

Análise de técnicas de reconhecimento de componentes de linhas de transmissão de energia em imagens aéreas

Odyr Sohn
INERGE
Florinópolis, SC
odyrsohn@gmail.com

Rafael Z. Homma
CELESC
Florinópolis, SC
rafaelZH@celesc.com.br

Ricardo C. Bose
INERGE
Florinópolis, SC
ricardobose@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta uma análise sobre técnicas e algoritmos para reconhecimento de componentes em imagens aéreas realizadas por Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) em linhas de transmissão de energia elétrica. O objetivo é eleger técnicas eficientes mas de fácil programação e cuja aplicação, em ambiente de trabalho do usuário final, exija pouco conhecimento de tratamento de imagens dos técnicos envolvidos na operação ou futuras expansões do sistema. A revisão bibliográfica comparou capacidades e características de diferentes técnicas de reconhecimento utilizadas neste contexto, considerando sobretudo a simplicidade da metodologia. Neste contexto, o conjunto de técnicas SURF+BoW+SVM foi escolhido para testes, cuja meta foi verificar e garantir que esta única solução permitisse reconhecer, de forma robusta e independente de tamanho ou formato, diversos componentes da linha de transmissão. Avaliações utilizando imagens reais adquiridas pelo ARP apresentaram satisfatória taxa de acerto no reconhecimento dos três tipos de componentes testados. A solução permitirá construir um sistema eficiente e robusto para reconhecimento de componentes de linhas de transmissão e ao mesmo tempo agregará simplicidade à operação, atualização e expansão da capacidade de reconhecimento do mesmo. A inspeção de redes de transmissão com o auxílio de ARPs é uma tendência mundial e este artigo almeja enriquecer as discussões e avanços no assunto.

Abstract - This article presents an analysis of techniques and algorithms for recognition electricity transmission lines components in aerial images taken by aircraft Remotely Piloted (ARP). The goal is to elect techniques to easy programming in order to require little image processing knowledge of the technicians involved in system operation and future expansion. Literature review compared capabilities and characteristics of several recognition techniques used in this context, SURF+BoW+SVM techniques was chosen for testing considering their efficiency and simplicity. Although popular in many application areas, no results of these technics was found applied on electrical system components. The goal was to verify and ensure that this unique solution allowed recognizing different electrical components. Tests using real images acquired by ARP were efficient in recognizing the three types of components. The solution will allow building an efficient and robust system for recognition of transmission line components at the same time will add simplicity to the operation, upgrade and expansion of its recognition capability. The inspection of transmission networks based on ARPs is a global trend and this article aims to enrich the discussions and developments in the subject.

Keywords-Reconhecimento de Componentes de LTs, Trata-

mento de Imagens, Algoritmos, Linhas de Distribuição, Detecção de Isoladores.

I. INTRODUÇÃO

O conceito de inspeção autônoma de sistemas elétricos utilizando imagens aéreas e aeronaves remotamente pilotadas (ARP) é relativamente recente, introduzido pelo trabalho de Campoy[1], em 2001. O assunto tem ganho atenção e ampara projetos de pesquisa desenvolvidos nos últimos anos [2], [3], [4], [5], [6], além de iniciativas de empresas na Áustria [7], China [8], Finlândia [9], Reino Unido [10] e Estados Unidos [11].

Na literatura, as técnicas desenvolvidas são apresentadas visando reconhecimento de um tipo de componente do sistema elétrico, por exemplo, os trabalhos [2], [12] e [13] exploram identificação dos condutores das linhas de transmissão, [14] explora a identificação de torres, [15] e [16] exploram a identificação de cadeias de isoladores.

Contextualizado em projeto de P&D que propõe metodologias e procedimentos para inspeção de linhas de transmissão com suporte de ARPs, este artigo tem por objetivo selecionar e explorar uma única ferramenta capaz de identificar todos os elementos de interesse na linha, com esforço de desenvolvimento simplificado e adaptação minimizada entre tipos de componentes; e desta forma, permitir que técnicos da empresa parceira executem futuras manutenções, atualizações e ampliações do sistema de inspeção de maneira descomplicada, sem necessidade de formação específica ou experiência em visão computacional.

II. CONTEXTO DE APLICAÇÃO E METODOLOGIA DE PROCESSOS

São apresentadas a arquitetura da aplicação e a metodologia dos processos de inspeção.

