



XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

CB/GLT/03

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**NOVO SISTEMA DE INSPEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADO EM RECONSTRUÇÃO
TRIDIMENSIONAL DE FOTOGRAFIAS AEREAAS**

Leandro Veloso Cunha(*) **Marcus Vinícius do Amaral** **Paulo Pinto de Oliveira** **Guilherme Pataro Pimenta**
CEMIG **CEMIG** **Tríxel** **Tríxel**

RESUMO

Neste Informe Técnico, apresentamos uma nova tecnologia para inspeção de linhas de transmissão baseada em visão computacional. Utilizando um conjunto de câmeras em uma plataforma estabilizada de angulação autônoma, obtêm-se múltiplas imagens georreferenciadas e em alta resolução da infraestrutura da linha, incluindo elementos condutores. Processando estas imagens, obtêm-se um modelo tridimensional de precisão topográfica.

Esta tecnologia promete revolucionar a forma como é realizado monitoramento aéreo de linhas de transmissão atualmente, pois permite a realização da inspeção de linha em escritório, em um ambiente virtual, além de oferecer ferramentas precisas de medida, auxiliando o a tomada de decisões em manutenção.

PALAVRAS-CHAVE

Inspeção de Linha, Avaliação de Risco, Manutenção, Modelagem 3D, Geoprocessamento

1.0 - INTRODUÇÃO

O Tríxel LT – Sistema de Inspeção de Linhas de Transmissão – É resultado de um projeto de P&D desenvolvido ao longo de cinco anos (de 2012 a 2016), com objetivo de criar um novo procedimento para inspeções aéreas de linhas de transmissão. O sistema engloba tanto software quanto hardware, inovando tanto no processo de aerolevanteamento quanto nos softwares desenvolvidos e na metodologia operacional.

O sistema é composto por um equipamento embarcado, e três softwares:

1. *Planejamento e Controle de Voo* – Responsável pelo controle da plataforma durante o voo;
2. *Reconstrução Tridimensional* – Responsável pela criação do modelo tridimensional da linha de transmissão e faixa de servidão;
3. *Inspeção Virtual da Linha de Transmissão* – Software onde é realizada a inspeção, no escritório, após a coleta e processamento dos dados.

O hardware – acoplado à aeronave – consiste de uma plataforma estabilizada de ângulo ajustável, que carrega um conjunto de seis câmeras. O software garante que o ângulo das câmeras esteja apropriadamente direcionado para a linha de transmissão e também realiza o disparo das câmeras automaticamente, garantindo a captura contínua das múltiplas imagens de vários pontos de vistas, sem a necessidade de intervenção do operador.

O plano de voo é montado em software específico, buscando o caminho que minimize as variações de altitude durante o voo, levando em consideração as alterações de altitude da linha de transmissão e os parâmetros operacionais do

(*) Av. Barbacena n° 1200 14° andar – Ala B1 – CEP 30.190-131 Belo Horizonte, MG, – Brasil
Tel: (+55 31) 3586-4378 – Email: leandro.veloso@cemig.com.br

equipamento e da aeronave, permitindo assim transições suaves. Durante o levantamento, ao carregar o plano de voo, o computador guia o piloto através dos pontos que devem ser sobrevoados, informando continuamente o caminho que deve ser percorrido e a qual altitude, garantindo a captura correta das imagens.

Após o voo, as imagens aéreas são processadas no software de reconstrução, criando um modelo fotogramétrico tridimensional da área abrangida. Este modelo 3D é carregado no sistema de inspeção virtual e permite ao inspetor da linha detectar problemas. É possível realizar diversas medições para avaliação de risco e priorização da manutenção, por exemplo:

- Medição precisa da distância dos cabos a objetos próximos, inclusive vegetação;
- Avaliação da situação de construções potencialmente irregulares;
- Medição de área e volume de vegetação a ser removido no ano seguinte;
- Medição do volume de erosões e acompanhamento de sua evolução.

As fotos aéreas tiradas também podem ser acessadas no software de Inspeção Virtual, em alta definição, permitindo ao inspetor observar detalhes dos componentes da linha, como por exemplo isoladores, espaçadores, amortecedores, integridade da estrutura e cabos.

A tecnologia desenvolvida tornará possível substituir a inspeção visual hoje mais dependente da impressão imediata do inspetor durante o voo, por uma ferramenta precisa que dará a CEMIG GT um registro persistente da inspeção juntamente com dados completos dos problemas mais comuns acontecendo ao longo da linha, servido de apoio para a realização de estudos de desempenho, aumento de capacidade, perfilamento de terreno, entre outros.

