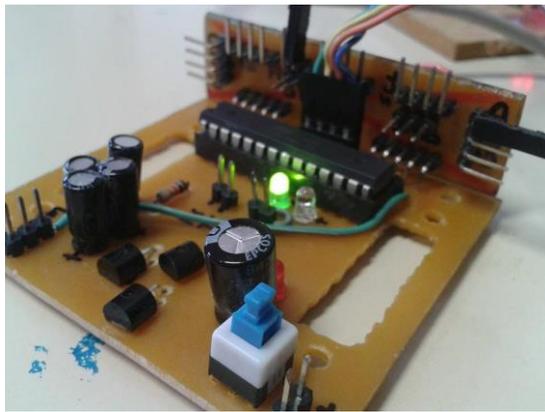
Considerando as dimensões do ErekoBot σ e o motor utilizado definidas, um módulo consegue carregar até dois outros módulos se eles pesarem no máximo 125 g. Por isso é importante pesar cada parte do robô e comparar com os resultados estimados.

2.2.8. Construção

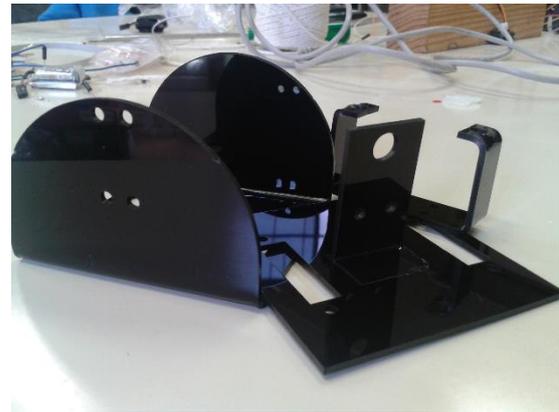
O circuito eletrônico foi impresso e soldado manualmente e as peças de acrílico foram encomendadas em uma loja especializada para melhor precisão. Todas as partes foram pesadas e comparadas com os valores teóricos. E, com essas massas validadas, cada parte foi aparafusada para a montagem do módulo completo.

3. RESULTADOS

O projeto eletrônico do ErekoBot σ deu origem às placas eletrônicas construídas manualmente (Fig. Figura 8(a)). E o projeto mecânico permitiu a construção das peças em uma loja especializada (Fig. Figura 8(b)). A Figura 9 mostra o ErekoBot σ totalmente montado.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Circuito eletrônico. (b) Peças de acrílico.

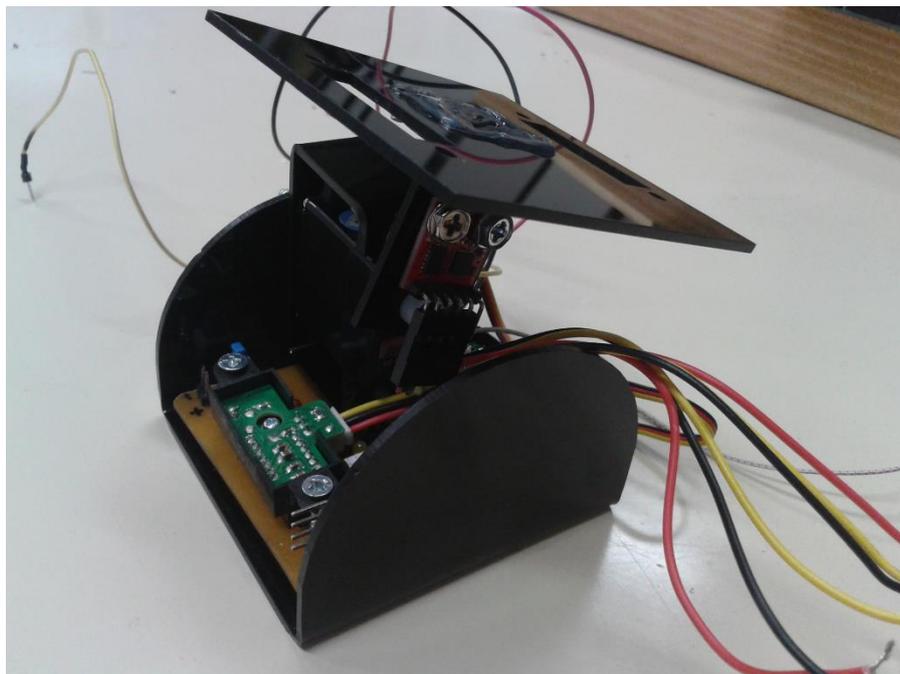


Figura 9. Módulo ErekoBot σ completo.

