Robô para monitoramento de pontos quentes por meio de câmeras infravermelho em subestações de energia elétrica

M.B. Perotoni[3], W.B.Vidal Fo.[2]; M.Masuda[1],M. V. Garbelotti, TBE; J. A. Jardini[1]; L.C.Magrini[1]; J.K.C. Pinto[3], EPUSP/PEA/GAGTD[1], EPUSP/MECATRÔNICA[2],EPUSP/LME[3]

Resumo **– Este artigo descreve o projeto e desenvolvimento de um sistema de monitoramento automático de pontos quentes dentro de subestações de energia elétrica. O mesmo utiliza uma câmera infravermelho montada em um robô que se locomove ao longo de um cabo de aço em uma subestação. O robô é controlado remotamente por um sistema de comunicação sem fio, na faixa de 2,45GHz (WiFi). Durante o movimento do robô a câmera é dinamicamente apontada para os diferentes equipamentos por meio de um sistema pan-tilt comercial, adaptado às nossas necessidades. Toda a estrutura é comandada por um programa residente em um PC localizado a uma distância de aproximadamente 1km do robô. Este software automatiza os movimentos do robô, do pan-tilt, assim como a aquisição e análise das imagens termográficas, para detecção de temperaturas acima de um limite pré-fixado.**

Palavras-chave **– Termografia, robótica, controle sem fio (*wireless*).**

I. INTRODUÇÃO

A utilização de câmeras de infravermelho na detecção de pontos críticos em equipamentos instalados em subestações de energia elétrica, é uma prática já consagrada na rotina de manutenção[1] e instalação de novos equipamentos.

Em subestações de EHV, que tratam com a rede básica, a confiabilidade exigida é muito maior, razão pela qual motivou o desenvolvimento de um sistema que proporcionasse o deslocamento automático da câmera de infravermelho ao longo dessas instalações e a posicionasse de modo a poder captar uma imagem que enquadre os possíveis pontos críticos, em termos de temperatura, dos equipamentos de potência.

Dentre os critérios que nortearam o desenvolvimento desse protótipo, destacam-se a robustez do sistema,de modo a suportar as elevadas temperaturas da região no norte do país, elevado teor de umidade do ar, bem como ser autônomo de modo a não necessitar a presença de funcionário especializado no local, visto que a subestação alvo encontra-se no interior do Maranhão. Aplicações análogas foram já pesquisadas visando inspeções de linhas de transmissão com câmeras convencionais [2] e sensores baseados em corrente parasita [3]. Uma câmera termográfica em uma plataforma robótica foi aplicada a resgates em áreas atingidas por desastres naturais [4]. Em Campos et al [5] foi empregado um sistema robotizado na manutenção corretiva de linhas de transmissão, substituindo esferas de sinalização aéreas. Atividade esta também realizada em Ventrella et al [2], com a vantagem de transposição automática de torres.

Atualmente as pesquisas e aplicações robotizadas em nível nacional e internacional no setor elétrico não foram voltadas as inspeções em subestações e empregaram, na sua maioria, sistemas semi-autônomos. No presente caso a subestação objeto da automação se encontra em uma região de difícil acesso , dificuldade esta que justifica a robotização.

II. DESCRIÇÃO BÁSICA DO SISTEMA

Após análise de várias alternativas, que incluiu a utilização de trilhos para o deslocamento do robô, a solução que mostrou a melhor relação custo-benefício é a utilização de um cabo de aço suspenso pelo qual o robô se movimenta. As alternativas baseadas em trilhos mostraram-se de alto custo, embora tenham vantagens do ponto de vista de flexibilidade, dimensões e melhor suporte mecânico ao robô e equipamentos associados.

O fato de o robô estar suspenso, deixa o pátio da subestação livre para o trânsito dos veículos de manutenção, aliado ao fato que a câmera de infravermelho não pode ficar apontada para o sol, o que não deverá acontecer nessa situação pois ela estará acima da altura máxima dos pontos críticos a serem monitorados.

Pretende-se no futuro, aproveitar o próprio cabo guarda da subestação para movimentar o robô, bastando desenvolver-se um método para ultrapassar os grampos de suspensão desses cabos.

A fig.1 mostra um esquema do método de deslocamento do robô.

