



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GMI/17
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO –XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO- GMI

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO VISUAL DE CHAMINÉS E CALDEIRAS EM USINAS TERMELÉTRICAS

ORTIZ. C.A.L.*; FERREIRA, S.B.; JUNIOR, P.V.F.D.C.; PAULA, G.R.S.D.; BRANCO, H.W.C.; LUDOLF, M.D.A.E.A.

GT2 ENERGIA; GT2 ENERGIA; ENDESA FORTALEZA; PUC-RIO; GT2 ENERGIA; GT2 ENERGIA

RESUMO

Este informe técnico descreve um protótipo de um sistema robótico concebido para realizar inspeções no interior de caldeiras aquatubulares de grande porte, presentes em Usinas Termelétricas. A função do robô é se deslocar na parede de tubos verticais para buscar possíveis falhas, trincas e defeitos. A inspeção é realizada com uma câmera de inspeção dotada de iluminação incorporada ao veículo. O sistema de inspeção é operado remotamente por rádio frequência por um profissional treinado.

PALAVRAS-CHAVE

Robô de Inspeção, Usina Termoelétricas, Automação, Robótica, HRSRG.

1.0 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de robôs de inspeção para usinas termoelétricas compreende um assunto novo, com poucas aplicações já desenvolvidas e encontradas através de revisão bibliográfica. Uma iniciativa de pesquisa mais incisiva que pode ser citada é apresentada em [1]. Trata-se de uma iniciativa de pesquisa europeia, envolvendo institutos tecnológicos suíços e a empresa Alstom [2], para construir robôs para diferentes propósitos de inspeção. Este trabalho vem sendo feito há nove anos e tem obtido bons resultados, como os robôs *Magnebike* [3], *Aircrawler* [4] e *TubeCrawler*, estes inspecionam áreas que utilizam vapor em alta pressão, espaço entre rotor e estator do gerador e interior de tubulações pelas quais passa água, no interior de caldeiras e *boilers*.

A questão da adesão do robô à superfície inspecionada trata das pesquisas para desenvolvimento de tecnologia que permitam a um dispositivo robótico estar sempre próximo à superfície a ser observada, independentemente do tipo de estrutura. A adesão pode ser atingida de diversas maneiras, mas nesse caso a magnética acaba prevalecendo pelo simples fato de grande parte das estruturas industriais serem ferromagnéticas.

A questão de locomoção trata das pesquisas para o desenvolvimento de estruturas mecânicas, sejam chassis ou sistemas de tração, de forma a permitir ao robô total maleabilidade para melhor se posicionar, vencer quaisquer obstáculos presentes no caminho até seu destino de inspeção. Essa maleabilidade pode se refletir em um conceito de desenvolvimento modular, com múltiplos graus de liberdade, que permitem a realização do monitoramento e a adaptação do formato do robô de acordo com o espaço disponível no ambiente inspecionado.

A questão de localização trata da melhor maneira o posicionamento do dispositivo robótico dentro do ambiente de inspeção. Isso é importante, para realizar a identificação de problemas de forma precisa, além de permitir (em futuras evoluções de pesquisas) dividir o ambiente a ser inspecionado por múltiplos robôs, o que tornaria a inspeção muito mais rápida e consistente.

(*) Av. das Américas, n° 500 – sala 201 - Bloco 15 – CEP 22640-100 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 3203-0565 – Fax: (+55 21) 3203-0564 – Email: carlos.ortiz@gt2.com.br

Por fim, as pesquisas para integração de sistemas tratam da questão de como colocar, no mesmo chassi e de forma compacta, sensores para melhorar o desempenho do robô, sensores para realização da inspeção, atuadores, eletrônicas embarcadas de controle, fios condutores de alimentação, entre outros sistemas. Por si só, este tema pode ser o elemento de inviabilização de um projeto de desenvolvimento, pois há a dificuldade em dimensionar a estrutura para comportar todos os sistemas necessários à inspeção e ao mesmo tempo torna-la funcional.

Uma segunda linha de pesquisa trata do desenvolvimento de um “robô alpinista”, com rodas magnéticas, para inspecionar tubulações de boilers em plantas de geração movidas por combustíveis fósseis [5]. Este dispositivo é mais simples do que o desenvolvido pela Alstom *Inspection Robotics* e consiste em uma base estrutura para transportar um sensor de detecção de fuga de fluxo magnético. Ele possui alguma capacidade de manobra, mas se desloca sobre as tubulações, aproveitando a anatomia destas.

