

PROTÓTIPO ROBÔ HEXÁPODE PARA INSPEÇÃO EM TUBULAÇÕES DE AR CONDICIONADO

MANUEL M. P. REIMBOLD¹, MAURÍCIO DE CAMPOS¹, AIRAM SAUSEN¹, JONATAS R. KINA¹, DORIVAL M. NETO¹.

1. GAIC-Grupo de Automação Industrial e Controle, Dpto. de Ciências Exatas e Engenharias, UNIJUI
Rua. Lulu Ilgenfritz, 480 – Ijuí – RS

E-mails: manolo; campos; airam; jonatas.kina; dorival.neto@unijui.edu.br

Abstract - The inspection of the ventilation, oil, gas and others pipes, is an activity vehement in the industry. However, the dangers of maintenance and the difficulty of access to pipelines, can expose the human life, to unnecessary risks. Hexapod robots are capable of performing such activities because its architecture allows displacement along pipes, checking the occurrence of defects or failures in them. The objective of this study was to develop an autonomous hexapod robot for inspection, with low-cost, efficiency and versatility. The prototype was developed in four stages: Idealization (1), where was defined the architecture and mechanism of locomotion considering the tasks to be performed. Project (2) consisted in lifting of the resources and carrying out simulations of behavioral performance of the prototype. Assembly (3), was performed the construction of the hexapod robot and achievement preliminary tests. Improvements stage (4), consisting by analysis of the stability, performance and security of the prototype occurred the necessary adjustments. The result is an autonomous hexapod robot monitored remotely. The extensive tests performed demonstrate that the prototype is inexpensive, reliable and versatile, being able to performing pipeline control, as proposed.

Keywords – Sensors and Actuators in Robotics and Automation, Biomimetics, Building materials for robots, Hexapod Robot, Mechanism four bars, Preventive Maintenance

Resumo— A inspeção de dutos de ventilação, óleo, gás e outros, é uma atividade veemente na indústria. No entanto, os perigos na manutenção e a dificuldade de acesso a eles podem expor, a vida humana, a riscos desnecessários. Robôs hexápodes são capazes de executar essas atividades uma vez que sua arquitetura permite o deslocamento ao longo dos dutos, verificando a ocorrência de defeitos ou falhas nos mesmos. O objetivo deste estudo foi desenvolver um robô hexápode autônomo para inspeção, com baixo custo, eficiência e versatilidade. O protótipo foi desenvolvido em quatro etapas: (1) idealização, onde foi definida a arquitetura e o mecanismo de locomoção considerando as tarefas a serem executadas. (2) Projeto, consistiu no levantamento dos recursos e realização de simulações de desempenho comportamental do protótipo. (3) Montagem, nesta foi realizada a construção do robô hexápode e submetido a testes preliminares. (4) Melhorias, fase constituída por meio de análise da estabilidade, desempenho e segurança do protótipo, promovendo os ajustes necessários para um correto desempenho. O resultado é um robô hexápode autônomo monitorado remotamente. Os testes exaustivos realizados demonstram que o protótipo é barato, seguro e versátil, sendo capaz de andar dentro dos dutos, como proposto.

Palavras-chave— Sensores e Atuadores em Robótica e Automação, Biomimética, Materiais para robôs, Robôs hexápodes, Mecanismo quatro barras, Manutenção Preventiva

1 Introdução

As tubulações de ar condicionado estão sujeitas a danos de naturezas diversas, podem sofrer com processo de entupimento progressivo causado por acúmulo de resíduos, sujeira, animais mortos (Archila, 2008). Deve considerar-se que os dutos de ar condicionado e ventilação são frágeis, e sua limpeza deve seguir normas específicas, de forma a manter a qualidade do ar respirado pelas pessoas que frequentam ambientes climatizados.

