



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**SEGMENTAÇÃO DE FAIXA DE SERVIDÃO EM LINHA DE
TRANSMISSÃO POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL**

Lucas Angelo Soares Bezerra

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil**

2022

Lucas Angelo Soares Bezerra

**SEGMENTAÇÃO DE FAIXA DE SERVIDÃO EM LINHA DE
TRANSMISSÃO POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Pessin, D.Sc.

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B574s Bezerra, Lucas Angelo Soares.

Segmentação de faixa de servidão em linha de transmissão por meio de visão computacional. [manuscrito] / Lucas Angelo Soares Bezerra. 2022.
75 f. : il. : color..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Pessin.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Vegetação - Mapeamento. 2. Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). 3. Imagens como recursos de informação. 4. Tecnologia - Visão Computacional. I. Pessin, Gustavo. II. Universidade Federal de Ouro Preto.

III. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.
PROCESSOS DE MIN.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Angelo Soares Bezerra

Segmentação de faixa de servidão em linha de transmissão por meio de visão computacional

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

Aprovada em 05 de setembro de 2022

Membros da banca

Doutor - Gustavo Pessin - Orientador - Instituto Tecnológico Vale
Doutora - Andrea Gomes Campos Bianchi - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Jefferson Rodrigo de Souza - Universidade Federal de Uberlândia

Gustavo Pessin, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 16/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Saul Emanuel Delabrida Silva, VICE-COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONT. E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 18/11/2022, às 19:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0428357** e o código CRC **EFAD7ABB**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.015574/2022-93

SEI nº 0428357

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3552-7352 - www.ufop.br

*Dedico o esforço empenhado nesse
trabalho ao meu irmão Fabrizio.*

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis. Aos meus orientadores que sempre me apoiaram e mostraram os caminhos para êxito neste trabalho. A todos os professores ao longo desse curso, que dedicaram seu tempo para disseminação do conhecimento. Aos meus colegas do curso, onde compartilhamos bons momentos de troca de conhecimento e parcerias. À toda equipe do Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Instituto Tecnológico Vale (ITV), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) que participaram deste processo de formação. Aos membros da banca, que dedicaram seu tempo para somar e avaliar este trabalho. Aos meus amigos da Vale SA, que incentivaram de forma direta ou indireta para que fosse possível a realização deste curso.

*“A persistência é o menor
caminho do êxito” (Charles
Chaplin).*

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SEGMENTAÇÃO DE FAIXA DE SERVIDÃO EM LINHA DE TRANSMISSÃO POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL

Lucas Angelo Soares Bezerra

Setembro, 2022

Orientadores: Prof. Gustavo Pessin, D.Sc

Este trabalho propõe um sistema de detecção automática por meio de visão computacional da faixa de servidão da linha de transmissão de 230 kV que alimenta o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira na cidade de São Luís, Maranhão. A aquisição das imagens e vídeos foi realizada com o uso de um VANT. Esses dados foram analisados pelo sistema desenvolvido no presente trabalho e obteve-se com sucesso a segmentação da faixa de servidão, possibilitando a análise apenas da região de interesse, o que reduz o esforço computacional e permite a utilização de técnicas mais simples para detecção de vegetação na região.

Palavras-chave: Vegetação, VANT, Imagens, Visão Computacional.

Macrotema: Logística; **Linha de Pesquisa:** Análise e Projeto de Sistemas de Controle Avançado; **Tema:** Inspeção Automática de Ativos.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SEGMENTATION BAND OF SERVITUDE IN TRANSMISSION LINE THROUGH COMPUTATIONAL VISION

Lucas Angelo Soares Bezerra

September, 2022

Advisors: Prof. Gustavo Pessin, D.Sc

This work proposes an automatic detection system through computer vision of the band servitude of the 230 kV transmission line that supplies the Ponta da Madeira Maritime Terminal in the city of São Luís, Maranhão. The acquisition of images and videos was performed using a VANT. These data were analyzed by the system developed in the present work and the segmentation of the band servitude was successfully obtained, allowing the analysis of only the region of interest, which reduces the computational effort and allows the use of simpler techniques for detecting vegetation in the region.

Keywords: Vegetation, VANT, Images, Computer Vision.

Macrotheme: Logistics; **Research Line:** Analysis and Design of Advanced Control Systems;

Theme: Automatic Asset Inspection.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Inspeção em torre e LT com uso de um VANT.....	16
Figura 1.2: Teste de condução com vegetação.	17
Figura 1.3: Inspeção em torre de LT com uso de um VANT.....	18
Figura 1.4: Ilustração do mapeamento de componentes de uma rede elétrica.	19
Figura 2.1: Exemplo de linhas de transmissão.	22
Figura 2.2: Esquema básico do abastecimento de energia elétrica no TPM.....	23
Figura 3.1: Comparação entre visão humana e visão computacional.	24
Figura 3.2: (a) Imagem em tons de cinza; (b) Histograma de uma imagem (434 por 507 pixels) em tons de cinza.	25
Figura 3.3: (a) Imagem para obtenção de histograma; (b) Exemplo de histograma RGB.	25
Figura 3.4: (a) Imagem original; (b) Tom de cinza da imagem original; (c) Segmentação binária com limiar em 124.	26
Figura 3.5: (a) Imagem em tom de cinza; (b) Exemplo de segmentação binária com limiar em 150.....	27
Figura 3.6: (a) Imagem original; (b) Método de Otsu para busca de limiar ótimo.	27
Figura 3.7: (a) Imagem original; (b) Detecção de borda pelo método de Marr e Hildreth.....	28
Figura 3.8: (a) Imagem original; (b) Exemplo de detecção de bordas de Canny.....	28
Figura 3.9: Diagrama de blocos para a TH.	29
Figura 3.10: (a) Um conjunto de pontos colineares no plano da imagem; (b) Linhas retas concorrentes no espaço de paramétrico quando a parametrização do intercepto e inclinação das retas é usada; (c) Conjunto de curvas senoidais no espaço paramétrico após a parametrização $\rho - \theta$ ser utilizada.	30
Figura 3.11: (a) Imagem em tom de cinza; (b) Detecção de bordas de Canny; (c) Detecção de linhas pela TH.....	31

Figura 4.1: Classificação de plantas usando redes neurais convolucionais.	33
Figura 4.2: Máscara para segmentação de vegetação de interesse.	33
Figura 4.3: Identificação de altura de vegetação por meio de visão computacional.	34
Figura 4.4: Classificação de plantas.....	35
Figura 4.5: Segmentação da vegetação em um centro urbano.	35
Figura 4.6: Faixa de servidão de uma LT.....	36
Figura 5.1: VANT Mavic 2 Pro.....	37
Figura 5.2: VANT capturando faixa de servidão entre duas torres.	38
Figura 5.3: Duas torres consecutivas com VANT a 50 metros de altura.....	38
Figura 5.4: Duas torres consecutivas com VANT a 80 metros de altura.....	39
Figura 5.5: Representação da vista superior da LT com VANT a 50 metros de altura.	39
Figura 5.6: Vista superior da LT com VANT a 50 metros de altura.	40
Figura 5.7: Delimitação da faixa de servidão entre as linhas azuis.	42
Figura 5.8: Passo a passo para obtenção da delimitação da faixa de servidão.....	42
Figura 6.1: Detecção de bordas de Canny.....	43
Figura 6.2: Identificação de linhas pela TH.	44
Figura 6.3: Vista superior de trecho da LT.	44
Figura 6.4: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.	45
Figura 6.5: Vista superior de trecho da LT.	45
Figura 6.6: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.	46
Figura 6.7: Vista superior de trecho da LT.	46
Figura 6.8: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.	47
Figura 6.9: Vista superior de trecho da LT.	47
Figura 6.10: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.	48

Figura 6.11: Vista superior de trecho da LT.	48
Figura 6.12: Segmentação da faixa de servidão com corte da imagem original.	49
Figura 6.13: Vista superior de trecho da LT.	49
Figura 6.14: Segmentação da faixa de servidão com corte da imagem original.	50
Figura 6.15: Vista superior de trecho da LT.	50
Figura 6.16: Segmentação da faixa de servidão com corte da imagem original.	51
Figura 6.17: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul obtida de um vídeo da LT.....	51
Figura 6.18: Segmentação da faixa de servidão com corte de um vídeo da LT.....	52
Figura 6.19: Histograma da Figura 5.3 em tom de cinza.	54
Figura 6.20: Figura 5.3 em tom de cinza.....	54
Figura 6.21: Destaque para faixa de servidão da Figura 5.6.	55
Figura 6.22: Histograma para a faixa de servidão da Figura 5.6 em tom de cinza.....	55
Figura 6.23: Limiarização da Figura 5.3 com limiar 100.	56
Figura 6.24: Formas detectadas pela TH.....	56
Figura 6.25: Limiarização da Figura 5.3 com limiar 200.	57
Figura 6.26: Formas detectadas pela TH.....	57
Figura 6.27: Limiarização da Figura 5.6 com limiar 100.	58
Figura 6.28: Formas detectadas pela TH.....	58
Figura 6.29: Limiarização pelo método de Otsu, com limiar em 129 da Figura 5.3.....	59
Figura 6.30: Formas detectadas pela TH.....	59
Figura 6.31: Detecção de bordas de Marr e Hildreth.....	60
Figura 6.32: Formas detectadas pela TH.....	60
Figura 6.33: Detecção de bordas de Canny.....	61
Figura 6.34: Identificação de linhas pela TH.	61

Figura 6.35: Limiarização pelo método de Otsu, com limiar em 75.	62
Figura 6.36: Formas detectadas pela TH.....	62
Figura 6.37: Detecção de bordas de Marr e Hildreth.....	63
Figura 6.38: Formas detectadas pela TH.....	63
Figura 6.39: Comparação entre os testes realizados, preparando a imagem para a TH.	64
Figura 6.40: Vista superior de trecho da LT.	64
Figura 6.41: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.	65

Lista de Siglas e Abreviaturas

LT: Linha de Transmissão.