Outra pesquisa, semelhante ao robô *TubeCAT*, trata do desenvolvimento de dois dispositivos que diagnosticam falhas em tubulações de boilers de grande diâmetro. Neste dispositivo, o sensor de inspeção é um transdutor acústico eletromagnético (EMAT¹). Os resultados deste trabalho estão relatados em [6].

2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

Os primeiros passos para o desenvolvimento desse projeto compreenderam a revisão do estado da técnica com a finalidade de obter uma base teórica e tecnológica, em aplicações semelhantes que pudessem servir de orientação à definição do tipo de robô a ser utilizado. Todos os protótipos desenvolvidos foram primeiramente produto de *brain storm* realizado pela equipe de projeto, que foi validada e modelada computacionalmente com ajuda de softwares como SolidWorks para melhor entendimento da solução proposta. A seguir são apresentados os sistemas básicos do desenvolvimento do robô:

2.1 Sistema de Locomoção

A locomoção de um sistema robótico pode-se dar por meio de sistemas de rolagem e por sistemas bípedes, os mesmos têm comportamentos diferenciados mobilidade e complexidade de controle (Tabela).

Robôs que apresentam sistema de locomoção por rodas são velozes, leves e de fácil controle, adaptando facilmente sua estrutura às superfícies curvas. Em situações em que as rodas podem chegar a ficar presas em quinas, ou ter problemas de transição entre superfícies, é de grande utilidade nesses casos a utilização de sistemas composto por rodas-esteiras. Outro tipo de sistema de rolagem é composto por um sistema híbrido roda-perna, no qual podem-se gerar grandes forças de adesão e superfícies planas e curvas.

Robôs que apresentam sistema de locomoção por pernas, apresentam configurações de duas ou mais pernas para criar uma base de sustentação. Cada perna por sua vez apresenta mais de um grau de liberdade o que permite diferentes configurações, conseguindo assim uma grande gama de movimentos possíveis. Devido à alta complexidade no controle de locomoção e a baixa velocidade em que operam este tipo de robôs, apresentam-se inviáveis para necessidade proposta.

Tabela 1. Desempenho Sistemas de Locomoção

Tipo de Robô	Mobilidade	Complexidade no Controle
Rodas	Média	Baixa
Rodas-Esteira	Baixa	Baixa
Pernas	Média	Alta
Pernas-Rodas	Alta	Média

É uma prática de boa engenharia que o desenvolvimento de um robô móvel tenha um alto grau de mobilidade acompanhado de uma complexidade baixa no desenvolvimento do controle, assim é possível ver que uma condição é dependente da outra, logo será necessário ser assertivo na escolha do melhor sistema de locomoção segundo o ambiente de trabalho do mesmo.

¹ EMAT: *electromagnetic acoustic transducer*, ou transdutor acústico eletromagnético.

2.2 Sistema de Adesão

A adesão de um sistema à superfície de locomoção é a condição suficiente e necessária para distinguir a escalada da mobilidade comum de um carro por exemplo. A garantia de adesão de um sistema com a superfície que se deseja escalar, pode-se resumir ao aumento da força normal de contato entre o robô e a superfície, implicando no aumento da força de atrito e tração.

Podem ser classificadas em:

a. Princípio Físico: É necessário gerar uma força de adesão (mecânica, imã permanente, dentre outros). A adesão mecânica de um robô pode ser dividida em sustentação por forma e sustentação por atrito. A sustentação por forma, por sua vez é dividida em: fixação por apoio em elementos e fixação por penetração. A sustentação por atrito é dividida em fixação por aperto e fixação por expansão.

Imãs permanentes são usados na maioria de robôs com adesão ferromagnética; isto devido a que podem ser até 10 vezes mais fortes que um eletroímã, serem mais baratos e não precisarem do fornecimento de energia para o seu funcionamento. Os mais encontrados no mercado são ligas de Neodímio (NdFeB).

b. Princípio Energético: É dependente de uma fonte de energia capaz de gerar a força de atração entre os dois corpos (seja ela passiva ou ativa). Os sistemas com princípio energético ativo dependem grandemente do consumo de energia, critério que os faz inviáveis em aplicações de alto risco, devido a que não é permitida a falta de fornecimento de energia por qualquer falha, assim optasse pela utilização de sistemas com princípio energético passivo (imãs permanentes) que tem dependência do fornecimento de energia, fazendo-os por sua vez mais seguros.



2.3 Tipos de transição



O ambiente de trabalho do robô é formado por cortinas verticais de tubos aletados, sobre os quais se encontra normalmente depositada uma camada de material particulado formado por óxido de ferro, e paredes lisas da caldeira de recuperação de calor (do inglês HRSG), sendo ambas as estruturas formadas de materiais ferromagnéticos. A função principal do robô é de se deslocar verticalmente ao longo dos tubos para buscar possíveis falhas, trincas e defeitos. Ocorre, no entanto, que as superfícies de inspeção, formadas pelas cortinas de tubos e pelas paredes, são repletas de estruturas que se transformam em obstáculos para o trânsito do robô, tais como barras anti-vibração, sensores, anteparas e outras estruturas ali presentes.