A correta manutenção dos sistemas de climatização previne o surgimento de bactérias que podem ocasionar sérios problemas respiratórios a curto ou longo prazo. Entre essas doenças cabe salientar a doença do legionário. Esta é uma pneumonia atípica causada por uma bactéria, *Legionella Pneumophila*, que pode ser encontrada em sistemas de ar condicionado central e torres de refrigeração de água (Schulz, 2005). De acordo com a Associação Nacional de Tecnologia de Ar Interior (ANATAI), a tarefa de manter o ar interno saudável deve ficar a cargo de

alguma empresa especializada, capaz de cumprir as exigências da legislação RE 176/00 do Ministério da Saúde.

Para a ANATAI o método de limpeza mais eficaz emprega robôs operados remotamente. Esses usam escovas rotativas impulsionadas por ar comprimido para varrer os dutos. Outros acessórios acoplados ao robô efetuam a sanitização, pulverizando bactericidas e fungicidas. Várias empresas têm projetado robôs que desenvolvem essa atividade, porém o deslocamento é realizado através do uso de rodas e de cordão umbilical para prover energia elétrica e ar comprimido. O que pode gerar problemas no robô ao enredar-se no próprio cordão (Panta, 2005).

De acordo com o Exército dos EUA, metade da superfície da Terra é inacessível a veículos sobre rodas. Animais e homens com locomoção sobre pernas têm pouca dificuldade nos 50% da superfície restante. Assim, a imitação do comportamento dos seres vivos na natureza, como os insetos, gera diversas soluções propostas pela robótica junto à biomimética (Long, 2007). A idéia é: se a natureza levou milhões de anos para aprimorar seus próprios mecanismos, por que não copiá-los? Afinal, os insetos

andam pelas paredes e pelo teto o tempo todo.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um robô hexápode autônomo para inspeção, com capacidade para locomover-se dentro de tubulações superando possíveis obstáculos e, cujo projeto e construção apresentem baixo custo, eficiência e versatilidade; visando posteriormente, que o protótipo admita a instalação de escovas rotativas, que acopladas a motores elétricos tem a função de limpar os dutos de ar condicionado.

Dessa forma, o protótipo foi desenvolvido em quatro etapas: (1) idealização, onde foi definida a arquitetura e o mecanismo de locomoção considerando as tarefas a serem executadas; (2) projeto, que consistiu no levantamento dos recursos e na realização de simulações de desempenho comportamental do protótipo; (3) implementação, fase na que foi realizada a construção do robô e a execução de testes preliminares; (4) melhorias, fase constituída pela análise da estabilidade, desempenho e segurança do protótipo, e onde ocorreram os ajustes necessários (Li, 2012).

Este trabalho foi organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentada a concepção do protótipo, o material escolhido e o processo de construção, apresentando cada uma das suas partes. Na Seção 3 são expostos os resultados e as discussões. Finalmente, na Seção 4, são apresentadas a conclusão e a proposta de trabalhos futuros.

2 Robôs Hexápodes

O interesse em construir robôs baseados em muitas pernas, como os hexápodes, é motivado por vários fatores como: velocidade, economia de combustível, mobilidade e suavidade. São robôs que não deterioram o meio ambiente, quando o terreno é áspero e duro. A dualidade entre insetos e os robôs hexápodes permite que estes realizem difíceis tarefas e interajam com um ambiente, uma vez que os insetos o fazem apesar de sua aparente falta de intelecto (Siegwart, 2004)

A estrutura do robô hexápode é semelhante ao corpo de um inseto. Essa é composta por tórax, três pares de pernas localizadas na parte média torácica e a cabeça, na qual porta um par de antenas e um par de olhos. A analogia entre um inseto e o robô hexápode é mostrada na Fig. 1 (Delcomyn, 2008).

