

Robô Móvel Aplicado à Inspeção em Linhas de Transmissão

A. G. Ventrella, CTEEP; L. A. Moscato, EPUSP; A. de Souza, EPUSP; M.F. dos Santos, EPUSP; W.B. Vital Filho, EPUSP; G. A. N. Ferreira, EPUSP¹.

RESUMO

A inspeção em linhas de transmissão de alta tensão é uma tarefa que depende a habilidade de um técnico para visualizar as falhas que possam ocorrer. Neste trabalho, é proposto o desenvolvimento de um robô móvel que se desloca ao longo do cabo guarda e é capaz de auxiliar o técnico na visualização e, futuramente, na sua correção. Este robô pode ser a ferramenta capaz de automatizar o procedimento de inspeção em linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Robôs móveis, inspeção de linhas de transmissão, inspeção visual, visão artificial.

I. INTRODUÇÃO

Novas abordagens estão sendo pesquisadas em todo mundo para automatizar o processo de inspeção e manutenção em linhas de transmissão e os principais avanços incluem a identificação e mapeamento dos locais onde pode existir falhas em cabos através de equipamentos de GPS (Sistema de Posicionamento Global), utilização de câmeras sofisticadas para visualizar imagens, utilização de sensores e equipamentos de aquisição de dados, processamento através de software dos dados obtidos dos sensores e imagens e identificação dos locais e, por fim, a aplicação de robôs [1]. É também conhecido o interesse das empresas de distribuição em adquirir um sistema capaz de realizar a inspeção remota das linhas de transmissão, principalmente em locais de difícil acesso.

Foram encontrados diversos trabalhos na literatura sobre o tema em questão entre os quais pode-se destacar o de Sawada [2], onde é desenvolvido um robô móvel para inspeção que se desloca nos cabos guarda das linhas de transmissão e que, verifica a integridade do cabo através da utilização de corrente eddy; este robô ainda possui um sistema de transposição de torres, proporcionando autonomia ao sistema; e o de Campos [3], onde é desenvolvido um robô capaz de realizar a instalação e remoção semi-automática das esferas sinalizadoras. Outros trabalhos referentes ao tema podem ser encontrados em [4], [5], [6] e [7]. que podem ser citados são: Nakashima et. al., 1995; Yano et. al., 1995; Santamaria et. al., 1997; Peungsungwal et. al., 2000.

O presente projeto tem por objetivo o desenvolvimento de tecnologia de inspeção de linhas aéreas de transmissão de energia pelo uso de equipamentos robóticos. Nesta linha de atividades de pesquisa visa-se o desenvolvimento de cunho tecnológico de equipamentos robóticos móveis que, associados a visão artificial, permitam o reconhecimento visual de peças e ou imagens para aplicações em diversas atividades que incluem a inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica. Dentre as atividades que são geradoras de tecnologia no setor enquadra-se as de desenvolvimento de um sistema robótico de serviços em linhas de transmissão, que deve ser acoplado mecanicamente aos cabos guarda. O sistema denominado SSL (Sistema de Serviço em Linhas de Transmissão), vislumbra possibilitar as seguintes operações:

- Inspeção detalhada no cabo guarda com ou sem fibra óptica, visualizando a integridade física e mecânica quanto aos defeitos e descargas atmosféricas, comprovando a necessidade ou não da manutenção ser de emergência ou programada;
- Inspeção visual dos cabos condutores, espaçadores, isoladores de porcelana ou de vidro, torres, vegetação sobre a linha, inclusive assoreamento na base da torre;
- Instalação ou retirada de esferas de sinalização aérea no cabo guarda com a linha de transmissão ligada;
- Conduzir o cabo guia (piloto) com a linha de transmissão ligada ou desligada;
- Realização de serviços de emenda de cabo guarda com ou sem fibra óptica;
- Transposição de torres, permitindo o deslocamento do SSL ao longo da linha de transmissão.

O presente projeto possui uma sistemática incremental de desenvolvimento metodológico com as seguintes etapas, ciclicamente implementadas:

- Processo de síntese: visão geral e especificação do projeto
- Processo de análise: divisão em sub-sistemas;
- Sistema mecânico;
- Sistema eletrônico e arquitetura de controle;
- Sistema de comunicação;
- Sistema de visualização
- Construção de protótipos;
- Testes

¹ O Grupo agradece ao apoio técnico e financeiro da CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) e ao FDTE (Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia).