As massas estimadas e reais são semelhantes, e a massa total apresentou uma diferença de 7.79 % ((Tab. Tabela 3), o que é considerado dentro do limite estabelecido na Seção 2.2.7.

Tabela 3. Massas medidas.

Peça	Massa (g)
Base	26
Encaixe do motor	4
Haste e Tampo	14
Circuito Eletrônico	33
Servo Motor	19
Sensores IR	19
IMU	1
Total	116

Exceto pelos sensores, o ErekoBot σ apresentou pequenas diferenças em relação ao ErekoBot α . As principais características entre os dois módulos podem ser vistas na Tab. Tabela 4.

Tabela 4. Comparação entre as características do ErekoBot α e do ErekoBot σ .

Características	ErekoBot α	ErekoBot σ
Tipo	Homogêneo	Homogêneo
Dimensões (mm)	50 × 50 × 50	70 × 70 × 70
Massa (g)	80	116
Arquitetura	Mobile	Mobile
Materiais	Acrílico, fenolite e Velcro®	Acrílico, fenolite e Velcro®
Reconfiguração	Determinística, manualmente por velcros	Determinística, manualmente por velcros
Lados conectáveis	2	2
Graus de liberdade	1 (180° rotacionais)	1 (180° rotacionais)
Servo Motor/ Torque	Turnigy TGY-MG90S/ 2.20 Kg.cm (6V)	Hitec HS-85BB/ 3.50 Kg.cm (6V)
Microcontrolador	Atmel® AVR® ATmega8	Atmel® AVR® ATmega8

4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os projetos elétrico (Fig. Figura 4) e mecânico (Fig. Figura 6) de um robô modular reconfigurável de baixo custo - o ErekoBot σ . Isso permitiu a construção da placa de circuito impresso (Fig. Figura 8(a)) e das peças de acrílico Fig. Figura 8(b)), e, posteriormente a montagem do robô completo (Fig. Figura 9).

Usualmente, robôs modulares reconfiguráveis utilizam o mesmo tipo de sensores que o ErekoBot σ : uma IMU para orientação e Sensores IR para proximidade (Jorgensen et al. (2004), Kurokawa et al. (2008) and Shen et al. (2002)). O PolyBot, em Golovinsky et al. (2004), também utiliza sensores de força que não são necessários ainda para esses requerimentos de projeto.

Mesmo com a implementação de sensores, esse artigo apresentou um robô modular reconfigurável simples, pequeno, leve e barato. Para um modular reconfigurável mais robusto, ainda é necessário (1) testar todos os sensores utilizados, (2) adaptar o projeto mecânico para novas formas de conexão sem Velcro® (3) encontrar novos materiais para as peças e (4) adaptar o projeto eletrônico para comunicação sem fio e componentes SMD. No entanto, com esse módulo, já é possível fazer rotinas de software para detecção de obstáculos, alinhamento entre dois módulos e alinhamento entre um módulo e uma tubulação.