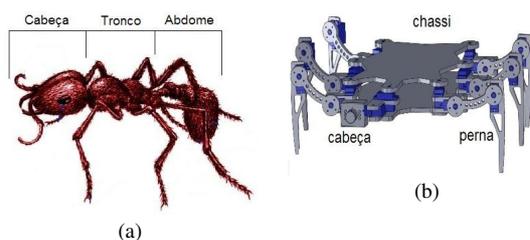


Figura 1. Analogia (a) Formiga, (b) Estrutura do hexápode

A comparação entre uma formiga (Fig. 1a) e um hexápode (Fig. 1b) permite identificar o corpo da formiga com o chassi do robô. A cabeça obedece a uma câmera instalada, e as antenas podem ser representativas de sensores que lhe permitem escolher o sentido de locomoção. Também as mandíbulas da formiga podem ser implementadas utilizando-se uma garra instalada na frente do chassi.

Cada forma de caminhar dos insetos está associada aos seus hábitos e ambientes diferentes em que vivem (Zhang, 2012). Desta maneira, na construção de mecanismos, o número de pernas pode estar associado à finalidade do robô e, principalmente, à forma de caminhar que se espera dele. De modo geral, quanto mais pernas um mecanismo possui, mais suave é seu movimento (Franz, 2000). Entretanto, o protótipo pode tornar-se inviável economicamente pelo número de atuadores necessários para ter pernas articuladas, como é o caso do hexápode da Fig. 1b.

2.1 Chassi

Na literatura técnica dois tipos de chassis são encontrados, o circular e o retangular. O chassi circular possui a vantagem de movimentação em qualquer direção sem necessidade de rotacionar. Entretanto observa-se que este chassi possui uma área maior em relação ao chassi retangular, fato que dificulta a movimentação em dutos estreitos. A estrutura adotada para este projeto foi à retangular conforme Fig. 2.

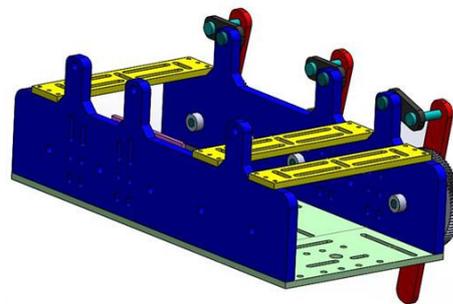


Figura 2. Chassi retangular para robô tipo quatro barras

Nessa estrutura utilizaram-se 3 paredes ao invés de quatro, as duas laterais e a inferior, sendo as laterais unidas por extensões. Esta configuração permitiu posicionar a placa do circuito eletrônico sobre as extensões. A cavidade formada por essas paredes permitiu albergar as baterias. E nas paredes laterais posicionaram-se as extremidades ou pernas.

A escolha do material para a construção do robô depende de vários aspectos, tais como: tipo da aplicação, resistência do conjunto, carga submetida, desgaste, etc. Também o peso é muito importante, pois, quanto mais pesado o robô, mais energia será necessária para movê-lo e maior terá de ser a bateria. Porém, inicialmente, devem considerar-se os materiais mais simples de trabalhar. Para a construção do chassi cabe considerar materiais como o papelão, a madeira, o plástico e o metal. Os plásticos têm boa resis-

tência à compressão, flexão e tração, além disso, são resistentes à corrosão e têm baixa condutividade térmica. Como são bons isolantes elétricos diminuem os problemas de curto circuito na montagem. Como a missão do hexápode é inspecionar e não confrontar, o material escolhido foi acrílico. Este é um material durável, leve, não tóxico, não-magnético, não corrosivo e barato.

2.2 Pernas

O hexápode possui seis pernas cuja finalidade é sustentar/equilibrar o corpo e gerar o impulso necessário para o deslocamento (Piziollo, 2002). Elas podem ser articuladas e não articuladas e podem ou não ser acionadas por atuadores. Neste trabalho, o movimento das pernas do hexápode é baseado no mecanismo de quatro barras ou quadrilátero articulado como ilustrado na Fig. 3.