VANT's: Veículos Aéreos Não Tripulados.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

TMPM: Terminal Marítimo Ponta da Madeira.

NBR: Norma Brasileira.

TH: Transformada de Hough.

Sumário

1	Introdução.....	16
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Contribuições	20
2	Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica	21
3	Visão computacional.....	24
3.1	Histogramas de imagens	24
3.2	Segmentação de objetos em imagens	26
3.3	Segmentação por limiarização adaptativa.....	27
3.4	Transformada de Hough	29
4	Trabalhos relacionados a segmentação de vegetação usando visão computacional	32
5	Materiais e Métodos	37
5.1	Área de estudo	37
5.2	VANT utilizado para aquisição das imagens.....	37
5.3	Aquisição dos dados	37
5.4	Metodologia	40
5.4.1	Método baseado na limiarização binária.....	41
5.4.2	Método baseado na limiarização adaptativa.....	41
5.4.3	Delimitação da faixa de servidão.....	41
6	Resultados	43
6.1	Modelo proposto baseado em Canny e Transformada de Hough	43
6.2	Discussão sobre os resultados	52
6.3	Lições aprendidas	53

6.3.1	Testes baseados na obtenção de histogramas das imagens	53
6.3.2	Testes baseados em limiarização binária	55
6.3.3	Testes baseados em limiarização adaptativa	58
6.4	Teste bem-sucedido	64
7	Conclusão.....	66
8	Trabalhos futuros.....	67
	Referências	68
	APÊNDICE A – Código para segmentação da faixa de servidão com destaque em azul	71
	APÊNDICE B – Código para segmentação da faixa de servidão com corte da imagem.	72
	APÊNDICE C – Código para segmentação da faixa de servidão a partir de vídeo com destaque em azul.....	73
	APÊNDICE D – Código para segmentação da faixa de servidão com corte do vídeo.....	74

1 Introdução

A eletricidade é um dos pilares da indústria moderna, sem ela as atividades se tornam mais caras e menos produtivas. O TMPM é um dos portos da Vale S/A para exportação de minério de ferro e possui uma linha de transmissão (ou LT) de 230 kV que garante o fornecimento de energia elétrica. Essa LT possui cinquenta e uma torres distribuídas ao longo de vinte e um quilômetros.

A maneira habitual de se realizar inspeções no sistema elétrico era restrita ao que se conseguia observar do chão, escalando as torres ou mesmo usando helicópteros, que de forma geral ou eram imprecisas, inseguras ou com custo financeiro elevado, respectivamente.

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), comumente chamados de drones, conforme pode ser visto na Figura 1.1, tornou as inspeções mais eficientes, seguras e baratas. Normalmente, após a inspeção, algumas imagens e vídeos são revisitadas para tirar dúvidas sobre determinadas situações.



Figura 1.1: Inspeção em torre e LT com uso de um VANT.

Fonte: Autor.

Durante a inspeção são observadas as condições da torre e seus componentes, da LT e do seu entorno, sendo que esse entorno é composto pela faixa de servidão e acesso às torres. A faixa de servidão é uma região logo abaixo da LT que deve estar isenta de vegetações ou qualquer construção que venha oferecer risco de uma fuga de tensão para a terra. Quanto às torres da LT, os principais itens observados são as condições das estruturas metálicas que a

compõem, dos isoladores, dos cabos, níveis de oxidação das ferragens de suporte e identificação. Com relação a faixa de servidão, o objetivo é identificar se há vegetação que comprometa a eficácia dessa faixa, construção de outras redes elétricas abaixo ou acima da LT, bem como a verificação das condições dos acessos às torres para veículos.

Ma (2020) afirma que apesar de não ser condutora, a vegetação pode facilitar a ionização do ar e possibilitar um curto-circuito entre fase-terra ou fase-fase, como pode ser observado na Figura 1.2. Por isso o controle de altura dessa vegetação é importante para reduzir o risco de desligamentos da LT.



Figura 1.2: Teste de condução com vegetação.

Fonte: MA, 2020.

Neste trabalho foi dado foco nas condições da vegetação na faixa de servidão, que é o espaço de terra transversal ao eixo da LT, cuja largura depende diretamente do nível de tensão e das características construtivas. No caso da LT do TMPM, a tensão é de 230 kV. Conforme NBR 5422:1985 da ABNT, para este nível de tensão, a faixa de servidão tem de possuir largura de pelo menos 35 metros. Dessa forma, será verificada a largura de segurança com uso de visão computacional.

Nessas inspeções, existe também um risco de segurança, pois a LT passa por dentro de comunidades, e porventura algumas pessoas se sentem “ameaçadas” pela presença da equipe de inspeção, acreditando que elas estejam ali por motivos de desapropriação ou algo do tipo, dessa forma, quanto menor o período de permanência da equipe realizando inspeções ao longo da LT, mais segura se torna a atividade e o uso de VANT reduz bastante essa exposição, pois o inspetor se posiciona num local adequado enquanto realiza as atividades.

A instalação da LT deverá seguir as recomendações para a limpeza da faixa de servidão expressas na NBR-5422:1985, com o desmatamento limitando-se apenas ao necessário para garantir a instalação e operação segura do empreendimento.

Os VANT's vêm se popularizando cada vez. Eles têm aplicações e praticamente todos os ramos e está cada vez mais inserido na rotina da sociedade.

O uso de VANT's no TPM é recente e possibilitou uma melhoria no processo de inspeção. Na Figura 1.3 observa-se a utilização de um VANT para inspeção na torre da LT. Seu uso foi estendido para a LT, tornando as inspeções mais rápidas e a identificação de problemas mais precisa, pois ele possui uma câmera de alta resolução e pode chegar com segurança a alguns metros dela.



Figura 1.3: Inspeção em torre de LT com uso de um VANT.

Fonte: Autor.

Os VANT's normalmente são equipamentos operados por rádio controle e que possuem uma câmera acoplada a eles permitindo a observação dessas imagens em tempo real através de um dispositivo (celular, tablet ou similar) fixado ao seu rádio controle. Os custos do VANT, mesmo os modelos mais caros e robustos, são pequenos se comparados com a perdas por um desligamento da LT.

Um exemplo para aplicação do mapeamento de componentes pode ser visto na Figura 1.4, onde utilizam-se métodos baseados em aprendizagem profunda de máquinas para a classificação e detecção dos componentes de uma rede de distribuição (Nguyen, 2018).



Figura 1.4: Ilustração do mapeamento de componentes de uma rede elétrica.

Fonte: NGUYEN, 2018.

1.1 Motivação

Todas as atividades realizadas no TPM são diretamente impactadas durante a ausência de energia elétrica, ou seja, caso ocorra qualquer problema na LT todo o processo produtivo é paralisado e o prejuízo financeiro é significativo.

Como o TPM possui apenas uma LT, as inspeções e manutenções preventivas são realizadas com frequência com o intuito de reduzir a zero as manutenções corretivas. As inspeções realizadas na LT geram ações para que as manutenções preventivas sejam realizadas, evitando assim a falta de energia elétrica. Porém, se a inspeção for deficiente, um determinado problema que não foi identificado pode vir a gerar uma falta de energia elétrica. Dessa forma, quanto mais criteriosas forem as inspeções e quanto mais ricas em detalhes, maior a confiabilidade da rede de abastecimento de energia elétrica.

Uma das condições que pode vir a gerar uma falta de energia elétrica é o crescimento desordenado de vegetação na região da faixa de servidão. Quando essa vegetação se torna criticamente próxima dos condutores, pode gerar uma fuga de corrente para terra (ou entre fases) e, conseqüentemente, desligamento da rede por parte do sistema de proteção.

Por isso a identificação precoce de vegetação na faixa de servidão facilita seu controle quanto reduz a possibilidade de impactos operacionais por desligamento do TPM.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo realizar a segmentação por meio de visão computacional da região denominada de faixa de servidão da LT do TPM. Para segmentação da faixa de servidão, é necessário identificar os condutores da LT, uma vez identificados, será possível calcular essa região.

Os objetivos específicos propostos são:

- Investigar e desenvolver técnicas de visão computacional para segmentação da faixa de servidão de tal forma que independente da altura do VANT, dentro de um intervalo pré-estabelecido, a região delimitada tenha aproximadamente 35 metros;
- Avaliar e definir da técnica de visão computacional mais apropriada para segmentação da faixa de servidão;
- Aquisição de vídeos e imagens com auxílio de VANT's para formação do banco de dados do estudo.
- Disponibilizar os códigos desenvolvidos para aplicação posterior na análise de vegetação ou mesmo outras condições nessa região.

1.3 Contribuições

Como **contribuição científica** do trabalho é a investigação e proposta de protocolo de segmentação que fará a segmentação da faixa de servidão da LT de 230 kV.

Como **contribuição técnica** do trabalho é o desenvolvimento e disponibilidade de um código que fará a segmentação da faixa de servidão da LT de 230 kV. Com esse código realizando a análise das imagens e vídeos, a região da faixa de servidão será identificada sem margem para dúvidas.

Como **contribuição industrial** a aplicação da segmentação de faixa de servidão pode facilitar a identificação de vegetação dentro da faixa de servidão da LT de 230 kV e pode tornar a rede de abastecimento de energia elétrica mais confiável, podendo diminuir riscos de impactos operacionais no TPM em São Luís, Maranhão, bem como em outras LT que possuem faixas de servidão semelhantes.

2 Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica

Um sistema elétrico de potência tem a função precípua de suprir os consumidores, grandes ou pequenos, fornecendo-lhes, no instante desejado, a energia elétrica na quantidade demandada com a qualidade adequada (ROBBA, 2020).

A Vale S/A é mineradora que usa amplamente a eletricidade em suas operações para garantir o fornecimento de minério de ferro para seus clientes.

Um sistema elétrico de potência abrange desde a etapa de geração de energia até a sua distribuição ao consumidor final. De forma resumida podem ser destacadas a geração, transmissão e a distribuição de energia elétrica.