No presente projeto é necessário levar em consideração que durante o percurso da inspeção será possível encontrar obstáculos de diferentes tipos, a seguir serão citados os mais comuns, visualizados de melhor forma na Tabela 2:

- a. Transição de plano;
- b. Sistemas anti vibração;
- c. Tubos deformados;
- d. Sistemas de fixação;
- e. Sensores
- f. Etc.

Tabela 2. Tipos de Transição

	
Sistemas de fixação	Sensores

	
Transição de Plano	Sistemas anti vibração e Tubos deformados

Na Tabela 2, quatro situações muito comuns que são encontradas nos sistemas de HRSG, o primeiro, Sistema de fixação é necessário para garantir a união das camadas de isolamento térmico da caldeira de recuperação de calor; sensores para medição de temperatura também estão presentes nesse tipo de sistemas; a transição entre planos é de grande importância devido a que um dos requisitos é o acesso do robô ao ambiente de inspeção sem apoio local dos inspetores; os sistemas anti vibração e tubos deformados, são as maior dificuldades que se apresentam quando o robô está se locomovendo no interior da caldeira.

3.0 - RESULTADOS

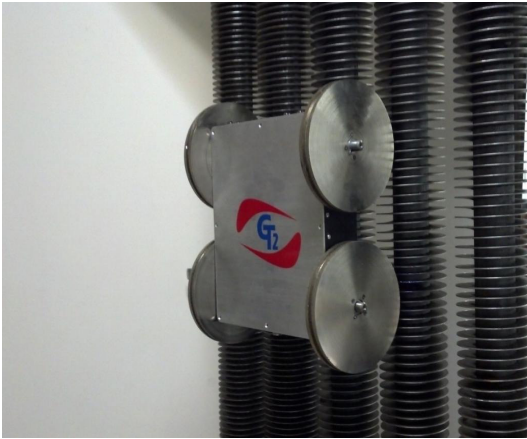

Os resultados que são apresentados a seguir, foram parte do processo de projeto e desenvolvimento de um protótipo de robô de inspeção de caldeiras termelétricas. O mesmo sofreu diferentes mudanças devido aos testes realizados que indicaram algumas falências. Dessa forma cada novo protótipo se preocupou sempre por melhorar a versão anterior e otimizar.

3.1 Estrutura

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível visualizar um chassi protótipo usinado em plástico de engenharia UHMW, que possui boas características mecânicas associadas ao baixo peso específico, sendo ainda adequado à fabricação de protótipos por ser de rápida usinagem e mais barato que o alumínio, que vinha sendo utilizado nos protótipos anteriores.

Deu-se início também aos testes de iluminação. Foram verificadas duas abordagens para estes sistemas. Uma delas é a utilização de LEDs de alta potência e outra, a qual é apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, consiste em utilizar diversos LEDs de menor potência associados em circuitos seriados ou paralelos, proporcionando uma visualização mais distribuída. O sistema de iluminação é acionado por um controlador PWM Wasp, que permite acionar e regular a intensidade do sistema de iluminação a través do sistema de controle central.

Tabela 3. Protótipo Funcional

	
Sistemas de fixação	Sensores

3.2 Sistema de Comunicação

A transmissão de dados e imagens entre o robô e a base de operação; composta por uma maleta industrial dotada de *sticks* de controle e um display LCD de 7 polegadas (Figura 1), se dá por rádio frequência. O sistema de transmissão de vídeo opera em 5.8 GHz enquanto o sistema de transmissão de dados opera em 2.4 GHz, assim pode-se evitar problemas de interferência harmônico, e de uso livre no país conforme regulamentação da Anatel.

A estação de controle, assim como o robô, opera acionada por baterias de Lítio polímero de 11.1V e 2.5 Ah, que garantem baixo peso, alta autonomia e alta capacidade de recarga. O sistema foi ainda desenvolvido para utilizar a mesma bateria na estação de controle e no robô, facilitando assim a manutenção e a compra de baterias sobressalentes para o sistema Figura 1.



Figura 1. Estação de Controle

4.0 - CONCLUSÃO

Após a definição da concepção do sistema, foi iniciado o desenvolvimento do protótipo funcional aqui apresentado, sendo possível a validação do sistema de fixação magnética em bancada de teste.

