



Multivision Inspection (MVI): Detecção de Falhas em Redes de Energia Elétrica por Termografia, Análise de Iluminação Pública e Técnicas de Inteligência Artificial com Redes Neurais.

Tema: Redes de Distribuição

Autores: Francisco Fambrini, Diogo Gará Caetano, Eduardo Carrara, Rafael Reis.

Co-Autores: Abel Duenas, Camila Albertin, Clodoaldo J. Moya.

Empresa: KASCO P&D Tecnologia da Informação LTDA.

Resumo

Neste trabalho, desenvolvido pela empresa Kasco AI em parceria com a ANEEL e grupo CPFL, os autores descrevem o desenvolvimento de uma solução veicular completa para diagnóstico e predição de falhas em redes de distribuição de energia elétrica, incluindo: detecção de pontos quentes nos elementos da rede através da análise computadorizada de imagens termográficas, análise do sistema de iluminação pública (incluindo detecção do tipo de lâmpada e de sua potência), análise do efeito corona através de imagens em UV e geração automática dos relatórios por meio de Inteligência Artificial. O sistema descrito automatiza o processo de inspeções de termografia, descargas parciais e efeito corona, utilizando redes neurais Deep Learning para identificação dos ativos das redes e gerando relatórios já com as indicações de manutenção. Todo o processo foi padronizado dentro de uma distribuidora (CPFL Energia), de modo a não depender da escolha do operador humano.

1. Introdução

Este artigo descreve o desenvolvimento de uma ferramenta aplicada ao processo de inspeção de redes aéreas de distribuição de energia, com o principal diferencial de utilizar técnicas de inteligência artificial para o reconhecimento de elementos elétricos de distribuição de energia. A solução utiliza veículos terrestres e drones equipados com GPS, Pan-Tilts eletromecânicos e múltiplas câmeras ópticas e térmicas, buscando o aumento da eficiência, padronização e redução de custos no processo de inspeção das redes de energia (Fambrini F., Iano Y. et al., 2017). O desenvolvimento da ferramenta incluiu as etapas de pesquisa, especificação de equipamentos, planejamento de processos, escolha e contratação de equipe, projetos elétricos e mecânicos, execução e montagem de estruturas metálicas, desenvolvimento de software e hardware, integração de peças, adaptação veicular e diversos testes de campo para validação e avaliação da metodologia proposta.

Os métodos convencionais, por outro lado, utilizam um operador humano para as câmeras, o qual é acomodado dentro do veículo em uma posição, geralmente, ergonomicamente incorreta e consegue manipular a câmera através de um joystick, ou apenas uma câmera nas mãos, obtendo fotos dos elementos e analisando-as uma a uma visualmente. Neste projeto, é usada uma combinação dos seguintes subsis-

temas de controle: processamento e reconhecimento de padrões de imagens através da técnica de redes neurais e aprendizado profundo (Deep Learning), filtragem e descarte de imagens indesejadas, escolha das melhores imagens, matching de imagens ópticas e térmicas, extração de temperatura em imagens térmicas, cálculos de coordenadas de elementos observados, filtragem de medidas, controle de metadados de imagens e combinação com dados de GPS, compensação da posição do Pan-Tilt mediante a posição de postes, interfaces de controle, interfaces de monitoramento, controle automático e manual, sistemas de conversão de tensão para alimentação elétrica dos circuitos e sistemas embarcados.

2. Desenvolvimento

OBJETIVO

Este projeto tem como objetivos a redução do tempo e do custo do processo de inspeção de linhas aéreas de distribuição de energia através da utilização das mais recentes técnicas de Inteligência Artificial e Visão Computacional. Dessa forma, aumenta-se a capacidade das concessionárias em inspecionar a totalidade de suas redes em menor tempo, garantindo uma maior confiabilidade e qualidade na prestação dos serviços de distribuição de energia elétrica.