A geração de energia elétrica consiste em converter alguma outra forma de energia em eletricidade (ROBBA, 2020).

Um dos métodos mais tradicionais de se gerar eletricidade é por meio de hidrelétricas. Nesse método, a energia potencial armazenada por um grande volume de água é usada para geração da energia. Outra maneira muito utilizada para obtenção de energia elétrica é por meio das usinas nucleares. Nelas, é realizado o processo de fissão nuclear e esse calor é usado para aquecer água, que gera vapor e a pressão desse vapor move turbinas.

Barros (2014) menciona que a obtenção de energia elétrica também pode ser realizada por meio de termoelétricas e que nelas um combustível mineral é queimado para aquecer a água, gerando vapor que move turbinas acopladas a geradores de energia elétrica.

Pinto (2018) afirma que outra maneira que vem sendo cada mais popularizada é a geração de energia por meio da luz emitida pelo Sol. Nela utilizam-se painéis solares para converterem a energia do sol em eletricidade. Segundo Robba (2020) outras formas de energia mais limpas também estão sendo muito utilizadas atualmente, como parques eólicos que convertem a força gerada pelo vento em eletricidade e maremotrizes, que convertem o deslocamento da água em energia elétrica.

De acordo com Pinto (2018), existem várias maneiras de se produzir eletricidade, mas quando se fala em produção em larga escala, geralmente há necessidade de transmitir essa energia de um ponto a outro de forma eficiente. A LT é um dos principais componentes de um sistema elétrico de potência. A transmissão da energia é normalmente feita por meio de linhas

de transmissão e com tensões que podem superar os 500 mil Volts (ou 500 kV). Na Figura 2.1, observam-se linhas de transmissão que operam com tensões de 500 kV.



Figura 2.1: Exemplo de linhas de transmissão.

Fonte: <https://clickpetroleogas.com.br/investimento-bilionario-ate-2025-r-128-bilhoes-serao-investidos-em-linhas-de-transmissao-em-todo-o-brasil/>

Barros (2014) comenta que a energia é transmitida por meio de cabos condutores, cada cabo representa uma fase do sistema trifásico. Quanto maior o nível de tensão, maior o cuidado com o isolamento da LT, visto que nem é necessário tocar diretamente na rede elétrica para que o ar seja ionizado e se tenha uma fuga de corrente para terra.

Os cabos de fase da linha, quando energizados, provocam, no meio em que se encontram, efeitos eletromagnéticos, dos quais, dentre outros, destacam-se os campos elétrico e magnético, a rádio interferência, o ruído audível, entre outros. Sendo assim, a fim de se evitar riscos à segurança da linha, de eventuais obstáculos existentes ao longo do seu caminhamento ou até mesmo a exposição humana a esses efeitos, é necessário que essas linhas sejam instaladas dentro de uma área de terra, com uma largura definida, denominada faixa de segurança, que também é conhecida por faixa de passagem e pode ser de domínio ou de servidão (ROBBA, 2020).

Para garantir que não haja fuga de corrente dos condutores para algo que está no solo ou do solo que possibilite essa fuga entre os próprios condutores, é definida uma área paralela à LT (faixa de segurança ou servidão) com uma largura que depende de alguns fatores que são detalhados na NBR 5422:1985. Essa área deve ser livre de vegetações e ocupações (PINTO, 2018).

Para a LT do TMPM, levando em consideração as características das torres que suportam essa linha e do relevo por onde ela passa, a faixa de servidão é de 35 metros em toda sua extensão, conforme orientações da NBR 5422:1985.

A LT que fornece energia elétrica para o TMPM é disponibilizada pela Eletronorte, subestação São Luís II. A subestação SE-381K-A (dentro do TMPM) recebe a tensão de 230 kV, conforme Figura 2.2, reduzindo e distribuindo-a para as subestações espalhadas na área do TMPM, cada uma com sua finalidade e cargas consumidoras.

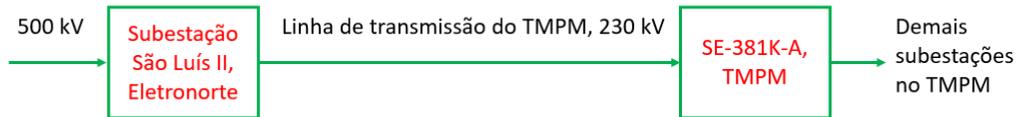


Figura 2.2: Esquema básico do abastecimento de energia elétrica no TMPM.

Fonte: Autor.

Dessa forma, um foco especial é dado na SE-381K-A e na sua LT, visto que se houver algum problema em uma delas, todo o TMPM será impactado.

Barros (2014) explica que após percorrer a extensão geográfica existente entre a geração e os centros consumidores por meio das linhas de transmissão, a energia elétrica chega às subestações que rebaixam os níveis de tensão utilizados na transmissão, permitindo, assim, que seja iniciada a etapa de distribuição.

A distribuição da energia elétrica consiste em garantir que a tensão seja entregue ao cliente final nos níveis adequados. Esse rebaixamento é realizado por meio de subestações. No TMPM, há equipamentos que operam nos mais diversos níveis de tensão, sendo o maior deles, motores que operam com tensão de 4.16 kV.

3 Visão computacional

Para um ser humano o ato de observar o mundo a sua volta, estimar a posição dos objetos, assim como suas cores, tamanhos e outras informações adicionais são simples e rotineiras, porém, desenvolver um sistema que faz algo semelhante é extremamente complexo.

A visão computacional replica a visão humana (ver Figura 3.1), onde são usados hardwares e softwares para obtenção e tratamento das imagens.



Figura 3.1: Comparação entre visão humana e visão computacional.

Fonte: Autor.

3.1 Histogramas de imagens

O histograma de uma imagem faz parte do pré-processamento de uma imagem, através dele observa-se a distribuição da intensidade luminosa contida nesta imagem, bem como contraste dela. Ele indica a distribuição da frequência dos pixels em função das tonalidades da imagem (colorida ou tons de cinza), sendo o pixel a menor parte de uma imagem digital. No exemplo mostrado na Figura 3.2(b), determinou-se o valor 0 (eixo horizontal) como sendo os pixels mais escuros e 255 o valor para os pixels mais claros. Pelo histograma da Figura 3.2(a), constata-se que a maior parte dos pixels possuem uma tonalidade mais clara ou muito clara, acima de 125.

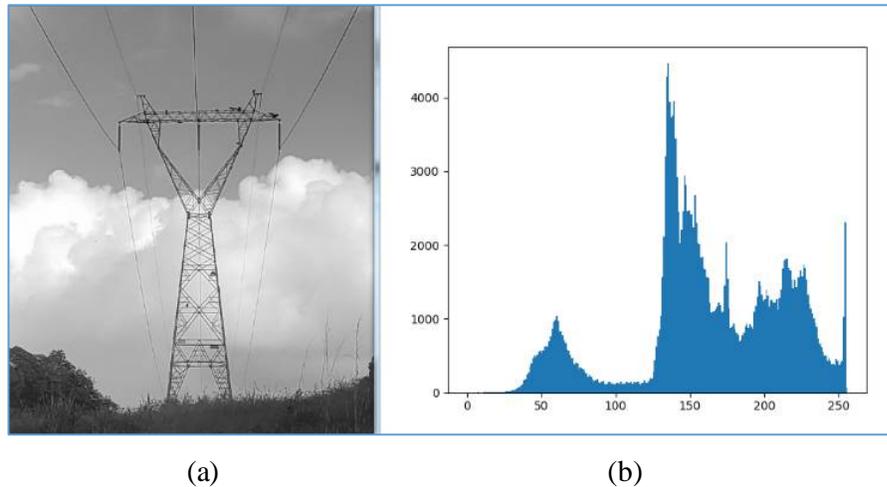


Figura 3.2: (a) Imagem em tons de cinza; (b) Histograma de uma imagem (434 por 507 pixels) em tons de cinza.

Fonte: Autor.

Com auxílio do histograma, pode-se determinar um limiar, que nada mais é um valor contido no intervalo de 0 a 255, em seguida realizar uma segmentação, onde todos os valores abaixo desse limiar podem ser ressaltados como escuro e todos os valores acima desse limiar podem ser ressaltados como branco.

O mesmo pode ser aplicado para o padrão de cores RGB (*Red, Green e Blue*). Esse padrão nada mais é do que uma representação da imagem em tons de vermelho, verde e azul e com cada uma dessas três cores possuindo 256 tons. O histograma para o padrão de cores RGB nada mais é do que a sobreposição de 3 histogramas, um em tom de vermelho, outro em tom de verde e o último em tom de azul, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

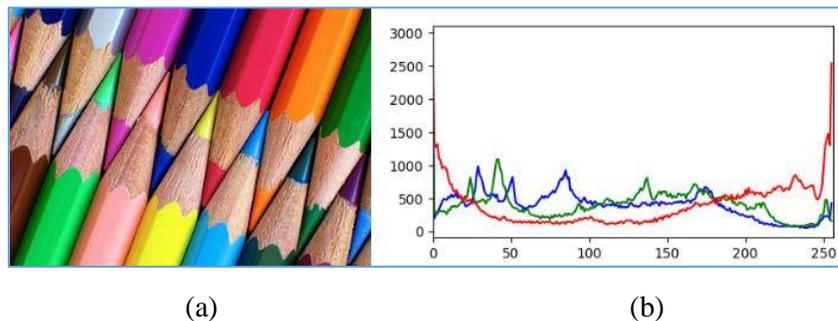


Figura 3.3: (a) Imagem para obtenção de histograma; (b) Exemplo de histograma RGB.

Fonte: (a) <http://pereiraluibastos2009.blogspot.com/2012/11/>; (b) Autor

3.2 Segmentação de objetos em imagens

A segmentação consiste em separar os objetos de interesse na imagem para uma posterior extração de características. Por meio da segmentação consegue-se obter características do objeto para que ele seja classificado e então uma tomada de decisão pode ser efetuada.