Estudou-se ainda a forma mais adequada de alimentação do conjunto composto pelo robô, câmera e demais acessórios. O uso de baterias mostrou-se inviável face a potência requerida, o que torna necessário a utilização de baterias sofisticadas de elevado custo ou de uma grande quantidade de baterias chumbo - ácidas, cujo peso tornaria o robô demasiadamente grande.

[1] M. V. Garbelotti (Gerente do Projeto) trabalha na TBE - Transmissoras Brasileiras de Energia (garbelotti@tbenergia.com.br)

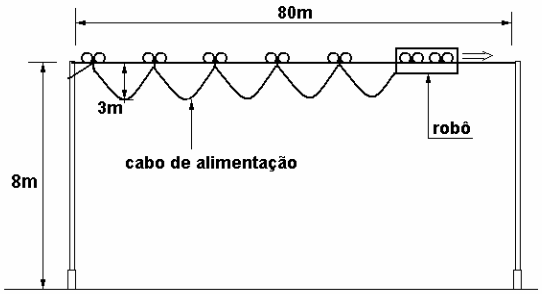
J. A. Jardini (Coordenador do Projeto) Prof. Dr. Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da USP (jardini@pea.usp.br)

J.K.Cunha Pinto, Professor Associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (jkcunhap@lme.usp.br)

M. Masuda (pesquisador), e L.C.Magrini (pesquisador) trabalham na EPUSP/PEA/GAGTD – Grupo de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia (masuda@lpea.usp.br, magrini@lme.usp.br)

M.B.Perotoni é pesquisador do LME/EPUSP (mpero@lme.usp.br)

W. B. Vidal Fo. (pesquisador) EPUSP/MECATRÔNICA (wbritto@usp.br)



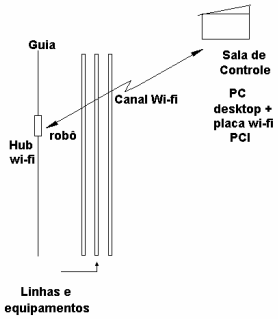


Figura 2 - Vista de topo do sistema, contendo os diferentes elementos constutuintes do projeto.

Figura 1 - Parte superior, esquema do sistema de propulsão do robô. Parte inferior, a foto do local de testes preliminares ainda sem o sem o pan tilt incorporado.

O robô movimenta-se tendo o referido cabo como guia, com duas polias (uma metálica e outra de poliuretano), sendo a polia poliureano responsável pelo tracionamento utilizando um motor elétrico alimentado por 12V no interior do robô. A polia de metálica é acoplada ao odômetro, com vistas a definição da posição exata do robô no cabo. O odômetro não colocado na polia motora para evitar a perda de posição caso ocorra deslizamento da roda. A polia metálica tem o objetivo de aterramento.Os equipamentos presentes são alimentados por meio de um cabo de alimentação flexível, deslizante no cabo de aço através de ilhoses metálicos. Dessa maneira, é transportada a tensão de alimentação de 220V de todo o sistema até o robô. Dentro do robô existe uma fonte DC chaveada de 300W, utilizada na alimentação de computadores, que converte a tensão AC nas tensões de alimentação dos demais equipamentos.

O motor do robô foi dimensionado de forma que ele consiga vencer flechas de até 6 m em 80m, ou seja, 15% de inclinação, arrastando consigo o peso representado pelo cabo de alimentação.

A fig.2 ilustra uma vista de topo do robô ao longo do guia e sua posição em relação à sala de controle. Nesta sala de controle estará localizado o PC desktop onde estará instalado o programa de controle. A comunicação entre o robô e a sala de controle se dá por meio de um sistema WiFi (IEEE802.11g) comercial, operando em 2,45GHz, capaz de suportar até 54MBPS.

III. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PRESENTES NO ROBÔ

Embora a inteligência propriamente dita do sistema esteja concentrada no computador da sala de controle, dentro do robô foram acondicionados vários equipamentos eletrônicos de controle e acionamento. Os diferentes equipamentos presentes no robô estão apresentados na fig.3.