DIAGNÓSTICO: PROBLEMA ENFRENTADO

Atualmente, a exigência pelo fornecimento de energia elétrica contínua e de boa qualidade revela um mercado consumidor em crescimento e com cargas cada vez mais sofisticadas. O crescimento das cargas e a evolução dos sistemas de distribuição fizeram com que as concessionárias de energia elétrica adequassem suas estruturas para manter seu desempenho compatível com as necessidades crescentes dos consumidores, ultrapassando os padrões estabelecidos pelas portarias da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual regulamenta o fornecimento de energia elétrica (Fambrini, F.; Caetano, D.G. et al., 2018). As exigências citadas refletem, dessa forma, na melhoria de técnicas que venham a detectar, com antecedência, um provável ponto de falha em redes de distribuição, evitando desligamentos no sistema. A ANEEL normatiza índices mínimos de confiabilidade, baseados em valores individuais de cada consumidor. São eles: DIC (Duração de Interrupção por unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção por unidade Consumidora) e DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por unidade consumidora). Para atender a esses requisitos, a inspeção automatizada das redes se torna prioritária. A inspeção é dividida em estrutural e termográfica, sendo a primeira destinada a todos os objetos técnicos da concessão e a segunda somente aos troncos de alimentadores. Nesse aspecto, o uso de tecnologias como a Termografia Infravermelha e a Detecção de Corona por Ultravioleta pode ampliar o espectro de visão, auxiliando na detecção de falhas invisíveis. A Detecção do Efeito Corona por UV foi implantada, até este momento, apenas nos veículos em uso no Equador e ainda não nos carros brasileiros. As demais tecnologias são abordadas neste artigo e estão em uso atualmente pelo grupo CPFL Energia, especialmente na cidade de Campinas.

METODOLOGIA/MÉTODO PROPOSTO

Nos últimos anos, a tecnologia de termografia tem experimentado uma crescente adoção em escala industrial, o que tem levado à redução dos custos de seus componentes (Fambrini F., Rangel A. et al., 2020). Originalmente utilizada pelo setor militar, a visão termográfica tem sido cada vez mais empregada nas áreas de segurança, indústria e energia. As câmeras térmicas são capazes de capturar imagens a grandes distâncias, além de serem imunes a condições como neblina, névoa, fumaça e baixa luminosidade. A tecnologia de inspeção térmica usa radiação infravermelha para medir temperaturas ou identificar variações na distribuição de temperatura, permitindo a análise das condições operacionais de um equipamento. Falhas nos circuitos de distribuição aérea, por exemplo, geralmente se manifestam por um aumento anômalo

da temperatura de trabalho devido ao aumento da resistência de contato (Caetano, D.G., Fambrini, F. et al., 2020). Comumente, o carregamento de pico provoca o aquecimento e subsequente resfriamento das conexões, sobrecarregando os componentes da rede. Esse estresse térmico, causado pelas variações de temperatura ao longo do tempo, resulta no aumento da resistência de contato. Esse fenômeno pode ser monitorado por câmeras termográficas, que conseguem localizar com precisão os pontos sobreaquecidos e medir o aumento anômalo da temperatura. O mau contato elétrico gera aquecimento através do efeito Joule, que pode ocorrer de forma rápida ou gradual, mas sempre de maneira progressiva, até que o componente se degrade ou a conexão se rompa, interrompendo o fornecimento. A manutenção preditiva é uma das abordagens mais inovadoras para a gestão da manutenção, permitindo o monitoramento e o acompanhamento do desempenho dos equipamentos por meio de instrumentos que fornecem dados quantitativos sobre os componentes. As inspeções para identificar pontos quentes podem ter um caráter tanto corretivo, no que se refere à qualidade da energia fornecida, quanto preventivo, visando a continuidade do fornecimento, uma vez que podem identificar com antecedência possíveis falhas no sistema. O método desenvolvido se concentra na identificação dos tipos de elementos elétricos, com e sem sobreaquecimento, nas linhas de distribuição de energia aérea. A identificação dos elementos é realizada enquanto um veículo terrestre, equipado com GPS, estação meteorológica, câmeras ópticas e termográficas, controladas por um robô, percorre as linhas de distribuição. O sistema conta com uma série de algoritmos, incluindo: software de reconhecimento de padrões com redes neurais (Deep Learning), software para identificação de postes e componentes elétricos conectados a eles, software para combinar imagens de elementos capturados por diferentes câmeras, software para controle do disparo e operação das câmeras, e software para controle de direcionamento das câmeras (PanTilt). Além disso, o sistema inclui um sistema de amortecimento para compensar as vibrações do veículo ao se mover pelas ruas e estradas. A Figura 1 ilustra, à esquerda, os diversos componentes eletrônicos e de software que fazem parte do veículo de inspeção, enquanto à direita estão representados os servidores de Inteligência Artificial e os servidores responsáveis pela geração dos relatórios. Além dos sistemas mencionados, alguns veículos também foram equipados com um espectrofotômetro da OceanView (Caetano, D.G., Iano, Y. et al., 2021), que permite analisar as assinaturas espectrais das lâmpadas de iluminação pública e estimar a potência consumida pelas lâmpadas, por meio da intensidade da luz captada e do reconhecimento do modelo da lâmpada, realizado pela IA incorporada ao veículo.