A seguir tem-se um detalhamento sobre cada uma das fases de desenvolvimento deste projeto.

II. PROCESSO DE SÍNTESE

O processo de síntese inclui a formação de uma visão geral do projeto e da especificação detalhada dos requisitos. Estes objetivos foram atingidos através de uma série de reuniões técnicas e de interação entre os membros da CTEEP, da FDTE/POLI-USP e de uma sistemática pesquisa bibliográfica de caráter amplo sobre os assuntos robôs de inspeção de linhas de transmissão, sistemas de inspeção visual por câmeras e mecanismos de manutenção robotizada. Além de fixar como filosofia, principalmente para desenvolvimento do robô-protótipo, a incorporação dos principais avanços tecnológicos encontrados no mercado nacional e internacional relacionados ao tema.

Como resultado deste processo de síntese encontra-se a revisão bibliográfica e a formação de um conceito de robô para inspeção em linhas de transmissão.

Para formação do conceito do robô para inspeção de linhas de transmissão foram relatadas as seguintes atribuições para o robô:

- Deslocar ao longo do cabo guarda (não condutor) com os comandos de avanço, retorno e parada implementados em seu sistema de controle;
- Visualizar, com nitidez, o próprio cabo guarda, através de uma câmera fixa, o cabo condutor, separadores e torres, através de uma câmera móvel (movimentos de pan-tilt);
- Transportar os grampos de sustentação dos cabos guarda;
- As imagens geradas no robô são transmitidas (via rádio) a uma base de operação em solo, onde um operador avalia os cabos através do monitor de um notebook. O notebook é também responsável pela recepção de dados de sensores e para o envio de comandos ao robô. Foi estabelecido como especificação para o alcance dos rádios uma distância de 1.000m;
- Os demais aspectos estudados seriam a instalação ou retirada de esferas de sinalização aérea no cabo guarda, a condução do cabo guia (piloto) pelo robô e a realização de serviços de emenda de cabo guarda com ou sem fibra óptica.

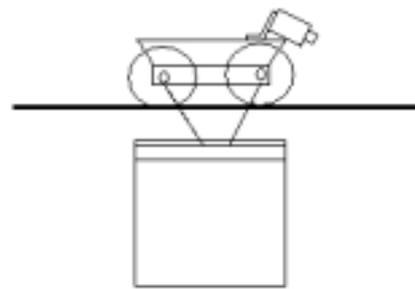
III. PROCESSO DE ANÁLISE

No processo de análise foi feita uma divisão do projeto do protótipo e dos estudos de forma modularizada, proporcionando o desenvolvimento, em paralelo, de cada uma destas divisões ou sub-sistemas: sistema mecânico, sistema eletrônico e arquitetura de controle, sistema de comunicação, sistema de visualização e, por fim, o estudo do sistema de colocação e retirada das esferas, da condução de cabo guia e da realização de serviços de emenda de cabo.

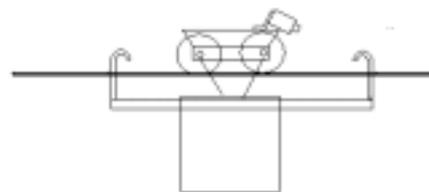
A. Sistema mecânico

No desenvolvimento do sistema mecânico, inicialmente fez-se um estudo da influência do efeito do vento sobre o robô, quando este estiver se deslocando no cabo guarda, baseado nestes estudos foi elaborado um conceito da forma mais conveniente para o robô. A partir deste instante foi possível dimensionar o sistema de locomoção e estudar e projetar um sistema para transposição de torres.

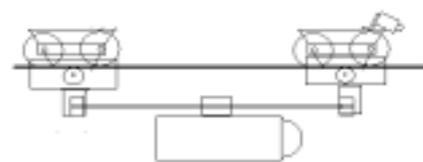
No desenvolvimento do projeto além da concepção das arquiteturas mecânicas, foram desenvolvidos modelos de sólidos em software de computação gráfica, onde foi implementado e testado o protótipo virtual do mesmo. Após este procedimento, foram desenvolvidas maquetes. O sistema mecânico necessitou de implementações reais para serem testadas e modificadas de maneira incremental para melhorar seu desempenho. A Figura 1 permite que se tenha uma noção visual das configurações mecânicas desenvolvidas e implementadas em protótipo.