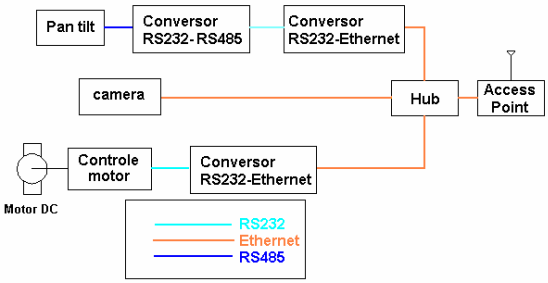


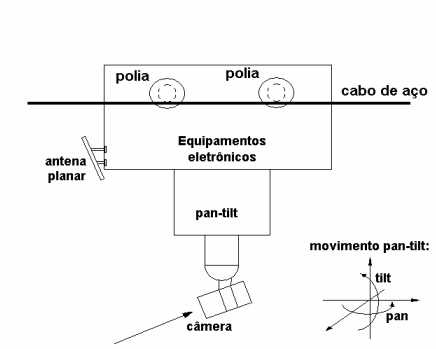
Figura 3 - Esquema lógico dos diferentes componentes que integram o robô.

Serão a seguir descritos sucintamente cada elemento consituinte do robô.

1. **Câmera Infravermelho**: Foi empregada uma câmera FLIR modelo A20 [6], com saída Ethernet, e alimentada com 12VDC, e foi instalado em seu corpo um CI LM35DZ, com objetivo de monitorar a temperatura do sistema ótico e corrigir a medida termográfica que está sendo efetuada. A lente utilizada é uma lente do tipo telescópico de 12mm, adequada para visualização dos equipamentos que estarão em média 50m distantes da câmera. O espectro da câmera cobre desde 7,5 à 13µm (infravermelho distante) e apresenta maior robustez contra interferências da radiação ambiente. O imageamento é realizado por meio de uma matriz de micro bolômetros não refrigerados, com dimensão de 160x120 (igual a aproximadamente 19.000 pontos de medida), o que define a resolução da imagem. O equipamento cobre um intervalo de temperatura de -20 à 250°C e possui saídas de vídeo (PAL/NTSC) ou digital (Ethernet 8bits). A saída de vídeo é obtida pela simples conexão de um monitor ao equi-

pamento, enquanto que a saída Ethernet possibilita que a câmera seja acessada por seu endereço IP a partir de qualquer navegador comum. Uma vez que a câmera opera em infravermelho, janelas de proteção de vidro comum bloqueiam o sinal, sendo assim opacas. Com a finalidade de proteção da câmera utilizou-se uma janela de Germânio transparente ao infravermelho, com 96% de transmissão. Em termos de precisão na medida de temperatura obtém-se aproximadamente ±2°C ao longo de todo espectro infravermelho.

2. **Motor DCdestinado ao movimento do robô**: Foi utilizado um motor DC acoplado a um redutor, ambos fabricado pela Bosch, alimentado por 12V, fornecendo torque teórico máximo 14Nm.
3. **Controlador do motor**: Trata-se de um circuito impresso montado com base em um microcontrolador do tipo PIC, que recebe sinais de comando RS232 e ajusta a velocidade por meio de uma modulação PWM, acionando os transistores de potência. É possível com o circuito, variar a velocidade e inverter o sentido de rotação. Este circuito é também é responsável pelo controle dos sinais provenientes do odômetro, acoplado a uma das polias que robô, cuja finalidade é definir precisamente a posição do robô ao longo do cabo. O odômetro possui um transdutor que converte os pulsos de uma roda dentada acoplada ao eixo da polia metálica em sinais elétricos, que indicam a velocidade e o sentido de rotação. Esses sinais, são enviados e interpretados por um microcontrolador.
4. **Conversor RS232-Ethernet** [7]: É utilizado para converter o protocolo serial em pacotes aptos a serem transmitidos pelo canal wireless. Ao conversor é atribuído um número IP, com o qual é estabelecida a conexão remota.
5. **Conversor RS232-485**: Utilizado para converter ambos os protocolos seriais.
6. **Pan tilt**: Utilizado para mover a câmera dentro de uma semi-esfera, com dois movimentos, denominados "pan" e "tilt". O sistema é controlado por meio de comandos enviados via interface RS485. Esses comandos indicam ao equipamento, no formato de uma palavra digital, os ângulos de pan e tilt que devem ser posicionados pelos motores de passo, bem como a velocidade com que esse movimento deva ser realizado. O intervalo de variação do movimento "pan" é de 360° (giro no eixo horizontal), enquanto que o movimento "tilt" tem variação de 180° no eixo vertical. A fig.4 ilustra o equipamento, juntamente com demais acessórios.