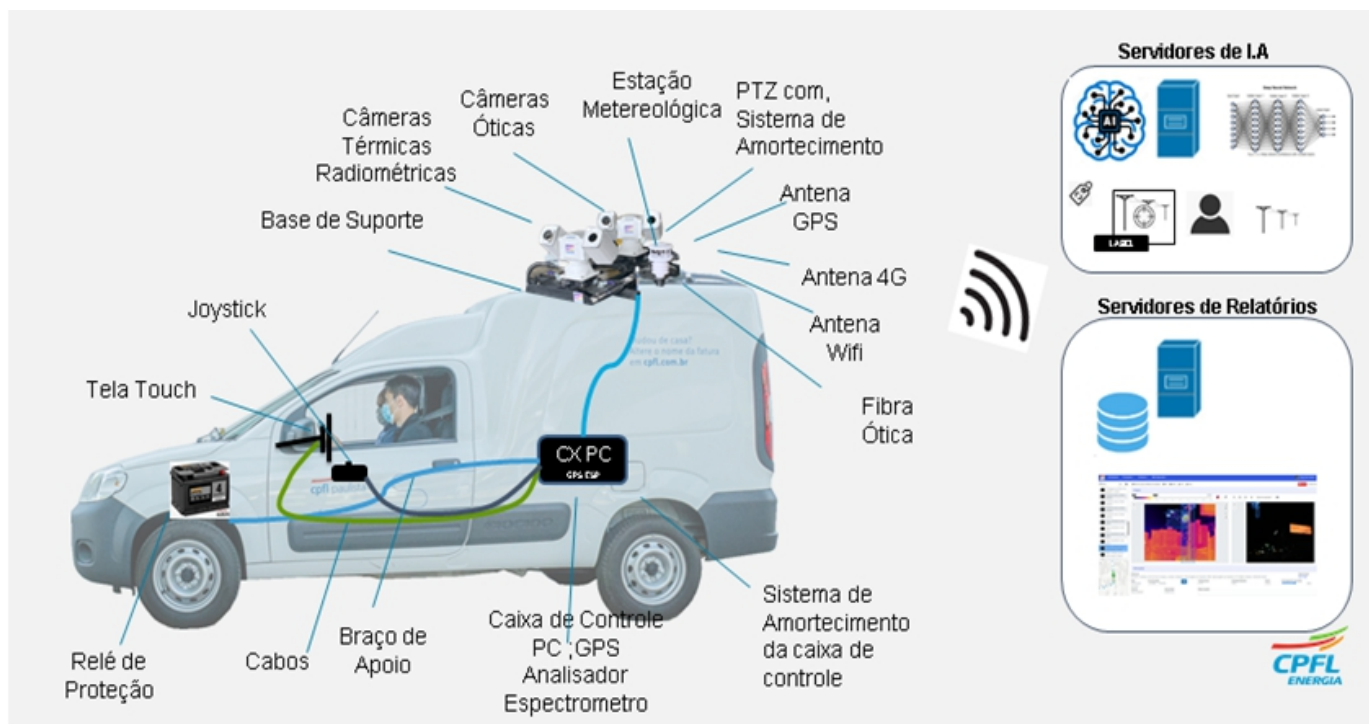


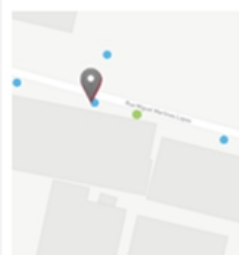
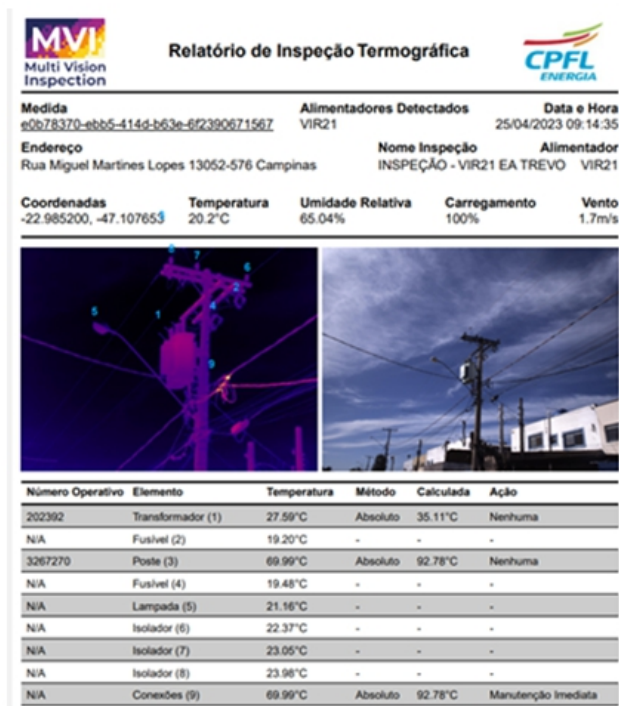
Figura 1 – Representação dos elementos que compõe o sistema de inspeção veicular.

5. RESULTADOS/PRODUTOS OBTIDOS

Para a avaliação dos resultados, realizaram-se testes comparativos entre o atual modo de inspeção de linhas de energia de distribuição aérea, o qual se refere ao uso de câmeras manuais termográficas, e o método atualmente desenvolvido, que realiza a tomada de imagens e processamento de forma automatizada. Além do teste comparativo, as experiências de usabilidade foram avaliadas por sete diferentes usuários, que percorreram diferentes trechos nas cidades de Campinas, Jaguariúna, Paulínia, Sorocaba, Indaiatuba, Jundiaí (todas no interior de São Paulo) e em toda a área de concessão das quatro distribuidoras: RGE, CPFL Paulista, CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, e também na empresa Elétrica de Quito (CNEL - Companhia Nacional de Energia Elétrica do Equador). Com os testes, foi possível observar um aumento significativo da confiabilidade da medição e redução do custo com manutenção e falhas preditivas. Constatou-se que a taxa de erro do sistema foi reduzida para menos de 5%, considerando os dados disponíveis. Para todas as rotas realizadas, a precisão de dados foi verificada com grande eficiência, sendo em torno de 95% de precisão do software com imagens termográficas. A eficiência da abordagem foi aumentada para 98% quando o sistema foi combinado com câmeras óticas e UV.