A. Arquitetura de aplicação

A Figura 1 apresenta um diagrama simplificado dos blocos que representam os diversos processos e a arquitetura de interações entre eles. Ao início, a estação de solo vai a campo para coletar dados em uma de linha de transmissão. A ARP sobrevoa o trecho selecionado e envia os dados ao sistema

da estação de solo, a qual possui a atribuição de avaliar se a qualidade mínima dos dados adquiridos na missão foi atingida. Dentre os testes realizados, as imagens são avaliadas quanto a condições extremas que atuam negativamente em sua nitidez, como neblina ou chuva intensa. Se necessário, o procedimento de aquisição de dados é refeito. Com o término da etapa em campo, os dados são enviados ao centro de processamento da empresa.

No centro de processamento, os dados são inspecionados de forma automatizada. Como resultado, são identificados pontos de atenção que ficam à disposição do centro de operações para avaliação por técnicos especialistas em linhas de transmissão. Os dados são apresentados com capacidade de análise histórica de evolução dos pontos identificados, navegação entre elementos da rede, classificação de defeitos, correção de erros na identificação automatizada e outros. Relatórios produzidos pelo sistema permitirão um planejamento otimizado dos trabalhos de manutenção em linhas de transmissão e uma melhor previsibilidade de diversos setores envolvidos, cooperando para a inteligência de negócios da empresa. A implementação deste sistema está sendo realizada por outras equipes do projeto e se encontra em fase avançada de desenvolvimento.

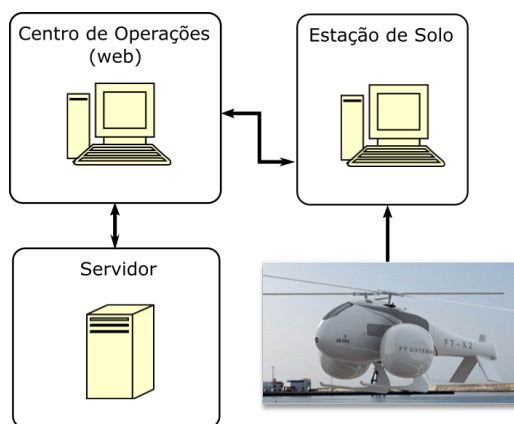


Figura 1. Arquitetura geral do sistema de inspeção automatizada

B. Metodologia Escalar

No universo que envolve linhas de transmissão adotou-se uma metodologia com etapas de processamento de inspeção distintas em relação às dimensões dos elementos de interesse. Primariamente são processados os macro elementos, como torres e construções, avançando, os objetos de referência, como cadeia de isoladores e ferragens, posteriormente, os pequenos objetos, como isoladores, ancoragens, parafusos, e, por fim, a investigação de detalhes, como rachaduras, ferrugem e engaiolamento.

A metodologia foi inspirada na função de Segmentação Multi Escalar [17], [18], utilizada em processamento de imagens de satélites. Na abordagem em desenvolvimento, ao invés de uma função que segmenta imagens em diferentes níveis de detalhamento, a proposta realiza localização e avaliação de elementos de diversas dimensões e detalhes. Uma representação

da metodologia é evidenciada na Figura 2. Já a Figura 3, explicita como o método escalar também se reflete na forma de interação com os técnicos do centro de operações, com informações visuais escalonadas por tamanho e detalhes dos objetos.

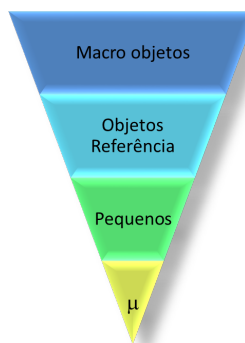


Figura 2. Metodologia multi-escalar de análise.

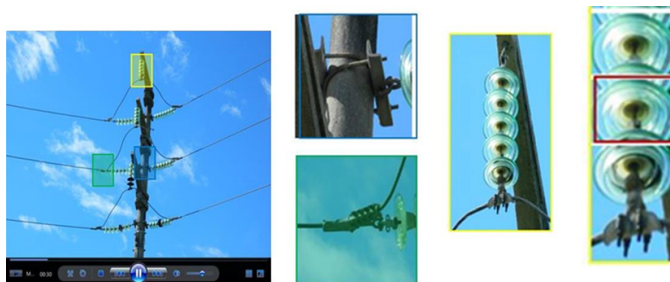


Figura 3. Exemplo de apresentação de componentes da linha de transmissão escalonada por tamanho e detalhes dos componentes.

III. SELEÇÃO DE MÉTODO DE RECONHECIMENTO DE OBJETOS

São apresentados aqui a revisão bibliográfica, a análise das técnicas já empregadas e os critérios de seleção necessários ao projeto em questão.