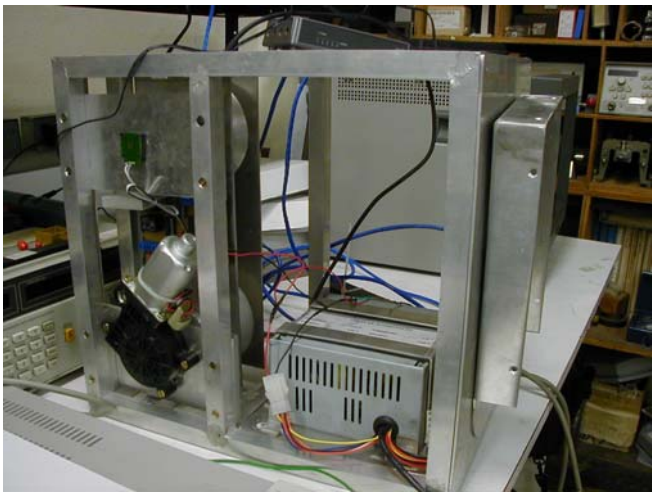


Fig. 4 Figura superior, esquema lógico dos diferentes componentes que integram o robô e figura inferior, etapa intermediária da montagem.

7. **Hub**: Tem a função de concentrar todos os sinais Ethernet oriundos dos equipamentos inteligentes que compõem o robô. É um modelo comercial de pequenas dimensões, de forma a ser inserido facilmente dentro do robô.
8. **Access Point**: Recebe os sinais do hub e transmite através do canal sem fio. Opera na freqüência de 2,45GHz (IEEE802.11g), e transmite uma potência de 10dBm.
9. **Antena Planar**: Com o objetivo de proporcionar uma boa cobertura do sinal com bom ganho e pequenas dimensões, além de boa resistência mecânica, foi projetada, montada e medida uma antena planar de microlinha para a utilização no robô. Antenas normalmente encontradas no comércio apresentavam alto custo e grandes dimensões, motivo pelo qual foi decidido pela antena planar. A antena construída apresenta pequenas dimensões e baixo custo, já que usa como substrato FR4 (constante dielétrica de aproximadamente 3,6), normalmente utilizado em circuitos impressos operando em baixas freqüências. Como antenas do tipo microlinha apresentam uma banda de operação estreita, e para a presente finalidade é necessária uma banda de aproximadamente 100MHz, foi idealizada uma solução tendo por base uma camada de ar intermediária entre o plano terra e o substrato dielétrico, capaz de aumentar a banda de operação. A alimentação se dá por meio de um cabo coaxial SMA padrão. A fig. 5 apresenta a comparação entre a resposta relativa à perda de retorno (S11) simulada [8] e medida, com um Analisador de Redes

HP8510, e a fig.6 uma foto do protótipo.

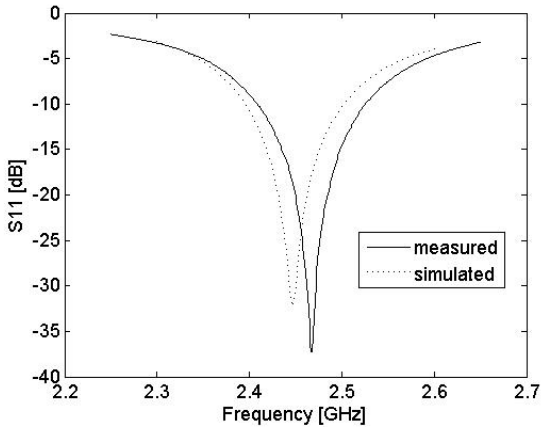


Fig.5 Comparação entre a perda de retorno simulada e medida da antena planar.

Fig.6 Foto do protótipo da antena

IV. Descrição dos equipamentos presentes na sala de controle

Na sala de controle estará presente um computador de mesa comum, com uma placa de comunicação WiFi PCI e um programa responsável pelo gerenciamento do sistema global. O software a ser instalado no computador da sala de controle analisará as imagens termográficas dos equipamentos de interesse, que estejam dentro do alcance do sistema, limitado pela lente da câmera e pela extensão do guia do robô. A imagem termográfica é recebida pelo computador da sala de controle em um formato proprietário, e deve ser convertida para outro formato padrão de imagens (.jpg, .bmp, etc) através de um programa de computador a ser desenvolvido em uma linguagem de alto nível.