A segmentação por limiarização binária é uma técnica que consiste separar dois grupos distintos de cores em uma imagem. Observando o histograma da Figura 3.4(a), determinou-se o valor 124 para ser o limiar dessa segmentação, pois ele representa um ponto de convergência entre os tons mais escuros e os mais claros, ou seja, todos os pixels com tonalidade abaixo de 124 serão convertidos em 0 (preto) e todos os pixels maiores ou iguais a 124 assumirão valor 255 (branco) e o resultado pode ser visto na Figura 3.4(c).

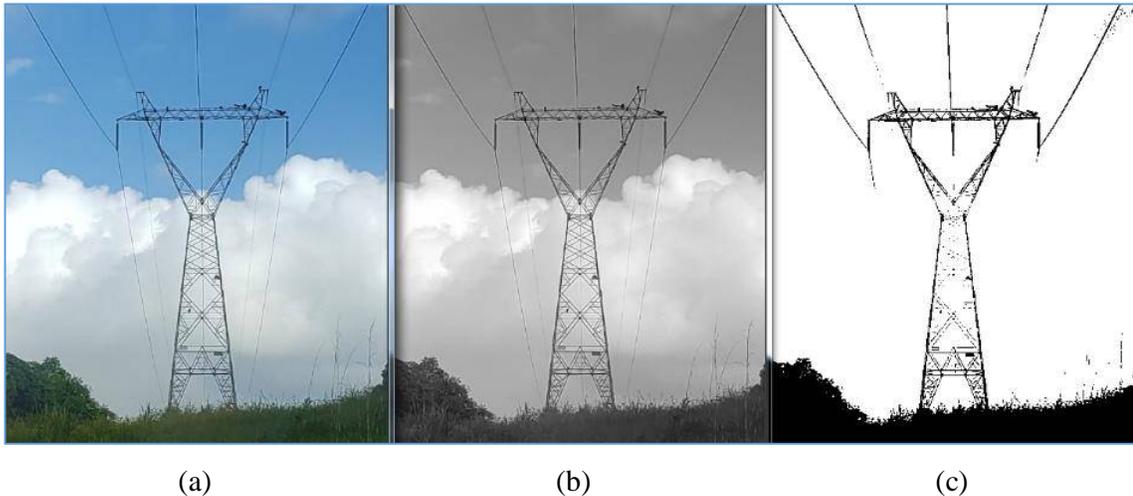
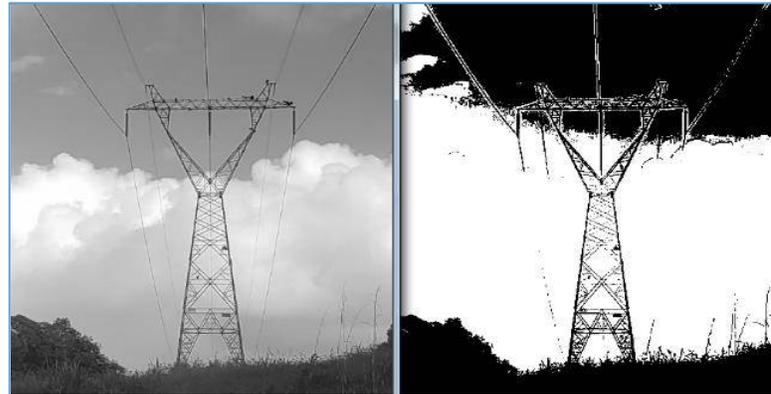


Figura 3.4: (a) Imagem original; (b) Tom de cinza da imagem original; (c) Segmentação binária com limiar em 124.

Fonte: Autor.

Adotando-se um novo limiar em 150, o resultado pode ser observado na Figura 3.5(b), observa-se que o resultado não gera destaque para a torre de transmissão.



(a)

(b)

Figura 3.5: (a) Imagem em tom de cinza; (b) Exemplo de segmentação binária com limiar em 150.

Fonte: Autor.

3.3 Segmentação por limiarização adaptativa

Na limiarização adaptativa algumas técnicas são aplicadas para análise de aspectos da imagem para obtenção de um limiar ótimo.

No método de Otsu, ele sugere que minimizando a soma das variâncias entre classes do plano de imagem e de fundo, é possível encontrar um limiar ótimo para aquela imagem. Ao aplicar o método de Otsu na Figura 3.6(a), o resultado do limiar é 167 e imagem binária pode ser vista na Figura 3.6(b).



(a)

(b)

Figura 3.6: (a) Imagem original; (b) Método de Otsu para busca de limiar ótimo.

Fonte: Autor.

Segundo Tenório (2013) a detecção de borda de Marr e Hildreth leva em consideração que as mudanças de intensidades não são independentes da escala da imagem e, portanto, sua

detecção requer o uso de operadores de diferentes tamanhos, assim como mudanças bruscas de intensidade dão origem a um pico ou a um vale na primeira derivada, ou a um cruzamento por zero da segunda derivada, aplicando um filtro com um operador Laplaciano e uma função Gaussiana. O resultado dessa detecção de borda pode ser visto na Figura 3.7(b).



(a)

(b)

Figura 3.7: (a) Imagem original; (b) Detecção de borda pelo método de Marr e Hildreth.

Fonte: Autor.

A detecção de bordas de Canny é baseada em uma lista de critérios para a identificação, sendo elas a boa detecção, boa localização e resposta mínima. O detector de Canny realiza o filtro da imagem através do gradiente usando um operador de primeira ordem com o intuito de atenuar o ruído. Na Figura 3.8(b) nota-se a qualidade da segmentação, com linhas bem definidas.



(a)

(b)

Figura 3.8: (a) Imagem original; (b) Exemplo de detecção de bordas de Canny.

Fonte: Autor.

3.4 Transformada de Hough

A identificação de linhas e a detecção de formas é um desafio para a análise automatizada de imagens digitais. Um método chamado de TH foi patenteado em 1962 por P. V. C Hough, enquanto tentava detectar e traçar os rastros de partículas subatômicas em fotografias de câmara de bolhas. Em geral, a transformada é aplicada após a imagem sofrer um pré-processamento, comumente a detecção de bordas. Este método, basicamente, converte um problema de detecção de curva global em um problema de detecção de pico eficiente em um espaço paramétrico, o que diminui a exigência computacional para a busca direta e a detecção de uma classe de padrões geométricos simples, como linhas retas, círculos e elipses em uma imagem, além de atenuar a oclusão de curvas ou pixels de dados ausentes e incertos devido ao ruído decorrente da imperfeição dos dados da imagem ou do detector de bordas.

Mukhopadhyay (2015) enfatiza que a literatura disponível sobre TH é bastante vasta e em seu estudo tentou expor e detalhar os aspectos mais relevantes para beneficiar a comunidade de pesquisadores com ferramenta. No seu estudo foi feito um levantamento do método e suas variações, limitações, modificações usadas para otimizá-lo e os detalhes para implementação em software e hardware em aplicações diversas. Ele afirma que a transformação é feita em uma imagem binária, obtida após o processamento da imagem original por um detector de bordas. O espaço paramétrico é quantificado em intervalos específicos e os bins (intersecções) correspondentes são criados para coletar a evidência (ou voto) dos pixels do objeto que satisfazem a equação paramétrica da linha do intercepto e da inclinação da reta. Na fase de detecção de pico, os bins com número de votos acima de um limite crítico correspondem a linhas retas na imagem. A Figura 3.9 representa o diagrama de blocos da TH para curvas parametrizadas.

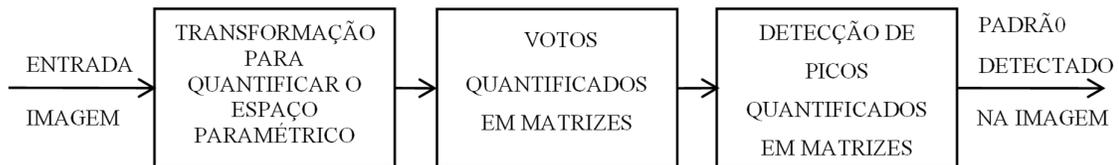


Figura 3.9: Diagrama de blocos para a TH.

Fonte: MUKHOPADHYAY, 2015.

Já a Figura 3.10 ilustra a representação gráfica da TH, onde é usada uma parametrização do tipo $\rho - \theta$ a qual converte um ponto no espaço da imagem para uma curva senoidal no espaço de paramétrico.

Esta parametrização é dada pela função $f(x,y) = \rho(\theta) = x\cos(\theta) + y\sin(\theta)$ a qual tem um período de 2π dado pela relação $\rho(\theta) = -\rho(\theta + \pi)$.

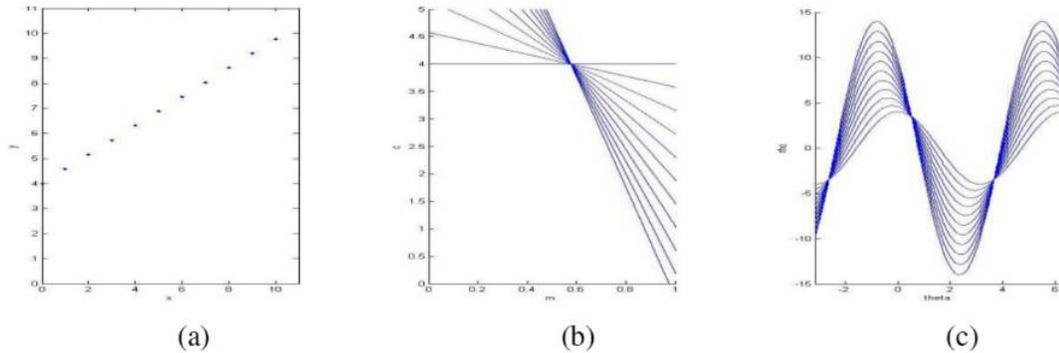


Figura 3.10: (a) Um conjunto de pontos colineares no plano da imagem; (b) Linhas retas concorrentes no espaço de paramétrico quando a parametrização do intercepto e inclinação das retas é usada; (c) Conjunto de curvas senoidais no espaço paramétrico após a parametrização $\rho - \theta$ ser utilizada.