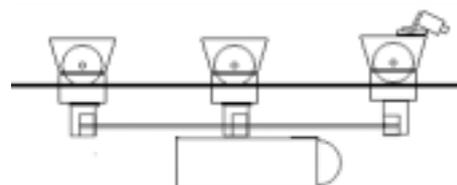
a) Arquitetura simplificada



b) Arquitetura com garras que se fixam ao cabo



c) Arquitetura com dois conjuntos para locomoção



d) Arquitetura com 3 conjuntos de rodas para locomoção

FIGURA 1. Configurações da arquitetura mecânica do robô.

No desenvolvimento do sistema mecânico foi sempre considerada a possibilidade da transposição de torres, o que resultou em uma série de experimentos até que fosse encontrado o melhor mecanismo para realização desta tarefa difícil que é a transposição de um obstáculo. Um resultado deste estudo pode ser verificado em detalhes na Figura 2.



FIGURA 2. Uma configuração de mecanismo para transposição de torres (robô com 3 rodas).

B. Sistema eletrônico e arquitetura de controle

No desenvolvimento do sistema eletrônico e da arquitetura de controle foram desenvolvidas e implementadas 2 arquiteturas.

Na arquitetura da Figura 3, existem 2 pares rádios, 1 para transmissão de imagens e outro para comandos através das portas seriais do notebook e do pc104.

Nota-se que foi incorporada estratégias de controle baseada na utilização de microprocessadores entre eles um computador industrial com barramento PC-104 que possui como finalidade comandar todas as funções pré-determinadas e possibilitando flexibilidade na expansão das funções que poderão ser agregadas futuramente.

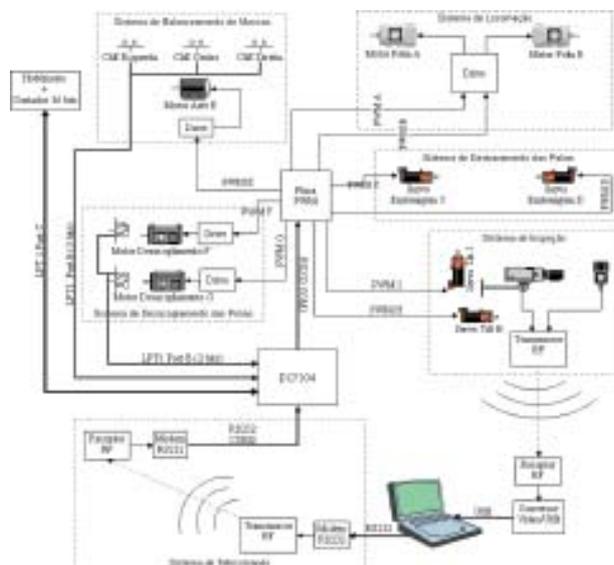


FIGURA 3. Sistema eletrônico e arquitetura de controle

No entanto, esta arquitetura de comunicação e de controle foi modificada, sendo que, na nova configuração, Figura 4, é utilizado apenas um único par de rádios, conectados a porta ethernet do notebook e a um hub que passou a existir no robô. A nova arquitetura alterou a configuração dos componentes existentes dentro do robô, sendo que ao hub também foram conectados o pc104 e 2 câmeras IP (sendo uma delas PTZ). Entre o pc104 e os acionadores e sensores nada foi alterado. Desta forma, permite que um único rádio seja utilizado para controlar o robô e receber imagem captadas pelas câmeras.

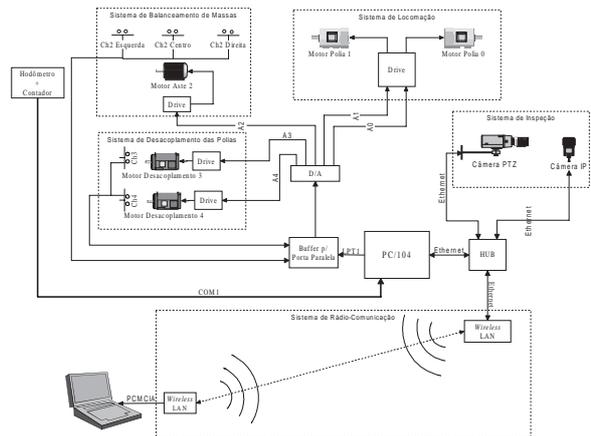


FIGURA 4 – Segunda arquitetura de controle

A Figura 5 mostra, de forma mais detalhada, o drive de acionamento utilizado neste projeto. Este circuito baseia-se em uma ponte de transistores MOSFETs, os quais são utilizados de forma conjunta a circuitos integrados do tipo gate drives (IR2104 ou similares). Onde, através dos gate drives é possível transformar as informações de largura de pulso do sinal PWM em informações de intensidade e sentido de rotação para os motores.