A. Técnicas de reconhecimento de componentes em linhas de transmissão de energia

Reconhecimento de objetos é etapa primordial no processamento e deve considerar a identificação e classificação de diversos tipos de componentes, os quais poderão sofrer alterações em suas características ao longo da vida do sistema. Técnicas que apresentem versatilidade e atributos genéricos, baseadas em aprendizagem de máquinas combinadas com extração de atributos como em [19], [14], [20], [15] e [16], podem reduzir tempo no desenvolvimento, possibilitar um processo simplificado de aplicação facilitando a transferência de tecnologia e treinamento pessoal, estas técnicas possuem aspectos vantajosos para projeto e podem atingir os objetivos almejados.

Dentre estas, Wu [19] reconhece cadeias de isoladores utilizando Support Vector Machine (SVM) como classificador, extração de atributos a partir de limiarização multinível,

proposta por Otsu, em 1979 (Wu [19], pag. 4), e da derivada da projeção horizontal e codificação em áreas de máximo e mínimo ao longo do eixo longitudinal das regiões do objeto. Sampedro [14] faz uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para classificação e extração de atributos por HOG [21] na localização e classificação de torres de linha de transmissão. Oberweger [20] propõe o reconhecimento e avaliação de cadeias de isoladores utilizando função baseada em SIFT [22], contudo, incorporando gradientes dos histogramas de cor e de orientação, sendo a classificação baseada em RNAs. Zhai [15] propõe, também para cadeias de isoladores, reconhecimento por Haar [23] com extrator de atributos baseado em Wavelet e classificador heurístico AdaBoost [24]. Mais recentemente, Liao [16] realiza o reconhecimento de cadeias de isoladores com extração de atributos por detector com base em Harris, descritor proposto por Oberweger [20] e classificador fundamentado em K-means e Spatial Orders Features (SOF).

Todos os trabalhos apresentam boa eficiência, com taxa de acerto entre 85% e 92%. No entanto, colocando em contexto os objetivos almejados, a proposta de Obeweger[20] exige matemática de complexidade excessiva para um processo simplificado. A solução de Zhai [15] requer grande quantidade de imagens e extenso período para treinamento. E, ainda que a técnica apresentada por Liai [16] demonstre eficiência, acaba por fugir do objetivo pela complexidade.

Os artigos de Wu [19] e Sampedro [14] utilizam classificadores SVM e RNAs, que possuem ampla adesão pela comunidade de desenvolvedores de software contribuindo para a transferência de tecnologia e agilidade do desenvolvimento das ferramentas. Para extração de atributos, Wu [19] desenvolveu um detector que depende da posição das imagens, considerando linhas horizontais e verticais, o que reduz a robustez da aplicação final. Sampedro [14], todavia, optou por utilizar HOG, que além de ser eficiente, influenciou o desenvolvimento de diversas outras técnicas como SIFT, SURF, ORB e FREAK.

B. Solução implementada

Considerando que as técnicas citadas possuem pequenas diferenças entre si relacionadas a eficiência, a escolha para o projeto recai sobre o aspecto da popularidade e simplicidade na implementação. Consequentemente, destacam-se SVM e RNA, como classificadores e HOG para extração de atributos. Estas são técnicas tradicionais e têm evoluído nos últimos anos, com destaque para SURF e Bag-of-Words (BoW) em substituição ao HOG na extração de atributos devida à maior eficácia. Apesar de amplamente utilizadas na área de reconhecimento de padrões, até o momento, SURF+BoW ainda não foram exploradas em aplicações específicas de reconhecimento de componentes de linhas de transmissão elétrica. Ainda que mencionada em Liai [16], a técnica BoW não será abordada neste trabalho.

O projeto iniciou um estudo adotando como base do sistema de reconhecimento um algoritmo que aplica extração de atributos através de SURF e BoW e realiza classificação dos componentes por SVM. A solução possibilitará o reconhecimento de diversos tipos de componentes e até o momento não

foram encontrados trabalhos que demonstrem aplicação destas técnicas em imagens de componentes de linhas de transmissão elétrica.

Foram implementadas as técnicas SURF, BoW e SVM utilizando a linguagem C++ e a biblioteca OpenCV [25], escolhida por possuir uma comunidade de desenvolvimento e colaboração ativa e proporcionar funcionalidades eficientes.

C. Testes

Testes verificaram o reconhecimento de três tipos de componentes: torres de alta tensão, cadeia de isoladores tipo ancoragem e suspensão. Para tanto foram realizadas sessões de reconhecimento, que compreendem: treinamento da ferramenta, com estímulos positivos e negativos, e, posteriormente, verificação. Todas as imagens foram recortadas manualmente de cenas aéreas reais, adquiridas para o teste, sendo que cenas de fundo foram utilizadas como estímulos negativos para todos os treinamentos. A tabela I apresenta a quantidade de imagens utilizadas para as etapas de treinamento e verificação do reconhecimento de componentes.