Fonte: MUKHOPADHYAY, 2015.

Seifozakerini (2018) afirma que a TH é uma das técnicas mais conhecidas em visão computacional que tem sido a base de muitos algoritmos práticos de processamento de imagens. No entanto, este método foi desenvolvido para sistemas baseados em quadros, como câmeras digitais convencionais. Recentemente, sistemas baseados em eventos, como câmeras com sensores de visão dinâmicos (Dynamic Vision Sensor – DVS), tornaram-se populares entre os pesquisadores. Assim, é necessário adaptar os algoritmos convencionais de processamento de imagens para câmeras baseadas em eventos. A Figura 3.11 (c) ilustra o resultado da detecção de formas aplicada na Figura 3.11 (b).

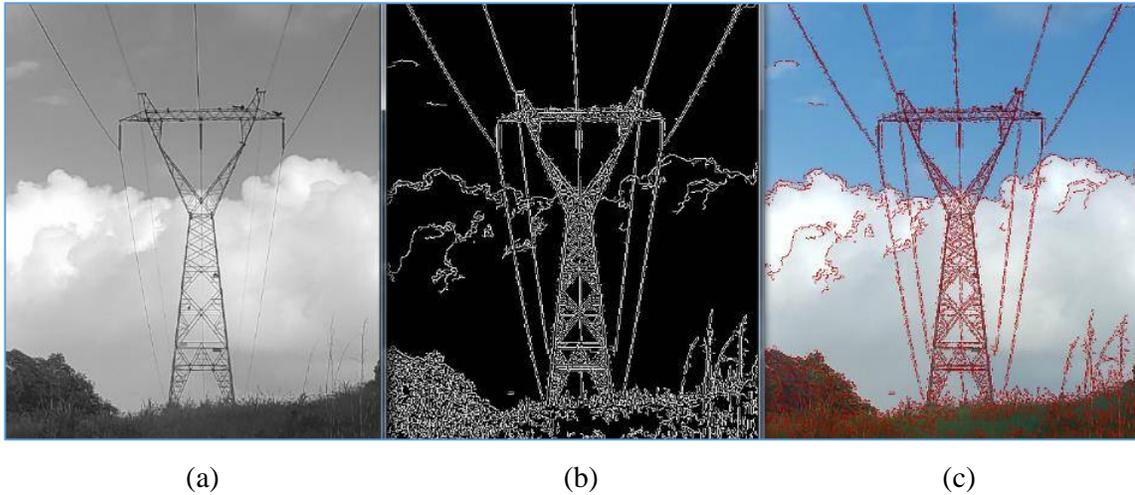


Figura 3.11: (a) Imagem em tom de cinza; (b) Detecção de bordas de Canny; (c) Detecção de linhas pela TH.

Fonte: Autor.

Vale ressaltar a semelhança entre as Figuras 3.11 (b) e (c), isso ocorreu em função dos parâmetros da TH terem sido adequados para gerar linhas com poucos pixels, com isso aparentemente mudou-se apenas a cor final.

No presente trabalho utilizou-se a biblioteca livre de código aberto OpenCV (Open Source Computer Vision Library) para resolver a TH. Esta biblioteca contém um conjunto de algoritmos para aprendizado de máquina e visão computacional em diversas linguagens de programação (C++, Python e Java). Segundo Solem (2012), a linguagem Python é de fácil utilização e na biblioteca OpenCV utiliza-se o módulo matemático NumPy para cálculos matriciais.

4 Trabalhos relacionados a segmentação de vegetação usando visão computacional

Historicamente, as florestas sempre foram usadas como meio de camuflagem para um observador aéreo, isso porque uma densa vegetação acaba se tornando praticamente idêntica quando vista de cima, mesmo a olhos nus. Essa dificuldade também é aplicada para as máquinas. Identificar altura ou diferentes tipos de vegetações por imagens aéreas requerem uma análise profunda e diferente dos meios convencionais de visão computacional.

Hamylton (2020) utiliza imagens obtidas por VANT's para identificar um tipo de vegetação específica cercada por outras. O processo inicia com a aquisição da imagem, em seguida uma subdivisão, treino da rede com imagem da vegetação a ser identificada, implementação do algoritmo de detecção e por último a classificação, conforme Figura 4.1.

Conforme Figura 4.1, observa-se a etapa de treinamento (*training set*), que aborda as técnicas usadas pelos computadores para que eles aprendam algo baseado em suas experiências e não se limitem a repetir operações programadas em sua memória (RUSSELL, 2013). Essas técnicas de resolução devem ser capazes de criar por si próprias, a partir da experiência passada, uma hipótese, ou função, capaz de resolver o problema que se deseja tratar (FACELI, 2011).

Já a etapa seguinte (observando ainda a Figura 4.1) é a de extração de características, onde objetivo da extração de características, ou extração de *features* de uma imagem é reconhecer informações que auxiliam numa posterior classificação ou identificação de objetos que a imagem possui (VIOLA, 2001).

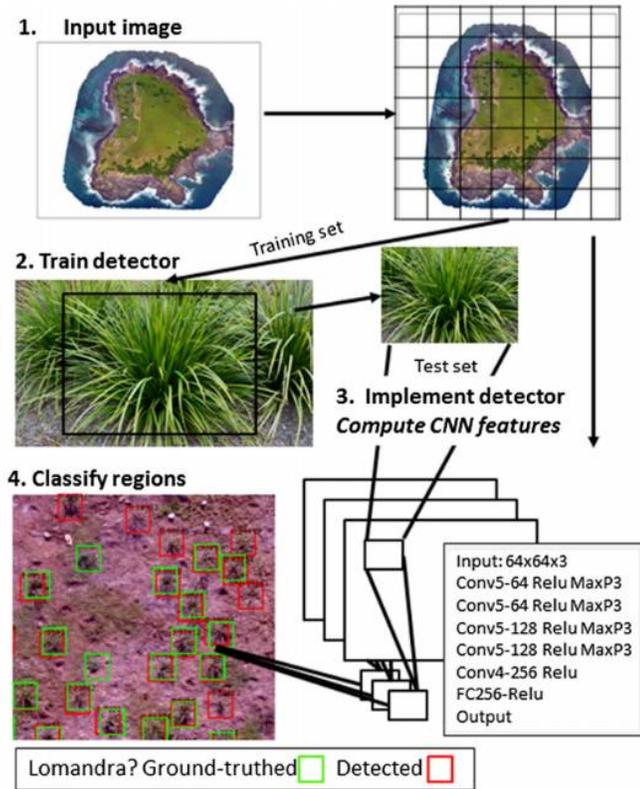


Figura 4.1: Classificação de plantas usando redes neurais convolucionais.

Fonte: HAMYLTON, 2020.

Zhuang (2020) criou uma máscara baseada em uma função probabilística gaussiana e redes neurais convolucionais. Na Figura 4.2 tudo que não é considerado vegetação é excluído da imagem, tornando a segmentação bem evidente.



Figura 4.2: Máscara para segmentação de vegetação de interesse.

Fonte: ZHUANG, 2020

Dandois (2010) utiliza câmeras convencionais e sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*) para determinar a altura de vegetação. Os sensores LiDAR utilizam luz para medir a distância entre objetos. Na Figura 4.3 observam-se as etapas para obtenção da altura de cada árvore captada pela câmera e sensor LiDAR.

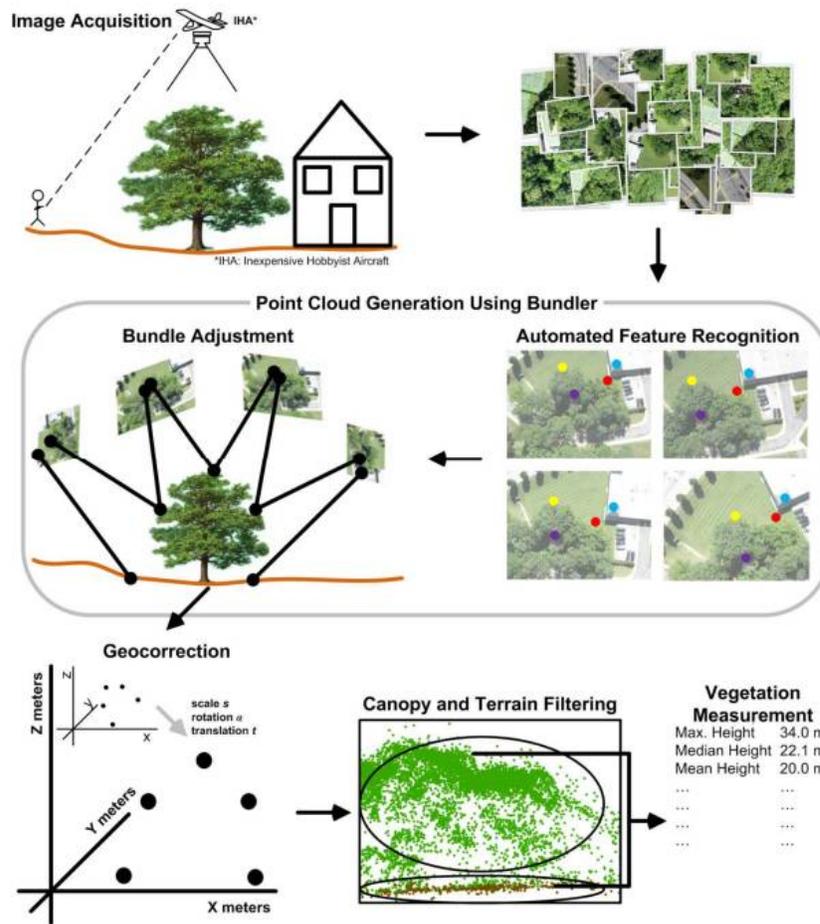


Figura 4.3: Identificação de altura de vegetação por meio de visão computacional.