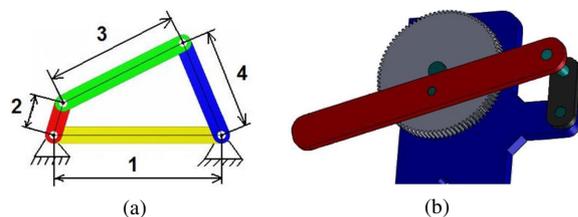


Figura 3. Princípio de locomoção (a) Mecanismo quatro barras; (b) Perna

O mecanismo quatro barras é de aplicação variada em máquinas e equipamentos, sua função é transformar e transmitir movimentos. É um mecanismo versátil, e consiste de quatro membros rígidos interconectados através de juntas formando uma cadeia cinemática fechada como mostrado na Fig. 3a. Nesta observa-se que a peça 1 é o suporte ou chassi, geralmente estacionária. A manivela 2 é a peça acionadora. A peça 4 é denominada de balancim e a peça 3 é chamada de biela. Enquanto a manivela 2 gira, não há perigo de travamento do mecanismo. Deve-se tomar cuidado no dimensionamento dos comprimentos das peças para evitar pontos mortos, de modo que o mecanismo não pare em suas posições extremas provocando o travamento. Desta forma o princípio é aplicado à perna como ilustrado na Fig. 3b, e cujo resultado é mostrado na Fig. 4.



Figura 4. Corpo e pernas do hexápode em acrílico

Consequentemente, utilizando esse mecanismo foi possível que o hexápode realizasse os movimen-

tos de caminhada para frente, para trás, e para os lados obedecendo ao princípio do tanque. Para provocar um deslocamento harmonioso e suave, se utilizaram um motor cc e 2 tipos de engrenagens, para um conjunto de 3 pernas, conforme ilustrado na Fig. 4.

2.3 Circuito Eletrônico

Os dispositivos responsáveis pela movimentação do hexápode são dois servos motores Tower Pro MG90S. Estes foram escolhidos uma vez que o motor, a transmissão e o controle de posição estão integrados no mesmo. Isto simplificou o projeto e ainda reduziu o custo. Ambos os motores foram alimentados com 5V, drenando uma corrente de 80mA, e atingindo 60° em 0,3s. Os motores escolhidos adequaram-se ao quesito peso, uma vez que cada servo motor pesa 10g. Esses servos motores obedecem a dois tipos de controle. Um modo é automático e outro é manual ou remoto. A escolha de funcionamento é feita desde o controle remoto, o qual é apresentado na Fig. 5.

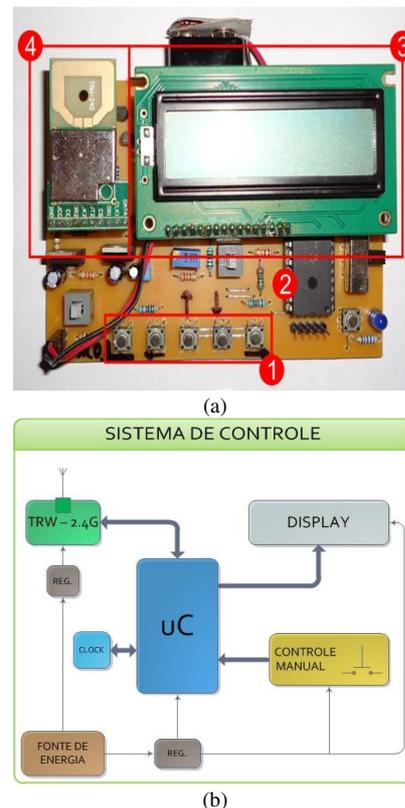


Figura 5. Joystick para controle do hexápode (a) Circuito eletrônico, (b) Diagrama de blocos

Na Fig. 5a os índices identificam as seguintes partes no joystick: 1-push button para selecionar o tipo de controle remoto, 2-microcontrolador (uC) PIC 16F877A da Microchip®, 3-display LCD (Liquid Cristal Display), e 4-um transceptor TRW-2,4 GHz. O uC encarrega-se de gerenciar os motores, os sensores e os dados de temperatura, umidade e nível da carga da bateria no robô. Os dados são rece-

bidos a uma distância de 100 m entre o hexápode e o controle remoto. O circuito eletrônico do *joystick* é alimentado por uma bateria de 9V.