Cinco sessões de reconhecimento foram executadas: um reconhecimento multiclasse com dois tipos de cadeias de isoladores do tipo suspensão e ancoragem; reconhecimentos binários de cadeias de ancoragem, cadeias de suspensão e torres, com redução de dimensão das torres. Os dados de interesse coletados nestes testes foram: taxa de acerto (%), tamanho médio das imagens (kilo pixels) e tempo de processamento de reconhecimento por imagem (mSec), cujos resultados são apresentados na tabela II.

O método de estimação por retenção (holdout) estratificado foi utilizado para validação devido à quantidade limitada de dados (2/3 para treino e 1/3 para verificação).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O reconhecimento de Torres (tab. II, item 1) apresentou maior eficiência quanto à taxa de acerto comparado ao reconhecimento de cadeia de isoladores (tab. II, itens 3,4 e 5), fato esperado por possuir quantidade superior de imagens para treino que as demais sessões. Os tempos de processamento de torres (tab. II, itens 1 e 2) mostraram-se proporcionais ao tamanho das imagens, sem perda de eficiência, por sinal, comparável a mais alta taxa de acerto dentre os artigos citados, apresentada por Liai [16].

No reconhecimento de isoladores, quando executadas sessões que verificam dois tipos de cadeias (tab. II, item 3) tiveram sua eficiência de acerto um pouco reduzida se comparadas a sessões executadas separadamente com cada tipo de cadeia (tab. II, itens 4 e 5). Por outro lado, o tempo para reconhecimento foi menor que nas sessões executadas separadamente, apesar de tamanhos de imagens quase equivalentes.

Por fim, verifica-se que a ferramenta implementada possui características que podem satisfazer as necessidades do projeto, demonstrada sua capacidade de reconhecer com eficiência mais de um tipo de componente da linha de transmissão. O reconhecimento de outros tipos de componentes poderá ser alcançado sem necessidade de alterações ou adaptações no

Tabela I
QUANTIDADE DE IMAGENS UTILIZADAS PARA TREINAMENTO E VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO.

Imagem	Treinamento	Verificação
Torres	33	9
Fundos de cena (ref. torres)	50	12
Cadeias de suspensão	19	8
Cadeias de ancoragem	18	7
Fundos de cena (ref. cadeias)	29	8

Tabela II
RESULTADO DAS SESSÕES DE TESTE DE RECONHECIMENTO.

Sessão	Acerto (%)	Tamanho (k pixels)	Tempo proc. (mSec)
1 - Torres	91,3	327,4	897
2 - Torres reduzida	91,3	89,7	242
3 - Cadeias (susp. e ancor)	80,1	100,1	533
4 - Cadeias de suspensão	92,8	71,6	772
5 - Cadeias de ancoragem	85,7	112,4	719

código, bastando o treinamento da SVM utilizando a coleção de imagens positivas e negativas.