Fonte: DANDOIS, 2010.

Mccool (2018) utiliza histograma e uma análise da vizinhança de pixels para diferenciar vegetações em uma imagem, como pode ser visto na Figura 4.4.

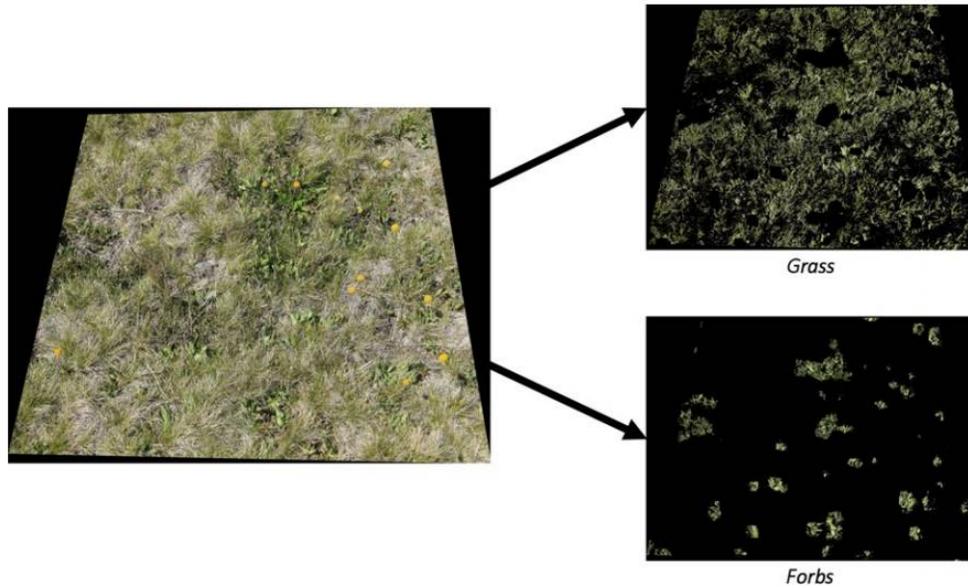


Figura 4.4: Classificação de plantas.

Fonte: MCCOOL (2018).

Samiei (2018) propõe um método baseado em histograma de cores e domínio de Fourier para distinguir vegetações em centros urbanos, bem como dizer o percentual de vegetação na imagem. Na Figura 4.5 observa-se o resultado do método proposto, com a segmentação clara da vegetação dos demais itens da imagem.

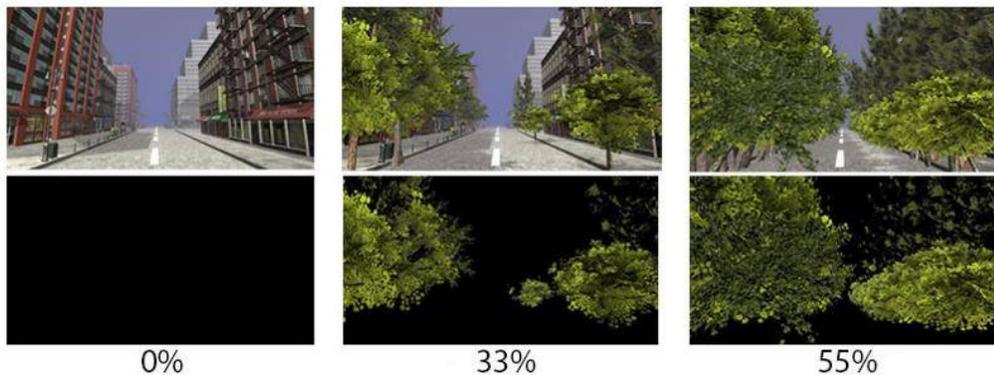


Figura 4.5: Segmentação da vegetação em um centro urbano.

Fonte: SAMIEI, 2018.

Na Figura 4.6 observa-se a faixa de servidão de uma LT e os condutores e as torres destacadas em vermelho. Neste caso, foram utilizados sensores LiDAR para obtenção deste resultado. Observa-se que foi realizada uma segmentação e seleção apenas do trecho de interesse, que é a faixa de servidão da LT.



Figura 4.6: Faixa de servidão de uma LT.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=QmcdzflBU6w>

5 Materiais e Métodos

5.1 Área de estudo

O projeto foi desenvolvido na área da Diretoria de Implantação de Projetos em São Luís, Maranhão.

5.2 VANT utilizado para aquisição das imagens

O VANT utilizado foi o Mavic 2 Pro (Shenzhen DJI Sciences and Technologies LTD., Shenzhen). Esse VANT foi lançado pela DJI em 2018, possuindo uma autonomia de aproximadamente 30 minutos de voo ininterrupto. A cobertura dele é de até 8 quilômetros e pode chegar até 72 km/h. As fotos obtidas por ele possuem resolução de até 20 MP (5472 × 3648 pixels). Conforme pode ser observado na Figura 5.1, além dos dois sensores de proximidade frontais, ele possui outros seis sensores com a mesma finalidade, dando mais segurança na operação.



Figura 5.1: VANT Mavic 2 Pro.

Fonte: <https://horusaeronaves.com/loja/produto/drone-mavic-2-pro-da-dji/>

As grandes vantagens deste VANT são a portabilidade, imagens de boa resolução, duração da bateria e raio de cobertura. Vale ressaltar também as desvantagens desse VANT, sendo elas a duração limitada da bateria (cerca de 25 minutos de voo), a restrição de proximidade com os condutores (em função da alta tensão), visto que ele não possui blindagem e a restrição de não poder usá-lo com chuva. Mas para a aplicação proposta ele atendeu bem.

5.3 Aquisição dos dados

A aquisição das imagens e vídeos foi realizada com o uso de VANT de duas formas diferentes. Os voos foram realizados acima da LT, por questão de segurança. Outro ponto

relevante é destacar que os voos foram feitos de forma manual, com um operador definindo a rota do VANT.

A primeira maneira foi realizar os voos com o VANT posicionado sobre o condutor central da LT, inicialmente a 50 metros e depois a 80 metros de altura. As imagens continham duas torres consecutivas, conforme pode ser visto na Figura 5.2.

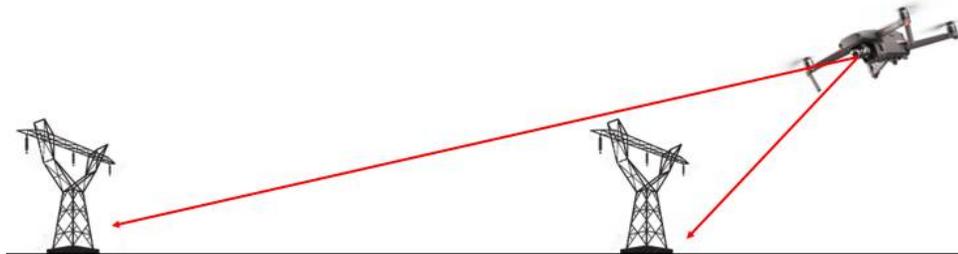


Figura 5.2: VANT capturando faixa de servidão entre duas torres.

Fonte: Autor.

A Figura 5.3 e 5.4 ilustram os resultados das imagens obtidas para os voos a 50 e a 80 metros de altura, respectivamente.



Figura 5.3: Duas torres consecutivas com VANT a 50 metros de altura.

Fonte: Autor.



Figura 5.4: Duas torres consecutivas com VANT a 80 metros de altura.

Fonte: Autor.

Observando-se a Figura 5.3, os condutores ficam significativamente mais nítidos que os condutores na Figura 5.4.

A segunda maneira foi posicionar o VANT sobre a LT a 50 metros de altura e fixar a câmera a 90 graus (ver Figura 5.5), tendo uma vista superior da LT, e o resultado pode ser visto na Figura 5.6, onde pode-se observar com clareza os condutores da LT.

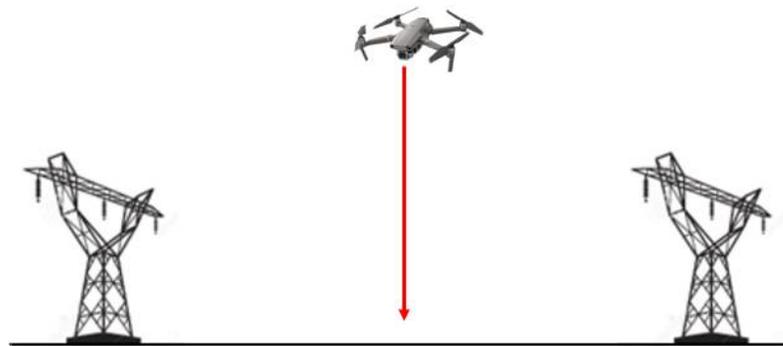


Figura 5.5: Representação da vista superior da LT com VANT a 50 metros de altura.

Fonte: Autor.



Figura 5.6: Vista superior da LT com VANT a 50 metros de altura.

Fonte: Autor.

5.4 Metodologia

O primeiro passo foi a aquisição das imagens. Conforme foi visto na seção anterior, as fotos e vídeos obtidas com o VANT a cerca de 50 metros de altura se encaixam melhor para este trabalho. Voos abaixo dos 50 metros não são tão eficazes pois a imagem obtida já fica menor que a própria faixa de servidão, assim como voos acima dos 80 metros não possibilitam capturar os condutores com clareza, por isso o intervalo de altura do voo deve ser entre 50 e 80 metros.

Foram usadas ferramentas clássicas de análise de imagens e vídeos para detecção de bordas e segmentação baseadas em histogramas de tons de cinza. Não foram usadas técnicas de inteligência artificial, onde há uma capacidade de lidar com novas situações ou uma capacidade de solucionar problemas Coppin (2004).

Em seguida foi aplicada a técnica de limiarização para destacar os condutores e segmentar a faixa de servidão do restante da vegetação no entorno dela.