O circuito eletrônico instalado no robô, também faz uso do uC PIC 16F877A (Ver Fig.6).

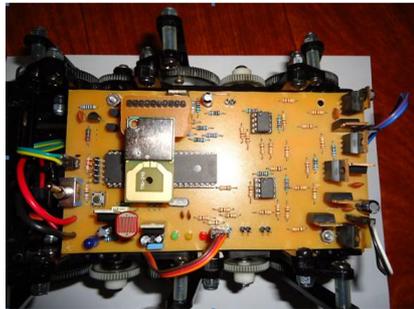


Fig. 6. Controle próprio do hexápode

No circuito do robô (Fig. 6) outro transceptor TRW-2.4 GHz foi instalado. Este permite que os dados sejam monitorados no *joystick*. O conjunto de componentes eletrônicos no robô é alimentado por uma bateria recarregável de lítio, a qual fornece uma voltagem de 12V.

Os sensores exteroceptivos são aqueles que adquirem informação sobre o ambiente, temperatura e intensidade de luz. Quando estes são instalados no hexápode, o robô pode extrair características significativas do ambiente em que está inserido e enviá-las a outro terminal, caso seja solicitado. Sensores infravermelhos para detecção de obstáculos foram inseridos na parte frontal do hexápode. A placa do circuito de detecção e o posicionamento no hexápode são mostrados na Fig. 7.

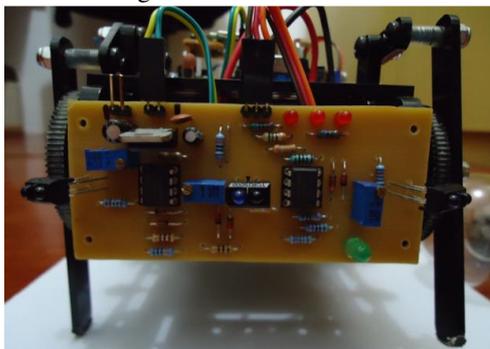


Figura 7. Circuito eletrônico do detector de obstáculos

2.4 Software implementado

O algoritmo de movimentação implementado no protótipo segue os modelos biológicos. O programa foi desenvolvido em linguagem C. Sua finalidade é controlar os dois motores do hexápode de acordo com a informação enviada pelos sensores infravermelhos. Os movimentos são realizados por todas as pernas de forma cadenciada, o que propicia o deslocamento sincronizado das seis pernas. Caso seja solicitado por um terminal remoto, tipo um PC (*Personal Compu-*

ter), os dados de temperatura e iluminação podem ser enviados e analisados eventualmente.

Ligando a alimentação no hexápode são inicializadas as configurações do uC, sendo ajustadas as variáveis bem como as configurações do TRW-2.4G. A comunicação com o transceptor é SPI (*Serial Peripheral Interface*). Nesse instante são realizadas medições das grandezas envolvidas no ambiente (temperatura, luminosidade e tensão da bateria). Caso a tensão da bateria esteja acima ou igual a 10,8V o *led* verde é acionado indicando estado “OK” da bateria e o *software* continuará com as próximas etapas. Caso a leitura da tensão da bateria seja maior que 10,5V e menor que 10,8V o *led* amarelo é acionado indicando estado de ALERTA e o *software* poderá seguir para as próximas etapas. Caso a tensão estiver menor a 10,5V, o *led* vermelho é acionado indicando TENSÃO BAIXA e o *software* envia esta indicação para a central de controle. Isto provoca a execução de um laço infinito, não acionando os motores do hexápode. Caso a tensão da bateria esteja “OK” ou ALERTA o *software* envia para a central de controle os valores de temperatura, luminosidade e tensão da bateria, os quais foram lidos e processados anteriormente.