Sabe-se que a implementação de sensores na robótica importa para o desenvolvimento de novos projetos em robôs convencionais, mas essa importância cresce ainda mais em sistemas distribuídos, como da robótica modular. O projeto do módulo apresentado nesse artigo é útil para futuros projetos na robótica modular, que prometem um sistema versátil capaz de mudar a automação de processos de detecção e manutenção de corrosões.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de reconhecer as instituições ANP, FINEP, MCT e Petrobrás e ao programa PRH-PB 223 pelo apoio ao presente estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Bengel, M., Pfeiffer, K., Graf, B., Bubeck, A. and Verl, A., 2009. "Mobile robots for offshore inspection and manipulation." In IROS. IEEE, pp. 3317–3322.
- Bjerkeng, M., Transeth, A.A., Pettersen, K.Y., Kyrkjebø, E. and Fjerdingen, S.A., 2011. "Active camera control with obstacle avoidance for remote operations with industrial manipulators: Implementation and experimental results." In IROS. IEEE, pp. 247–254. ISBN 978-1-61284-454-1.
- Golovinsky, A., Yim, M., Zhang, Y., Eldershaw, C. and Duff, D., 2004. "Polybot and polykinetic/spl trade/ system: a modular robotic platform for education." In ICRA. IEEE, pp. 1381–1386.
- Jorgensen, M.W., Ostergaard, E.H. and Lund, H.H., 2004. "Modular atron: modules for a self-reconfigurable robot." In IROS. IEEE, pp. 2068–2073. ISBN 0-7803-8463-6.
- Kurokawa, H., Tomita, K., Kamimura, A., Kokaji, S., Hasuo, T. and Murata, S., 2008. "Distributed self-reconfiguration of m-tran iii modular robotic system." I. J. Robotic Res., Vol. 27, No. 3-4, pp. 373–386.
- Shen, W.M., Salemi, B. and Will, P.M., 2002. "Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for conro self-reconfigurable robots." IEEE T. Robotics and Automation, Vol. 18, No. 5, pp. 700–712.
- Souza, N.C.A., Oliveira, L.C.B., Franco, D.B.d.S.D., Felippes, R.A., Souza, M.M., Viana, D. M.and Brito, B.R. and Koike, C.M.C.e.C., 2011. "ErekoBot alfa project design and construction of a modular robot prototype". In 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering.
- Wang, Z., Cao, Q., luan, N. and Zhang, L., 2008. "Development of new pipeline maintenance system for repairing early built offshore oil pipelines". In Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on. pp. 1–6. doi:10.1109/ICIT.2008.4608504.

- Wang, Z., Cao, Q., Luan, N. and Zhang, L., 2010. "Development of an autonomous in-pipe robot for offshore pipeline maintenance." *Industrial Robot*, Vol. 37, No. 2, pp. 177–184.
- Yim, M., 1995. "Locomotion with a unit-modular reconfigurable robot". Technical report, Stanford University, Stanford, CA, USA.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EREKOBOT SIGMA: A RECONFIGURABLE MODULAR ROBOT PROTOTYPE WITH SENSORS

Ana Carolina Cardoso de Sousa, anacsousa1@gmail.com¹

Ricardo Diniz Caldas, ricardodinizcaldas@gmail.com¹

Dianne Magalhães Viana, diannemv@unb.br¹

Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike, ckoike@unb.br²

¹Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica. Campus Universitário Darcy Ribeiro.

²Universidade de Brasília, Departamento de Ciências da Computação. Campus Universitário Darcy Ribeiro.

Abstract. *The inspection in pipelines is essential for an updated diagnosis at Oil and Gas Industry, and the manual inspection of remote areas implies great expense in the long term. Therefore, this process optimization requires autonomous and versatile systems. Self-reconfigurable modular robots are autonomous machines with variable morphology, so they are a great choice to deal with it. Reorganizing its parts connectivity, the self-reconfigurable modular robots has the potential to offer major flexibility and tolerance to failure with a low cost. This work aims to design a reconfigurable modular robot suitable for pipelines inspection, starting from the sensors choice: Infrared sensors and an electronic unity IMU. These are going to be used to report the presence of obstacles and position/orientation of each module; from this data the modules will be capable of align, joint or avoid obstacles. Each part (or module) will be capable of connecting to the main module, which in turn can detect and avoid obstacles. The oil exploration and production involves a great variety of soils, such as platforms, ferries, oceans, pipelines. At a typical scenario of leakage in pipelines, the self-reconfigurable modular robots are capable of helping at the elimination of costs such as production loss, manual inspections, repairs and maintenance at pipelines. This area of robotics promises such a versatile system that in a near future can change the processes automation of inspection, repair, maintenance at remote environments, as pipelines.*

Keywords: *Modular Robotics, Instrumentation, Prototype.*