3. Conclusão

Em relação ao sistema de inspeção termográfica, foram obtidos os seguintes resultados após 6067 quilômetros de linha inspecionada por dois veículos. Ao todo 605 anomalias foram identificadas, sendo 259 de manutenção imediata e 346 de manutenção programada. O tempo total de inspeção foi de 409 horas (durante 2 meses) com a inspeção automatizada, enquanto o tempo estimado seria de 11 meses com a inspeção manual convencional.



Elemento	Alarme (GED3584)	Método	Min	Máx
Transformador	Nenhuma	Relativo	-Inf	5
Transformador	Manutenção Programada	Relativo	5	23
Transformador	Manutenção Imediata	Relativo	23	Inf
Transformador	Nenhuma	Absoluto	-Inf	95
Transformador	Manutenção Imediata	Absoluto	120	Inf
Transformador	Manutenção Programada	Absoluto	95	120
Fusível	Nenhuma	Absoluto	-Inf	83
Fusível	Manutenção Programada	Absoluto	83	111
Fusível	Manutenção Imediata	Absoluto	111	Inf
Fusível	Nenhuma	Relativo	-Inf	8
Fusível	Manutenção Programada	Relativo	5	23
Fusível	Manutenção Imediata	Relativo	23	Inf
Poste	Nenhuma	Absoluto	30	150
Poste	Manutenção Programada	Absoluto	150	180

Figura 2 - Exemplo de relatório de termovisão com alarme para manutenção imediata.À esquerda, fotos termográfica e óptica; À direita, relação dos elementos detectados nas imagens, suas temperaturas e um QRcode que ao ser lido, permite localizar o endereço onde as imagens foram feitas, através do Google StreetView.