A linguagem de programação utilizada foi o Python e a biblioteca foi *OpenCV*. Nela, foi usada uma função referente à TH, onde os parâmetros estabelecidos nessa função foram definidos para os voos compreendidos entre as alturas de 50 a 80 metros do solo.

5.4.1 Método baseado na limiarização binária

Conforme foi visto na seção anterior, o histograma determina a quantidade de pixels em função da sua tonalidade. Dessa forma, foi realizada a obtenção do histograma das imagens no intuito de encontrar um padrão entre os condutores de tal forma que fosse possível distinguir eles da vegetação e da faixa de servidão. Ao encontrar esse padrão (limiar), foi definido o valor desse limiar e aplicado para distinguir os condutores da faixa de servidão e do restante que os cercam.

5.4.2 Método baseado na limiarização adaptativa

Tomando como referência que a limiarização adaptativa tem resultados mais precisos que a limiarização baseada apenas no valor do limiar, ela foi utilizada para construção do código, visto que os resultados atenderam às expectativas.

Primeiro foi aplicado o método de Otsu, para busca de um limiar ideal para a imagem.

Na sequência foi aplicado o método de Marr e Hildreth, em seguida a detecção de borda de Canny e por fim o método de detecção de formas pela TH.

5.4.3 Delimitação da faixa de servidão

A distância de projeto entre os condutores da LT é de 7,50 metros, ou seja, conforme a Figura 5.6, a distância entre LV1 (linha vermelha 1, condutor 1) e LV3 (linha vermelha 3, condutor 3) é de 7,50 metros mais 7,50 metros, ou 15 metros. A região da faixa de servidão pode ser vista na Figura 5.6 no intervalo entre LA1 (linha azul 1) e LA2 (linha azul 2). O código proposto (disponível em Anexos) encontra a quantidade de pixels nesse intervalo de 15 metros (representado pela letra “b” na Figura 5.6), e após isso, multiplica-se essa quantidade de pixels por 2 que será obtida a altura do retângulo que representa a faixa de servidão com uma margem de erro de 2,50 metros para cada lado da LT. A distância “a” na Figura 5.6 representa a faixa entre o condutor da LT e a região compreendida na faixa de servidão, representada por LA1. A linhas amarelas na Figura 5.7 representam os para raios da LT.

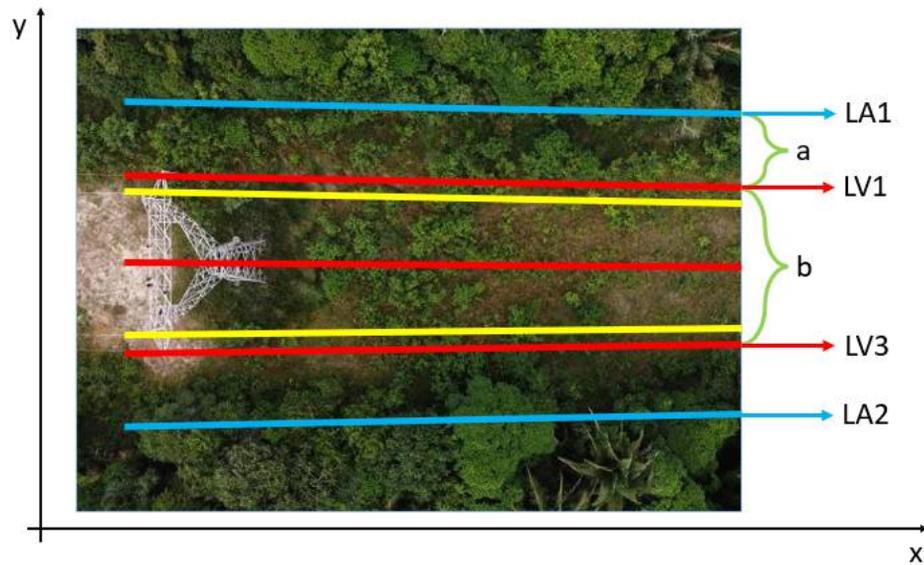


Figura 5.7: Delimitação da faixa de servidão entre as linhas azuis.

Fonte: Autor.

Com essa metodologia para definição da faixa de servidão, o VANT pode realizar a aquisição dos dados em diferentes alturas e a região delimitada será dinâmica e em função desta altura, sem necessidade de uma altura fixa para os voos. Os testes realizados compreenderam alturas entre 50 e 80 metros.

O passo a passo para obtenção da segmentação da faixa de servidão pode ser visto na Figura 5.8.

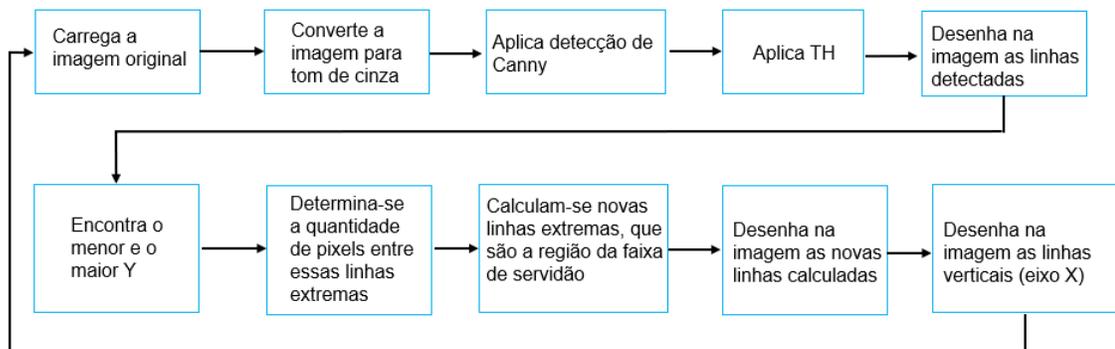


Figura 5.8: Passo a passo para obtenção da delimitação da faixa de servidão.

Fonte: Autor.

6 Resultados

Os testes e resultados obtidos foram baseados em análise do histograma e detecção de bordas das imagens e vídeos obtidos, sem aplicação de técnicas de extração de características ou *deep learning*.

6.1 Modelo proposto baseado em Canny e Transformada de Hough

A detecção de bordas de Canny com o ângulo da câmera do VANT ajustado em 90 graus foi a técnica mais adequada para a identificação de linhas por meio da TH, nenhuma das outras técnicas retornou um resultado satisfatório, dessa forma o modelo foi baseado na detecção de bordas de Canny e câmera do VANT ajustada em 90 graus.

Aplicando a detecção de bordas de Canny na Figura 5.6, o resultado é mostrado na Figura 6.1.



Figura 6.1: Detecção de bordas de Canny.

Fonte: Autor.

O resultado da TH aplicado na Figura 6.1 é ilustrado na Figura 6.2.



Figura 6.2: Identificação de linhas pela TH.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.3 observa-se a imagem original de um trecho da LT e na Figura 6.4 os condutores destacados em vermelho e a região da faixa de servidão destacada em azul. O código em Python para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice A.

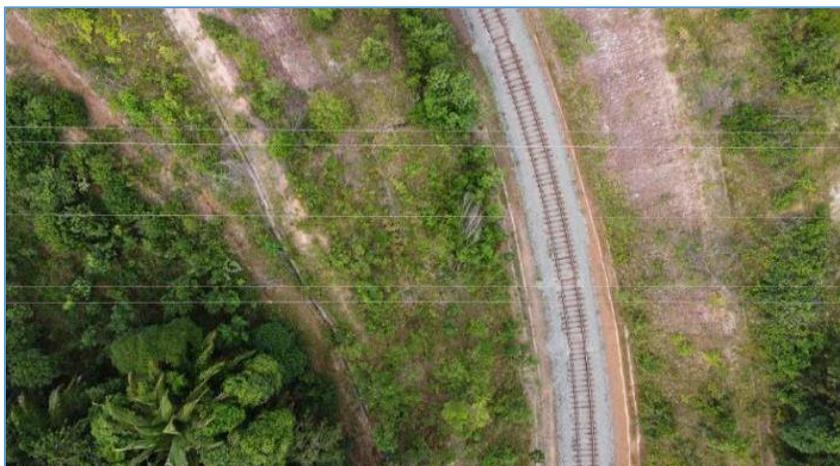


Figura 6.3: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.4: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.

Fonte: Autor.

O cálculo aproximado para obtenção da faixa de servidão é baseado na quantidade de pixels entre os condutores externos, com a faixa de servidão contendo o dobro de pixels da distância entre esses condutores externos, dessa forma, independente da altura, o cálculo sempre retornará um valor bem próximo da largura real da faixa de servidão. Isso é replicado em todos os códigos.

Na Figura 6.5 observa-se a imagem original de outro trecho da LT e na Figura 6.6 os condutores destacados em vermelho e a região da faixa de servidão destacada em azul. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice A.



Figura 6.5: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.6: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.7 observa-se a imagem original de um trecho da LT, que foi deslocada para um lado propositalmente para avaliar se o código era capaz de segmentar a faixa de servidão com precisão e na Figura 6.8 os condutores destacados em vermelho e a região da faixa de servidão destacada em azul. Observa-se também na Figura 6.8 que o condutor central não foi identificado, visto que ele está pouco nítido na imagem, mas isso não impediu a segmentação da região de interesse. Vale ressaltar que isso não representou um erro, pois os condutores das extremidades que são premissas para definição da faixa de servidão. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice A.



Figura 6.7: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.8: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.9 observa-se a imagem original de outro trecho da LT e na Figura 6.10 os condutores destacados em vermelho e a região da faixa de servidão destacada em azul. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice A.



Figura 6.9: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.10: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.11 observa-se a imagem original de um trecho da LT e na Figura 6.12 os condutores destacados em vermelho, onde a imagem foi cortada e nela aparece apenas a faixa de servidão, com o entorno sendo excluído. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice B.