A altitude operacional do equipamento (média de 300 metros acima do solo) também traz segurança ao pessoal durante o voo, mitigando riscos inerentes de se voar em proximidade das linhas de alta tensão, como é feito atualmente (entre 50 a 100 metros acima do solo).

O sistema foi desenvolvido em parceria pela CEMIG e Visual Virtual em um projeto de P&D CEMIG ANEEL e as experiências piloto em linhas de transmissão reais apresentaram resultados significativos, com planos para implantação como inspeção de rotina.

2.0 - METODOLOGIA

Nesta seção, discorreremos sucintamente sobre o design do hardware e os princípios teóricos da tecnologia de reconstrução tridimensional.

2.1 Hardware

O hardware desenvolvido consta de uma *Plataforma Multicâmera sobre Gimbal Ativo*, equipado com 6 câmeras de alta resolução (32 Megapixels) e lentes Zoom, que permitem visualizar detalhes das torres, fios e toda faixa de domínio. O equipamento opera em uma faixa de 200 a 500m acima do solo.

A Plataforma Gimbal do sistema é chamada de *ativa*, pois além de estabilizar a captura da imagem, utiliza dados de GPS e sistemas inerciais para acompanhar dinamicamente o eixo da linha de transmissão, compensando as variações de posicionamento da aeronave e o perfil do terreno (ver Figura 1). Dessa forma é possível a captura contínua de imagens sem necessidade da intervenção de um operador.

Outra característica da plataforma de câmeras é a orientação relativa entre estas, calculada de acordo com o ângulo de visão das lentes, as imagens câmeras formam um "leque", obtendo grande amplitude de cobertura em um único disparo. A Figura 1 mostra uma representação conceitual do equipamento, sendo possível identificar a diferença de orientação citada.

O sistema foi desenvolvido para ser transportado por helicóptero, podendo facilmente ter versões para Aviões ou Drones/VANTS.



FIGURA 1 – (a) Ação do Gimbal Ativo acompanhando o eixo das Torres. (b) Imagem representativa do equipamento

2.2 Reconstrução Tridimensional Multifoto -Teoria

Durante o levantamento de campo, o software de *Planejamento e Controle de Voo* integra os dados da câmera com GPS e sistemas inerciais, criando um conjunto de fotos georreferenciadas, posicionadas e orientadas espacialmente.

De maneira similar à fotogrametria convencional (1), a solução desenvolvida reconstrói um modelo 3D a partir de diversos pontos de vista. O uso de múltiplos pontos de vista, ao invés de apenas dois como se faz em fotogrametria tradicional, confere maior acurácia ao modelo.

O processo de reconstrução 3D (2) se baseia na modelagem de uma fotografia como a projeção de um ponto X em \mathbb{R}^3 (coordenadas globais) em um ponto x em \mathbb{R}^2 (coordenadas em pixels), pela relação:

$$x = k(R|t)X$$

Onde k é a matriz de calibração da câmera e $(R|t)$ é a pose, uma matriz combinando tanto rotação quanto posição relativa da câmera em relação ao sistema de coordenadas de referência.

Esta relação pode ser invertida, obtendo-se um vetor V originário da câmera, atravessando o ponto x . Ao integrar mais pontos de vista, a interseção destes vetores $V_1...V_n$ define o ponto X original em coordenadas globais, como mostra a Figura 2.

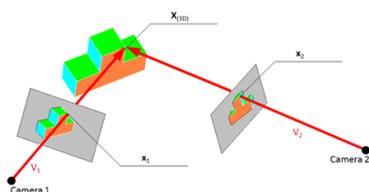


FIGURA 2 – Reconstrução multi-foto: O ponto X é reconstruído pela interseção dos vetores $V_1...V_n$ de n câmeras ($n=2$ neste exemplo)

3.0 - SOLUÇÕES DESENVOLVIDAS

3.1 Planejamento e Controle de Voo

O software de planejamento e controle de voo permite planejar a linha de voo a ser seguida pela aeronave de acordo com parâmetros de interesse: Altura mínima e máxima de voo, ângulo vertical das fotos, rampa máxima e raio de giro da aeronave, etc.