Ao receber da central de controle a variável “modo de locomoção”, e esta indicar locomoção automática, o hexápode realizará as leituras dos sensores infravermelhos e se locomoverá baseado nestas informações. Se a central de controle enviar modo de locomoção manual, o hexápode irá se locomover baseado nas informações enviadas pelo controle remoto ou *joystick*. Para a locomoção do hexápode o *software* seta determinados pinos do uC em alto ou baixo nível, os quais ativam o *driver* que é responsável pelo acionamento da ponte H. Esta tem a capacidade de inverter o sentido de rotação. Logo o *software* inicia novamente a partir das medições das grandezas elétricas envolvidas no sistema. A lógica do programa desenvolvido no uC é ilustrada na Fig. 8

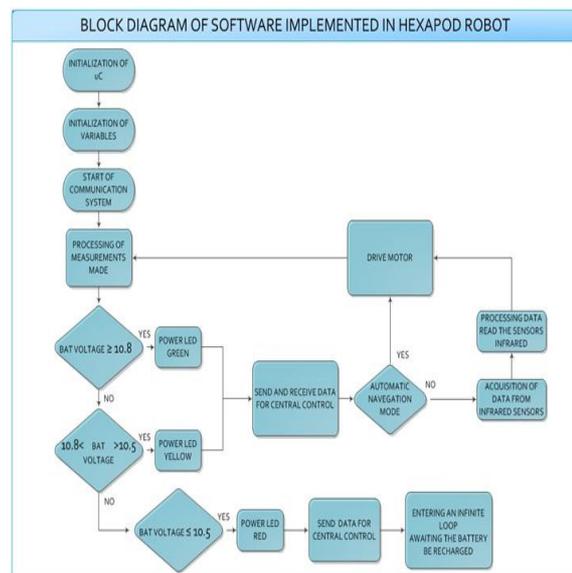


Figura 8. Fluxograma para controle do hexápode

3 Resultados

Inicialmente procurou-se desenvolver um hexápode com estrutura leve. A usinagem das peças do robô permitiu construir uma estrutura com maior precisão. O acrílico se mostrou um material que alia resistência e leveza e ainda possui custo baixo. A confecção em acrílico do robô possibilitou: diminuir o seu peso em aproximadamente 50% caso fosse de metal, além de facilitar a distribuição e encaixe das engrenagens, motores, placa do circuito no chassi. Para o movimento das engrenagens de um lado se utilizou apenas um motor, o que possibilitou o movimento de três pernas simultaneamente. Portanto, foram utilizados dois motores para o movimento das seis pernas. Isto favoreceu o peso da estrutura, o que veio facilitar posteriormente o desenvolvimento do *software*. A montagem da estrutura mecânica com parafusos conferiu ao protótipo solidez e ótimo acabamento. A estrutura mecânica em sua montagem final atingiu o objetivo de assemelhar-se a um inseto, tanto visualmente quanto nos movimentos executados, uma vez que o andar do hexápode se mostrou harmonioso. Logo, o mecanismo de engrenagens e quatro barras apresentaram bons resultados.

O projeto do circuito eletrônico de controle limitou-se aos componentes indispensáveis ao funcionamento do uC e dos servos motores. O resultado foi uma placa compacta, com um número reduzido de componentes eletrônicos que atenderam ao projeto. Nos testes realizados, o uC PIC16F877A se mostrou eficaz controlando o protótipo, que além de comandar os dois motores e receber os sinais provenientes do sensor, ele envia os dados de temperatura e iluminação para o *joystick* e para o PC. Verificou-se que o circuito detector de obstáculos desempenhou sua função em ambiente controlado. Entretanto, se houver um descontrole na iluminação ambiental, o detector de obstáculos perde sua capacidade. Os testes realizados num duto, especificamente construído para a realização dos testes, confirmaram o funcionamento do protótipo, o qual é apresentado na Fig. 9.