Foram iniciados os testes do sistema de iluminação, no teste realizado foram utilizados Led's brancos de alta luminosidade associados em circuitos seriados e paralelos, proporcionando assim uma melhor distribuição da iluminação. A transmissão de dados e imagens por rádio frequência foi testada satisfatoriamente.

Durante a elaboração dos testes foi possível verificar que a estrutura apresenta algumas limitações para superpor obstáculos, elas são: a distância entre os eixos das rodas, por ser muito curta, reduzia o contato de uma das rodas quando a outra se encontrava superpondo um obstáculo, consequentemente a força de adesão necessária para suportar o peso da estrutura não era mais suficiente, fazendo com que o robô caísse; foi percebido também que os motores que estavam sendo utilizados não apresentavam força suficiente para tracionar adequadamente as rodas magnéticas.

Futuros testes devem corrigir os problemas apresentados pela estrutura, conseguindo realizar as tarefas solicitadas de mudança de plano, superposição de obstáculos e evitar comprometer a estrutura dos tubos aletados; para isto a equipe se propôs a realizar mudanças drásticas na estrutura que incluem a modificação do chassi, o aumento de potência nos motores para garantir o deslocamento, modificação nas rodas para evitar que por deslizamento consigam danificar as aletas dos tubos. O sistema também precisa de uma redução drástica no peso, isto porque a atual estrutura apresenta 18 Kg, dificultando seu transporte, mudança de plano e transposição de obstáculos.

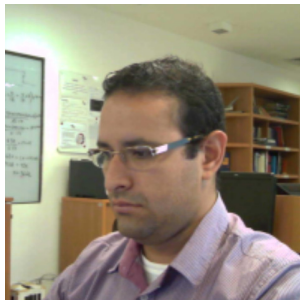
5.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a usina UTE Norte Fluminense, que, através de seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento, no âmbito da Lei 9.991/2000, da ANEEL, proveu o patrocínio necessário para o desenvolvimento e a execução do projeto.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAPRARI, G. et al. Highly Compact Robots for Inspection of Power Plants. **Proceedings of the 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry**, 5-7 Outubro 2010. 1-6.
2. ALSTOM INSPECTION ROBOTICS. ALSTOM Inspection Robotics. Disponível em: <<http://www.inspection-robotics.com/site/index.cfm>>. Acesso em: 20 Outubro 2014.
3. TÂCHE, F. et al. Magnebike: A Magnetic Wheeled Robot with High Mobility for Inspecting Complex-Shaped Structures. **Journal of Field Robotics** **26(5)**, p. 453-476, 2009.
4. FISCHER, W. et al. Robotic Crawler for Inspecting Generators with Very Narrow Air Gaps. **Proceedings of the 5th IEEE Conference on Mechatronics (ICM)**, 2009.
5. XUEQIN, L. et al. The design of an inspection robot for boiler tubes inspection. **Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligences**, 2009. 313-317.
6. PARK, S.; JEONG, H. D.; LIM, Z. S. Development of Mobile Robot Systems for Automatic Diagnosis of Boiler Tubes in Fossil Power Plants and Large Size Pipelines. **Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot Systems**, Outubro 2002. 1880-1885.
7. CAPRARI, G. et al. **Highly Compact Robots for Inspection of Power Plants**. Proceedings of the 1st International Conference on Applied Robotics for Power Industry. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 1-6.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nome: Carlos Alirio Lozano Ortiz

Local e Ano de Nascimento: Colômbia / 1985

Local e Ano de Graduação / Pós Graduação: (Graduação) Colômbia / 2008; (Mestrado) Rio de Janeiro – Brasil / 2010; (Doutorado) Rio de Janeiro – Brasil / em andamento.

Experiência Profissional: Atualmente é Engenheiro de Projeto na GT2 Energia atuando nas áreas de robótica, controle e diagnóstico de falhas de turbo-máquinas. E é estudante de Doutorado do Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ. **Publicações:** Rov For Pluvial Water Applications in: CONEM 2014; Estudo Da Estrutura De Um Robô Para Inspeção De Linhas De Transmissão In: VII CONEM 2012; Human Gait Classification after Lower Limb Fracture using Artificial Neural Networks and Principal Component Analysis In: 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS; Utilização De Redes Neurais Artificiais Feed Forward Ou Probabilística Na Classificação De Marcha Humana Em Pacientes Com Fratura De Membro Inferior In: CBEB 2009; **Áreas de Atuação:** Tem interesse em Projeto de Máquinas, Robôs autônomos submersíveis, Análise de Falhas em projetos, Processamento de sinais, Redes Neurais Artificiais, Análise de Componentes Principais.