O equipamento apresenta as seguintes inovações:

- Ajuste de visada automático do conjunto de câmeras
- Compensação imediata de movimentos espúrios, mantendo a plataforma estabilizada
- Utilização de câmeras de alta resolução e com lentes de zoom, que permite maior altitude de operação
- Acompanhamento em tempo real, pelo piloto, da parcela do serviço realizado, evitando retrabalho
- Disparo automático do conjunto de câmeras

3.2 Reconstrução Tridimensional

Após o levantamento de campo os dados são pós-processados pelo "Software de Visão Computacional", fazendo a reconstrução 3D. Os principais avanços em relação ao estado da arte de reconstrução 3D implementados no P&D foram:

- Reconstrução Multifoto, implementada em placa gráfica com tecnologia CUDA (FIGURA 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**)
- Detecção semi-automática dos elementos condutores e cálculo de catenária (Figura 3)



FIGURA 3 – Detecção de fios: A linha em preto é a reta entre os extremos do cabo de cima, inserida para referência. Em vermelho, os fios detectados (3 condutores e um para raio). Destaque para a robustez do método.

3.3 Inspeção Virtual da Linha de Transmissão

Processados os dados, os resultados são apresentados no "Software de Realidade Virtual", onde ocorrerá a maior parte da interação com o usuário final. Em relação ao procedimento atual de inspeção de linha, a inspeção virtual no software oferece as seguintes inovações:

- Inspeção realizada em escritório, reduzindo riscos
- Realização de medidas, para verificação objetiva de diversos casos (invasões, necessidade de poda, controle de avanço de erosões, etc.)
- Registro fotográfico datado e georeferenciado, podendo ser usado em ações judiciais;
- Fotografias em alta resolução e de diversos ângulos, que podem ser analisadas pelo tempo necessário, e não sob pressão da velocidade de voo.

As figuras FIGURA 4 – FIGURA 9 mostram uma visão geral do software desenvolvido e suas funcionalidades.



FIGURA 4 – Visão geral do software de inspeção virtual.



FIGURA 5 – Medição: (a) No destaque, vegetação muito próxima à linha. (b) Faixa de domínio representada como muro virtual

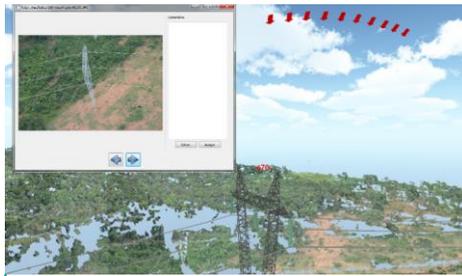


FIGURA 6 – Visualização dos diversos pontos de vista com fotografia disponível (setas vermelhas acima da torre)



FIGURA 7 – Três pontos de vista distintos de uma mesma torre



FIGURA 8 – Destaque para a qualidade das imagens, permitido à equipe de inspeção avaliar o estado de elementos físicos



FIGURA 9 – Zoom na base de uma torre, com um comentário registrado no software indicado a possibilidade de erosão

Formatado: Fonte: (Padrão) Cambria, 8 pt, Kern em 10 pt

4.0 - TESTES DE CAMPO E RESULTADOS

4.1 São Gonçalo/MG – Ouro Preto/MG, teste feitos ao fim de 2014

Os testes foram realizados nos dias 24 a 29 de novembro de 2014, com objetivo de testar o funcionamento do hardware desenvolvido, assim como sua integração ao software de controle.



FIGURA 10 – (a) Aeronave utilizada nos testes de 2014. (b) Detalhe da montagem do equipamento

Os principais pontos avaliados neste teste foram:

- Funcionamento dos componentes individuais do sistema;
- Integração dos elementos do sistema, principalmente a comunicação entre o *hardware* e o *software* de controle de voo;
- Robustez do equipamento;
- Interface do *software* de controle de voo, com a experiência do piloto

O processamento dos dados obtidos neste teste possibilitou a criação dos primeiros modelos tridimensionais para o teste do módulo de inspeção virtual.

As imagens mostradas anteriormente neste IT são originárias deste teste. Destacamos que, neste ponto, o sistema já se mostrava útil no auxílio às equipes de monitoramento. Como exemplo, ver Figura 11.



FIGURA 11 – Defeitos encontrados: (a) Rabicho solto. (b) Visão geral da torre. (c) Isolador quebrado

4.2 Guilman Amorim/MG – Ipatinga/MG, testes feitos ao fim de 2016

O levantamento de campo para inspeção do trecho Guilman Amorim - Ipatinga foi realizado entre os dias 20 a 24 de outubro de 2016. Foram levantados aproximadamente 50km lineares de linha, em 4 voos em uma aeronave equipada com o sistema de aquisição de dados do Trixel Linha de Transmissão, totalizando 12 horas de voo.