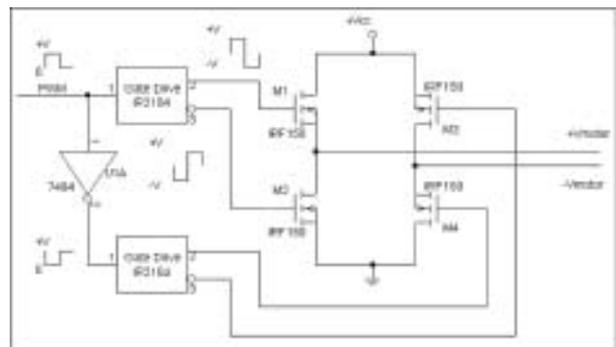


Figura 5 – Circuito de acionamento dos motores.

De forma simplificada, o circuito integrado IR2104 transforma um sinal PWM, que consiste de pulsos periódicos de níveis de tensão 0 e +V e largura variável, em um sinal de mesma forma porém com níveis de tensão -V e +V. Assim, um sinal PWM de 50% de duty cycle corresponde

a um nível de tensão média de 0V nos terminais de saída para o motor (+Vmotor e -Vmotor). Aumentando-se o duty cycle do sinal PWM tem-se um correspondente aumento do nível de tensão média de saída até o limite de +Vcc. Em contrapartida, a diminuição do duty cycle do sinal PWM resultará em um decréscimo gradual do nível de tensão média de saída até o limite de -Vcc.

Através da configuração apresentada pelo circuito da Figura 5 é possível obter-se duas informações (intensidade e sentido de rotação do motor) através de um único sinal PWM. Além desta placa para acionamento dos motores, também foi desenvolvido um conversor dc-dc, que permite ligar o pc104 diretamente em uma bateria de 12V. O que possibilita o embarque no robô.

C. Sistema de comunicação

Conforme a arquitetura controle, há um sistema de comunicação diferente. Na arquitetura de controle mostrada na Figura 3, existe um rádio conectado a porta USB do computador (notebook) em solo que recebe as imagens geradas pelas câmeras presentes no robô, assim como a recepção de dados de sensores (transmitido por um outro canal disponível), já um outro rádio é conectado a porta serial do computador (notebook) em solo para realizar o envio de comandos. Nos rádios existentes no robô, um está diretamente ligado às câmeras e outro conectado ao PC104.

Na arquitetura de controle proposta mostrada na Figura 4, existe um único par de rádios para se fazer o tráfego das imagens das câmeras e da recepção de dados de sensores e envio de comandos. A comunicação entre o robô e a base de operações em solo é realizada através do protocolo TCP/IP, já que os rádios formam uma rede local, onde o notebook em solo é comanda o robô/pc104. Assim, foram utilizados um único par de rádios de comunicação para envio de comandos, para receber dados dos sensores e receber as imagens geradas pelas câmeras. Com o objetivo de aumentar o alcance do rádio foram incorporadas ao protótipo antenas capazes de amplificar estes sinais. No robô foi instalada uma antena de 6dB e na base de operações uma antena de 18dB. Nos experimentos realizados em laboratório com a utilização de atenuadores foi possível estimar o alcance dos rádios em 5Km, considerando a composição com as antenas adquiridas.

D. Sistema de visualização

Neste item será abordado apenas o sistema de visualização composto por duas câmeras IP, uma fixa e outra móvel, com movimentos de tilt, pan e zoom de 16 vezes.

Câmera Fixa

O primeiro subsistema é composto pela câmera fixa IP. Esta câmera será destinada ao monitoramento exclusi-

vo do cabo guarda, focalizando-o permanentemente. A observação deste cabo tem como objetivo a identificação e localização de eventuais defeitos, que deverão ser reportados para posterior correção. As imagens capturadas por esta câmera de inspeção serão transmitidas a um operador em solo por meio da LAN.