Com relação à inspeção do Sistema de Iluminação Pública, o sistema é capaz de identificar (por meio de um espectrofotômetro instalado no veículo) através da análise da assinatura espectral da luz emitida pelo poste, qual é o tipo da lâmpada instalada (vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapor metálico, mista ou LED) e estimar a potência da respectiva lâmpada instalada, em watts, com boa precisão (Fambrini F., Rodriguez Duenas A. et al, 2022). O aspecto de um relatório de iluminação gerado é mostrado na Figura 3. Estas informações são particularmente importantes porque a manutenção das lâmpadas corre por conta das Prefeituras e não das concessionárias, sendo que as primeiras pagam uma tarifa estimada para a concessionária. Desta forma, o conhecimento da carga de iluminação instalada, bem como seu tipo, é muito importante de modo a tornar justa esta tarifa pública.

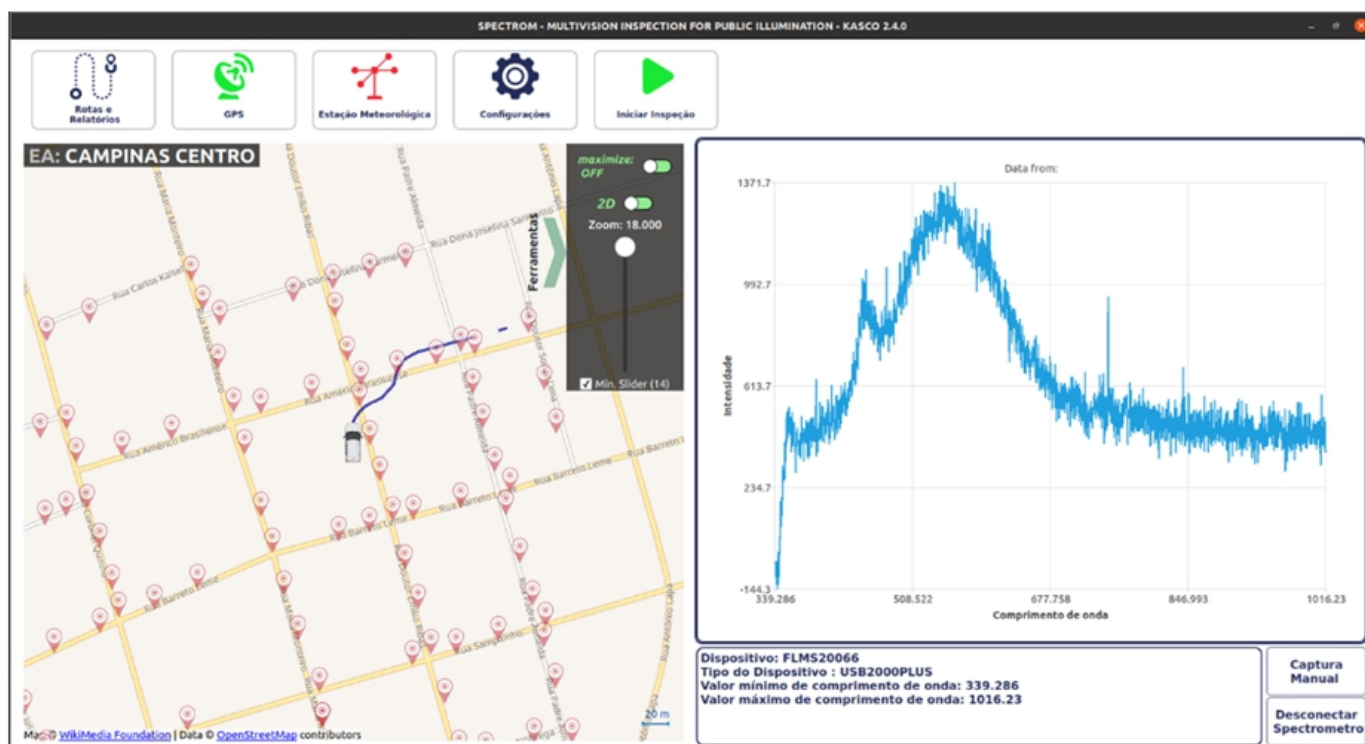


Figura 3 - Exemplo de visão de relatório de Iluminação Pública: à esquerda localização do veículo e posições dos postes, obtida pelo GPS; À direita, espectro da luz do poste, analisada pela IA do veículo.