Ao ser detectada uma situação de sobre-temperatura, o sistema envia uma mensagem (por exemplo, email) à central da concessionária, contendo informações tais como a hora e a imagem que disparou a situação de alarme.

O sistema terá a capacidade de parar o robô em posições estratégicas, de tal forma que equipamentos de interesse possam ter a imagem obtida. Esse mecanismo de parada é executado através da contagem dos pulsos provenientes do odômetro. Assim, haverá um sincronismo entre os diferentes elementos do sistema, executado por meio do programa:

1. O robô pára ao chegar próximo ao equipamento de interesse;
2. O pan-tilt é apontado para o equipamento, segundo coordenadas guardadas numa tabela de posições armazenada no computador desktop localizado na sala de controle,
3. A imagem é adquirida e enviada à sala de controle, via canal wireless,
4. O robô volta a movimentar-se, até encontrar o próximo sinal de parada.
5. A imagem é analisada pelo software, de maneira a detectar pontos quentes, onde a temperatura extrapole um valor limite estabelecido previamente.

Na etapa (1), onde o robô estaciona ao chegar próximo do equipamento, o sistema propulsor inicialmente reduz a velocidade do robô e posteriormente pára de forma suave. Este processo é realizado através do controle do motor via modulação PWM. As posições onde estas frenagens/paradas serão realizadas através de uma tabela. A posição onde o sistema é parado é então enviada ao computador da sala de controle, para que o mesmo envie as coordenadas para girar o sistema pan-tilt, referente ao passo (2). Assim que o apontamento do pan tilt seja finalizado, uma mensagem é enviada ao computador central e então o comando para adquirir a imagem é enviado para a câmera.

O software terá também um módulo de ajuste de campo, para que um operador possa mandar comandos manualmente de forma a controlar a posição do robô e do pan-tilt. O objetivo deste módulo é determinar estas posições para os equipamentos cujas análises termográficas sejam de interesse, na fase de instalação do sistema. A partir de dados destas posições – do pan tilt e do robô – será possível alimentar o programa para que o mesmo execute automaticamente a varredura. Outra função deste módulo é o acesso manual do sistema, a partir da sala de controle. Dessa forma, um operador será capaz de obter eventualmente a imagem termográfica de algum equipamento não incluído na varredura automática.

A etapa (5) é baseada em um pacote computacional fornecido pelo fabricante da câmera, que fornece um objeto com funções do tipo API associadas, capazes de serem integradas em ambientes de desenvolvimento comuns (Visual Basic, Visual C).

V. Conclusões

Foi analisada uma proposta de monitoramento para pontos quentes dentro de subestações, baseada em uma câmera termográfica acoplada a um robô. O robô é controlado de forma autônoma por meio de um programa residente em um computador, os quais se comunicam através de um canal wireless. A integração dos equipamentos eletrônicos se dá via protocolo TCP/IP. De acordo com levantamentos bibliográficos realizados na literatura técnica e entre demais espe-

cialistas, trata-se da primeira experiência robótica de manutenção preventiva em subestação utilizando uma câmera termográfica.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Hou N., "The Infrared thermography diagnostic technique of high voltage electrical equipments with internal faults ", Proceedings on Power System Technology, POWERCON '98, Jun 1998, pp.110-115.

[2] Ventrella, A.G , A ; Souza, Vidal, W. B. Fo ; Moscato, L. A ; Ferreira, G. A. N. ;. ; Santos, M. F. . Inspection Robot for High-Voltage Transmission Lines. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2003, São Paulo. XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2003

[3] Sawada, J; Kusumoto, K; Maikawa Y; Munakata, T and Ishikawa, Y. "A móbile robot for inspection of power transmisson line"IEEE Transaction on Power delivery, Vol 6, pp309-315, jan 1991.

[4] Ito K., Fujii H., Matsuno F.,: "Na information collecting robot for non-professional operator", Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, Jun 2005, pp.176-181

[5] 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.

[6] www.flir.com

[7] www.osnetworking.com.br

[8] IE3d, versão 10.0, www.zeland.com