V. CONCLUSÕES

A ferramenta testada demonstrou ser precisa, flexível e compatível com a metodologia escalar, que permitirá sua aplicação genérica com outros componentes da linha de transmissão. Estes fatores são imprescindíveis na construção de um sistema que pretende evidenciar simples manutenção, descomplicada evolução e adaptação, tal como almejado por este projeto.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer às Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A - Celes e à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL pela importante participação como usuária e fomentadora, respectivamente, do projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Campoy, P. J. Garcia, A. Barrientos, J. d. Cerro, I. n. Aguirre, A. Roa, R. García, and J. M. Muñoz, "A stereoscopic vision system guiding an autonomous helicopter for overhead power cable inspection," in *Proceedings of the International Workshop on Robot Vision*, ser. RobVis '01. London, UK, UK: Springer-Verlag, 2001, pp. 115–124. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=646995.711264>
- [2] Z. Li, Y. Liu, R. A. Walker, R. F. Hayward, and J. Zhang, "Towards automatic power line detection for a uav surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved hough transform," *Machin Vision and Applications*, vol. 21, no. 5, pp. 677–686, September 2009. [Online]. Available: <http://eprints.qut.edu.au/29121/>
- [3] G. J. ADABO, "Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of brazilian electrical system," in *Auvsis's Unmanned Systems*, A. U. Systems, Ed., Washington, jul 2013.
- [4] C. Deng, S. Wang, Z. Huang, Z. Tan, and J. Liu, "Unmanned aerial vehicles for power line inspection: A cooperative way in platforms and communications," *JCM*, vol. 9, no. 9, pp. 687–692, 2014. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/jcm/jcm9.html#DengWHTL14>
- [5] A. Wronkowitz, "Concept of diagnostics of energy networks by means of vision system," *Diagnostyka*, vol. 15, no. 2, pp. 13–18, 2014.
- [6] Q. Wang, BoWen; Gu, "A detection method for transmission line insulators based on an improved fcm algorithm," *Universitas Ahmad Dahlan*, vol. 13, no. 1, mar 2015. [Online]. Available: <http://journal.uad.ac.id/index.php/TELKOMNIKA/article/view/1319>
- [7] A. electricity. (2016) Electricity transmission network operator austrian power grid ag (apg) uses the aibot x6 flying robot from aibotix to inspect overhead power lines more quickly and efficiently. Austrian electricity. [Online]. Available: <https://www.aibotix.com/en/apg-inspection-of-overhead-power-lines.html>
- [8] L. Weifang Freesky Aviation Industry Co. (2016) V750 unmanned helicopter system successfully completed ehv (extra high-voltage) power line patrol inspection. Weifang Freesky Aviation Industry Co., Lt. [Online]. Available: <http://www.v750sky.com/>
- [9] F. Company. (2016) Benefits of uav utility inspections. Finnish Company. [Online]. Available: <http://unmanned-aerial.com/finnish-company-demonstrates-benefits-of-uav-utility-inspections/>
- [10] C. I. Ltd. (2016) Close visual inspection of 100 transmission towers for sse as part of the east coast reinforcement project. CYBERHAWK Innovations Ltd. [Online]. Available: <http://www.thecyberhawk.com/2012/06/faster-safer-inspections/>
- [11] S. D. G. . E. Co. (2016) Unmanned aircraft to scout its southern california service area. San Diego Gas & Electric Co. [Online]. Available: <http://www.wsj.com/articles/utilities-turn-to-drones-to-inspect-power-lines-and-pipelines-1430881491>
- [12] W. Cao, X. Yang, L. Zhu, J. Han, and T. Wang, "Power line detection based on symmetric partial derivative distribution prior," in *2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), aug 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/ICInfA.2013.6720397>
- [13] A. V. H. S. B. P. RAJEEV, M; BHUJADE, "Detection of power-lines in complex natural surroundings," in *The Second International Conference on Information Technology Convergence and Services(ITCSE 2013)*, vol. 3, no. 9, Bangalore, dec 2013.
- [14] C. Sampedro, C. Martínez, A. Chauhan, and P. C. Cervera, "A supervised approach to electric tower detection and classification for power line inspection," in *IJCNN*. IEEE, 2014, pp. 1970–1977.
- [15] Y. C. H. Z. X. ZHAI, Y; WU, "A method of insulator detection from aerial images," *Sensors & Transducers*, vol. 177, no. 8, pp. 7–13, aug 2014.
- [16] S. Liao and J. An, "A robust insulator detection algorithm based on local features and spatial orders for aerial images," *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 963–967, 2015. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/lgrs/lgrs12.html#LiaoA15>
- [17] A. Goshtasby, "Multiple-scale segmentation and representation of solid plane shapes," *CVPR*, vol. 86, pp. 351–356, 2003.
- [18] C. Burnett and T. Blaschke, "A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis," *Ecological Modelling*, vol. 168, no. 3, pp. 233–249, Oct. 2003. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VBS-493HNTG-1/2/ecfab015c71d8eb69dbf1d0ac1422b2e>
- [19] D. L. Wu, B. F. Li, W. T. Li, Y. Xia, and Y. D. Tang, *A Vision-Based System for Power Transmission Facilities Detection*, Std., sep 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.2547>
- [20] A. B. H. OBERWEGER, M; WENDEL, "Visual recognition and fault detection for power line insulators," in *Proceedings of the Computer Vision Winter Workshop*, Z. Kukulova and J. Heller, Eds., Krtiny, Czech Republic, feb 2014, pp. 3–5.
- [21] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," in *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Volume 1 - Volume 01*, ser. CVPR '05. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005, pp. 886–893. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>
- [22] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, Nov. 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- [23] P. Viola and M. Jones, "Robust real-time object detection," in *International Journal of Computer Vision*, 2001.
- [24] Y. Freund and R. E. Schapire, "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting," *J. Comput. Syst. Sci.*, vol. 55, no. 1, pp. 119–139, Aug. 1997. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1006/jcss.1997.1504>
- [25] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. Cambridge, MA: O'Reilly, 2008.