A tabela 1 mostra os resultados comparativos entre o sistema de inspeção veicular manual e o automatizado, escopo deste artigo.

Tabela 1 – Resultados comparativos entre a solução convencional e automatizada.

Item	Cenário Atual	Projeto com veículos automatizados
Quantidade de Mão de Obra	2 pessoas	Nenhum (se veículo autônomo), 1 ou 2 pessoas (se dirigível)
Tempo de Inspeção total de rede	129 mil horas	27 mil horas
Tempo médio de Inspeção (min/Km)	19,5	4,7
Quantidade de Veículos Necessários	22	4 a 6
Custo de Inspeção	R\$ 37,01 /Km	R\$ 9,98/Km
Capacidade de Inspeção	25,7 Km/dia (8 horas)	100 Km/dia (8 horas)

Com os resultados dos testes, conclui-se que houve ganho significativo no uso da nova solução, tanto financeiro quanto na redução do tempo. Além disso, outros ganhos secundários podem ser citados como: maior segurança do operador, maior velocidade para inspecionar áreas de risco, padronização do processo, maior qualidade e menor tempo para a disponibilidade do relatório para as equipes de manutenção. A presente solução teve seu pedido de patente registrado no INPI. O número do Processo é BR 10 20018 0116614 (Termografia) e Número do Pedido: BR102023017379-9 (para o Projeto de Reconhecimento de Iluminação Pública).

4. Referências bibliográficas

Fambrini, F.; Iano, Y. ; Silva, N.L.M. ; Caetano, D. G. ; Ferrarezi, R. ; Arthur, R. ; Cabello, f. ; Rodrigues, A. A. ; Leon, J. ; Mazoni, g (2018). Reconhecimento Automático de Elementos da Rede de Distribuição por Meio de Termografia. Revista Eletricidade Moderna, ano 46, N.527, Fevereiro 2018, pp. 22-29.

Fambrini, F.; Caetano, D. G, Iano, Y. ; Ferrarezi, R. ; Arthur, R. ; Cabello, F., Zuben V. J; Rodrigues, A. A. ; Mazoni, G. Carrara E.(2018).“Design and Implementation of I.A Vehicle for Thermographic Inspections in Electric Distribution Network Using Deep Learning Based Software”, Hong-Kong. Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Intelligence and Applications ICCIA 2018, v. 1. p. 1-1, DOI:10.1109/ICCIA.2018.00034.

Fambrini F., Iano Y., Rodriguez Duenas A., Ambrosio R. R. A., Caetano D.G., and Rangel A.(2020)"Deep learning based system to electric distribution network inspection", Proc. SPIE 11519, Twelfth International Conference on Digital Image Processing-ICDIP, Hong Kong, 1151914;<https://doi.org/10.1117/12.2573984>.

Caetano, D. G, Fambrini, F.; Iano, Y.; Duena, A; Moya,C; Arthur, R.; Zuben V J; Mazoni G., Carrara E. (2020). “An A.I Solution for Thermographic and Optical Inspections in Electric Distribution Network Using Deep Learning Based Software”.GTC Conference, USA.

Caetano, D. G, Fambrini, F.; Iano, Y.; Duenas A.; Moya,C; Arthur, R.; Zuben V. J; Mazoni, G.C. (2021). “An A.I Solution for Detecting Poles Coordinates and Thermographic and Optical Inspections in Electric Distribution Network Combining Deep Learning Based Software and Machine Learning”, CIRED Geneva, Switzerland.

Fambrini F., Iano Y., Rodriguez Duenas A., Caetano D.G., Rangel A. (2022). “An Innovative Lighting Recognition System Based on Color Rendering Index and Computational Neural Networking”, ISIE Conference, Alaska, USA.DOI:10.3390/engproc2022021056.