Esta seção da LT foi escolhida por apresentar diversos fatores complicadores para a inspeção convencional, incluindo:

- Relevo com grandes variações de altitude
- Proximidade à área urbana, com possibilidade de invasões da faixa de servidão
- Navegabilidade ruim, devido à presença de correntes térmicas na atmosfera

- Cruzamentos de linhas

Os riscos relacionados a esses fatores são mitigados pela utilização do sistema apresentado, devido à maior altitude de operação do equipamento e sua grande faixa de operação, o que minimiza a necessidade de mudanças de altitude.

O levantamento produziu 23.171 fotografias de alta resolução em dois níveis de zoom, aberto (50mm, ver Figura 12) e detalhado (180mm, ver Figura 13) distribuídas como mostra a Tabela 1.

TABELA 1 – Relação de Fotos x Voo

	50mm	180mm
Voo 1	3448	3106
Voo 2	3490	3118
Voo 3	1072	3916
Voo 4	1071	3922



FIGURA 12 – (a) Zoom aberto de 50mm: Imagem composta de um único disparo. (b) Detalhe ampliado na torre



FIGURA 13 – (a) Zoom detalhado de 180mm. (b) Detalhe ampliado

Os modelos tridimensionais foram gerados em blocos de 500m ao longo da linha, com 150m em cada lado para avaliação da faixa de domínio, ver Figura 14.



FIGURA 14 – 1000m de modelo 3D reconstruído. Torre destacada em vermelho

5.0 - CONCLUSÃO

O sistema se mostrou capaz de oferecer diversas vantagens em relação ao método tradicional:

- Maior altitude de voo

Adotar o sistema Trixel Linha de Transmissão trará segurança às equipes de inspeção de linha, pois os voos atuais de inspeção de LTs são intrinsecamente perigosos, devido à necessidade de se operar em baixas altitudes, o que diminui o a janela de tempo disponível para o piloto reagir em caso de problema na aeronave, realizando manobras ou um pouso de emergência. Outro risco associado com o procedimento atual é a grande proximidade necessária para a inspeção visual dos elementos condutores, tal proximidade faz com que mudanças nos ventos possam levar a aeronave à colisão com as torres ou fios.

- Registro fotográfico de alta resolução, em diversos pontos de vista ao longo da LT

A adoção do sistema desenvolvido provê um registro fotográfico permanente, que pode ser utilizado em revisões futuras, oferecendo suporte legal para ações relacionadas a invasões na faixa de domínio, além de documentar o cumprimento das obrigações de limpeza e manutenção de faixa.

- Integração de plataforma Gimbal ativo

Possibilidade de substituição da inspeção visual por voo realizado apenas pelo piloto, enquanto a equipe de especialistas faz a avaliação, porém no escritório, podendo colaborar mais entre si e avaliar com mais cautela os diversos elementos da linha. Tal mudança diminuiria erros e omissões, fortaleceria o planejamento de manutenção e em última análise diminuiria o número de falhas.

- Reconstrução de modelo 3D com precisão topográfica.

A implementação do sistema proposto traz a reconstrução 3D topográfica das torres, condutores e entornos da linha, o que torna possível a realização de medições ponto-a-ponto precisas, além da detecção de possíveis interferências de forma automática. Para a concessionária isso se traduz em mais ferramentas para reduzir custos em diversas frentes, como poda de vegetação, levantamento de dados para projetos de recapitação e acompanhamento dos elementos condutores.

- Possibilidade de se fazer um comparativo temporal entre dois levantamentos.

Combinando o registro fotográfico permanente e de alta resolução com a modelagem 3D de precisão topográfica, o sistema permite a comparação temporal, possibilitando acompanhar, por exemplo, a evolução de uma erosão ou vossorocamento, o crescimento de vegetação, a durabilidade dos isoladores entre outros componentes. Essa informação possibilitará a elaboração de planos de manutenção mais eficientes, aumentando a segurança e prevenindo falhas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SHIMO, Y. Development of Power Transmission Line Inspection System by Unmanned Helicopter; CIGRÉ B2/D2-106_2006
- (2) HARTLEY, R., ZISSERMAN, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. CAMBRIDGE 2003, ISBN 0-521-54051-8

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Leandro Veloso Cunha

Nascido em Montes Claros, 1983, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2005) mestrado na mesma instituição em 2010. Atua na área de Engenharia de Planejamento de Manutenção da Transmissão na CEMIG desde 2006, sendo coordenador da área de Linhas de Transmissão desde 2010. Principais atividades: prospecção e implantação de tecnologias e metodologias, diagnóstico e análise de falhas de ativos, monitoramento do desempenho, integração de novas instalações e planejamento de longo prazo da manutenção.