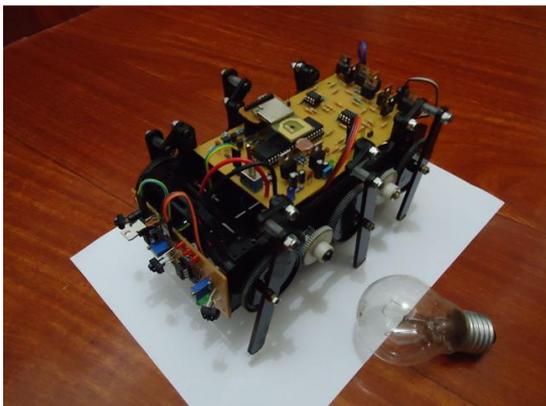


Figura 9. Hexápode baseado no mecanismo 4 barras

Entretanto, durante os testes se observou que o hexápode apresentaria melhor desempenho, se o cir-

cuito detector de obstáculos fosse replicado e instalado na traseira do robô. Outro aspecto que se observou é o escorregamento do protótipo quando a superfície da tubulação é lisa. O que exige o melhoramento da extremidade da perna que realiza o contato com a superfície. Conseqüentemente, o protótipo apresentou um desempenho comportamental satisfatório em dutos de superfície áspera e não completamente herméticos.

4 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o estudo e desenvolvimento de um robô hexápode tipo quatro barras destinado à inspeção de tubulações. O robô hexápode é leve, ágil e eficiente, pois suas seis pernas permitem a sua movimentação. O mecanismo de quatro barras e trem de engrenagens facilitou a concepção do circuito eletrônico com baixo consumo de energia. Em particular, a implementação de algoritmos de controle embarcado através de microcontroladores para a navegação do robô e as melhorias feitas na estrutura mecânica e eletrônica, apresentaram os resultados desejados, permitindo ao robô movimentar-se com eficiência em ambientes planos com obstáculos e em ambientes levemente irregulares. Para as próximas etapas pretende-se realizar a substituição por motores de maior torque, a instalação de câmera para a inspeção e a instalação de escovas para efetivar a limpeza. Como trabalhos futuros são propostos a modelagem matemática do desempenho caminhante do robô, e o estudo para substituição dos sensores infravermelhos de forma a detectar obstáculos posicionados a maiores distâncias. Desta forma será possível prever e analisar problemas nos dutos sem a presença de colaboradores no local, prevenindo a vida humana dos riscos à saúde que esta atividade pode causar.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul e a CEEE - Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica pela concessão de bolsas de Iniciação Científica.

Referências Bibliográficas

- Archila, J. G., 2008. Study and conceptual design of a robot for inspection of service lines. M.Sc. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Delcomyn, F., 2008, Biologically inspired robots. *Bioinspiration and Robotics: Climbing and Walking Robots*, Chapter 17, pp. 279-300.
- Franz, M.O. and Mallot, H.A., (2000). Biomimetic robot navigation. Elsevier. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 30 133-153. DOI: [10.1016/S0921-8890\(99\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(99)00069-X)

- Li, J., Wang, Y. and Wan, T., (2012). Design of a hexapod robot. In IEEE International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks - CECNet2012. Yichang, China.
- Long, J.M.J., 2007. "Biomimetic robotics: self-propelled physical models test hypotheses about the mechanics and evolution of swimming vertebrates". *J. Mechanical Engineering Science*, vol. 221.
- Panta, P.E.G., 2005. Monitoração de Robô de Inspeção Interna de Oleodutos – GIRINO. Ph.D. thesis, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Pizziolo, T. de A., 2002. Técnicas de Andadura para Robô Quadrúpede. Ph.D. thesis, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Schulz, D., Ceconi, T. M., Schulz, A; Batista C. R. V. and; Parucker, L. Y M. B. B. (2005). Legionnaire's disease: a review. *RBAC - Revista Brasileira de Análises Clínicas*, Vol. 37, No. 4, pp. 251-255.
- Siegwart, R. and Nourbakhsh, I.R., (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, Massachusetts.
- Zhang, J., Wang, J., Chen, W., and Chen, W., (2012). Virtual model optimization and locomotion control of bionic hexapod robot. In *IEEE Conference on Industrial Electronic and Applications – ICIEA2012*. pp.497 - 501.