Câmera Móvel

O segundo subsistema será composto pela câmera de alta resolução com pan-tilt e zoom e pela interface wireless LAN. Este sistema destina-se à inspeção dos separadores existentes entre os cabos condutores de energia. O mecanismo de tilt-pan, interno à câmera, consiste em dois servo-motores que fornecem à mesma mobilidade em dois eixos perpendiculares. Além deste mecanismo de movimentação, a câmera é dotada de recurso de zoom digital, provendo ao sistema a capacidade de visualizar grande parte do espaço.

A transmissão de dados será feita por meio de rede local sem fio, realizada entre o robô e o microcomputador portátil (dotado de igual interface wireless). Diferentemente do primeiro subsistema, aqui a comunicação é bidirecional, pois, além de enviar os sinais de vídeo ao operador, a câmera também deverá receber sinais de comando para a movimentação do mecanismo de tilt-pan e para utilização do zoom.

O objetivo principal deste segundo sistema de vídeo consiste na observação dos separadores existentes entre os cabos condutores, onde está a maior incidência de defeitos – não se descarta, no entanto, a utilização desta câmera para observação dos próprios cabos condutores. A necessidade de um grande campo de visualização se justifica pela distância existente entre o cabo guarda (através do qual o robô se movimenta) e os cabos condutores.

Sistema de Solo

Conforme mencionado, as imagens recebidas obtidas por ambas as câmeras serão recebidas pelo microcomputador através das respectivas interfaces, sendo analisadas em tempo real pelo operador. A função do operador, que continuamente observa as imagens capturadas, consiste em determinar a posição de eventuais defeitos e solicitar as correspondentes operações de reparação dos cabos e/ou dos separadores.

IV. PROTÓTIPO E TESTES

Com o desenvolvimento do sistema mecânico, sistema eletrônico e da arquitetura de controle, do sistema de comunicação e do sistema de visualização, o protótipo do robô foi montado e os testes efetuados em um campo de testes construídos em laboratório.

A Figura 6, traz uma foto do protótipo do robô de inspeção de linhas de transmissão.



FIGURA 6. Foto do robô de inspeção de linhas de transmissão.

Na Foto apresentada na Figura 6, o robô de inspeção de linhas de transmissão está deslocando-se ao longo de um cabo instalado no Laboratório de Robôs Especiais do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da USP. O robô fotografado possui 3 rodas como sistema de tração, que basculam no momento em que for iniciado o procedimento de ultrapassagem de torres, abaixo deste sistema de locomoção existe um fuso que é responsável pelo balanceamento das massas, também durante o procedimento de transposição de torres e as duas câmeras se localizam, uma acima da primeira roda (à direita da foto) e outra fixada a caixa. Na foto da Figura 7, mostra-se com detalhes a câmera PTZ (Pan-Tilt-Zoom) fixada a caixa inferior e responsável por realizar a movimentação nas direções pan e tilt.



FIGURA 7 – Foto com detalhes da caixa onde está fixada a câmera PTZ.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de A. Arruda, A. L. Cintra, M.F. Pereira e Olga Maffei.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rubin, Lew, 2000. "The future of power line inspection". *Electrical World T&D* September/October.
- [2] Sawada, J.; Kusumoto, K.; Maikawa, Y.; Munakata, T. and Ishikawa, Y., 1991, "A mobile robot for inspection of power transmission lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, pp 309-315, Jan.
- [3] Campos, M. F. M.; Pereira, G. A. S.; Vale, S. R. C.; Bracarense, A. Q.; Oliveira, M. P. and Pinheiro, G. A., 2002. "A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines". In *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, IEEE Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, 2002, 3559-3564.
- [4] Nakashima, M.; Yano, K.; Maruyama, Y.; Yakabe, H., 1995 "A hot line work robot system "Phase II" and its human-robot interface "MOS" ". *Proceedings of the IEEE/R SJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.2, pp. 116-123.
- [5] Yano, K.; Maruyama, Y.; Morita, K.; Nakashima, M. 1995. "Development of the semi-automatic hot line work robot system "Phase II"". *Proceedings of the 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance*, pp. 212-218.
- [6] Santamaria, A.; Aracil, R.; Tuduri, A.; Martinez, P.; Val, F.; Penin, L. F.; Ferre, M.; Pinto, E.; Barrientos, A. 1997. "Teleoperated robots for live power lines maintenance (ROBTET)". *Proceedings of the 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1: Contributions*, vol. 3.
- [7] Peungsungwal, S.; Pungsiri, B.; Chammongthai, K.; Okuda, M., 2001. "Autonomous robot for a power transmission line inspection". *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 121-124.