Figura 6.11: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.12: Segmentação da faixa de servidão com corte da imagem original.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.13 observa-se a imagem original de outro trecho da LT e na Figura 6.14 os condutores destacados em vermelho, onde a imagem foi cortada e nela aparece apenas a faixa de servidão, com o entorno sendo excluído. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice B.

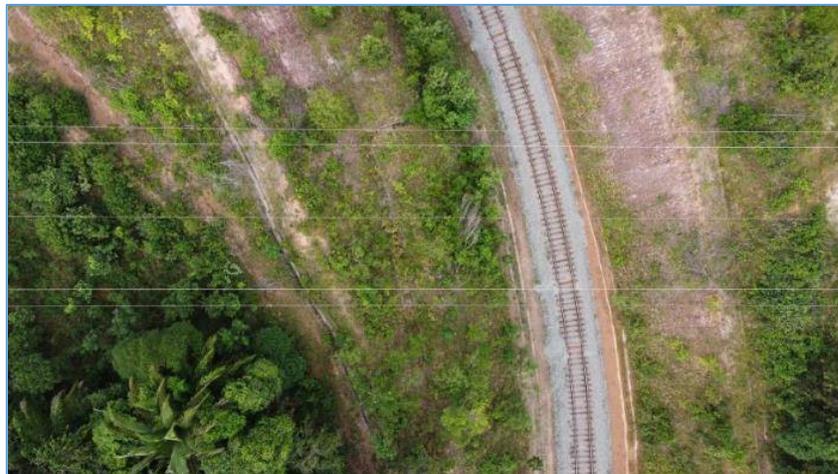


Figura 6.13: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.14: Segmentação da faixa de servidão com corte da imagem original.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.15 observa-se a imagem original de outro trecho da LT e na Figura 6.16 os condutores destacados em vermelho, onde a imagem foi cortada e nela aparece apenas a faixa de servidão, com o entorno sendo excluído. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice B.



Figura 6.15: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.16: Segmentação da faixa de servidão com corte da imagem original.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.17 observa-se um quadro obtido a partir de um vídeo (<https://youtu.be/Vx69YpcRfEE>), nele os condutores estão destacados em vermelho e a região da faixa de servidão destacada em azul. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice C.

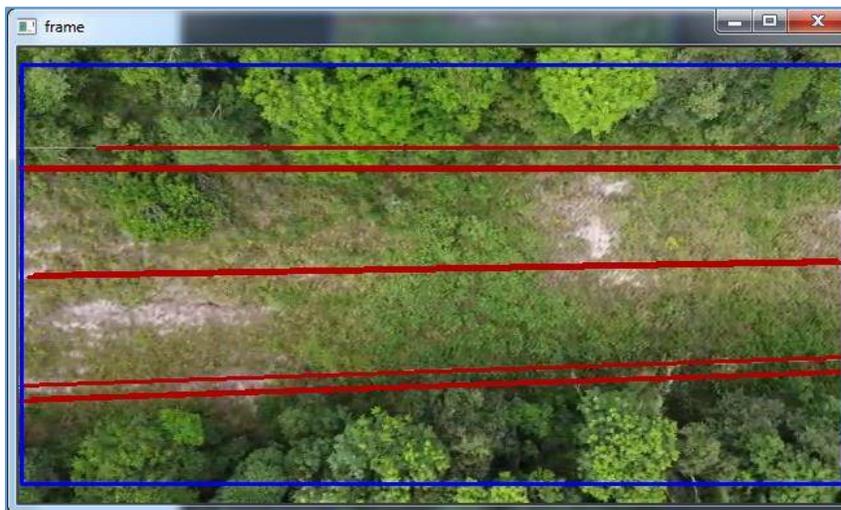


Figura 6.17: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul obtida de um vídeo da LT.

Fonte: Autor.

Na Figura 6.18 observa-se um quadro obtido a partir de um vídeo (<https://youtu.be/6CWmdYsBazo>), nele os condutores estão destacados em vermelho, onde a imagem foi cortada e nela aparece apenas a faixa de servidão, com o entorno sendo excluído. O código para obtenção deste resultado pode ser visto no Apêndice D.



Figura 6.18: Segmentação da faixa de servidão com corte de um vídeo da LT.

Fonte: Autor.

6.2 Discussão sobre os resultados

Os testes utilizando técnicas de limiarização binária e Otsu não retornaram resultados satisfatórios. Apesar da maneira usual para aplicação da TH ser um tratamento prévio com detecção de bordas, tentou-se aplicar diretamente em uma imagem sem esse tratamento, comprovando que não seria possível seguir com limiarização binária. Apesar do método retornar um limiar ótimo para a imagem, esse valor não retornou um resultado adequado para identificação dos condutores.

Seguiu-se com os testes utilizando limiarização adaptativa. Ao aplicar a detecção de bordas de Marr e Hildreth, os resultados da TH também não foram adequados ao que se esperava, independentemente do tipo de imagem vista ampla ou vista em 90 graus.

A detecção de bordas de Canny foi a que teve melhor resultado, preparando a imagem para a TH. A varredura da LT com o ângulo da câmera do VANT em 90 graus se mostrou muito eficaz, facilitando a identificação dos condutores e possibilitando a segmentação do trecho de interesse.

Os resultados obtidos foram os esperados, visto que o objetivo de realizar a segmentação da faixa de servidão foi atingindo, tanto para fotos quanto para vídeos extraídos por meio de VANT's.

A segmentação da faixa de servidão pôde ser feita de duas formas distintas, com uma delas destacando a faixa de servidão e a outra forma cortando a imagem e já retornando apenas

a região de interesse, dando flexibilidade para uma posterior aplicação desses códigos apresentados.

A TH se mostrou uma ferramenta simples e eficaz para o objetivo deste trabalho, além de não exigir um grande esforço computacional, possibilitou a análise de vídeos obtidos diretamente do VANT, sem necessidade de aplicação de filtros para posterior análise.

De forma geral, dentro do que foi proposto para o trabalho, os resultados encontrados foram muito satisfatórios, possibilitando uma segmentação precisa e com um código relativamente simples, reduzindo eventuais custos com ferramentas computacionais, bem como utilização de VANT's de baixo custo, tornando válido o modelo proposto.

6.3 Lições aprendidas

Os testes utilizando a detecção de bordas de Canny em conjunto com a TH trouxeram excelentes resultados para o objetivo proposto, contudo, cabe expor também os testes que não trouxeram bons resultados, de tal forma que para aplicações futuras haja o conhecimento de que esses testes foram feitos e não foram bem-sucedidos.

Os testes e resultados obtidos foram baseados em análise do histograma e detecção de bordas das imagens e vídeos obtidos, sem aplicação de técnicas de extração de características ou *deep learning*.

6.3.1 Testes baseados na obtenção de histogramas das imagens

Obtendo o histograma da Figura 5.3 em tom de cinza, o resultado pode ser visto na Figura 6.19 e observa-se nesse histograma que não há uma distinção entre os tons de cinza (que seria representado por um vale entre alguns picos de intensidades de tons de cinza).

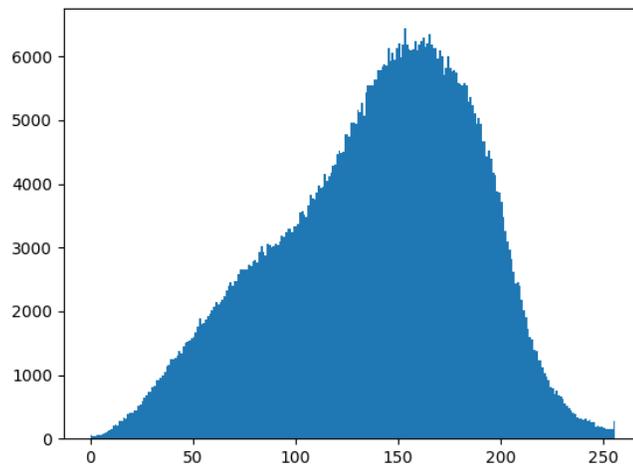


Figura 6.19: Histograma da Figura 5.3 em tom de cinza.

Fonte: Autor.

A mesma Figura 5.3 pode ser vista em tom de cinza na Figura 6.20, ficando evidente que os tons são bem parecidos tanto na faixa de servidão, como fora dela, de tal forma que os condutores não ficam evidentes.



Figura 6.20: Figura 5.3 em tom de cinza.

Fonte: Autor.

Já a Figura 6.21 representa a Figura 5.6 em tom de cinza, onde é possível ver com mais clareza os condutores da LT.

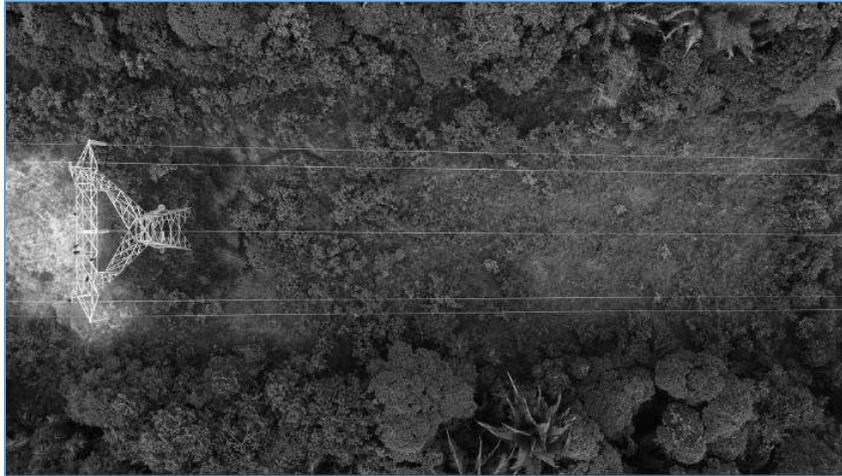


Figura 6.21: Destaque para faixa de servidão da Figura 5.6.

Fonte: Autor.

O resultado obtido no histograma da Figura 6.21 pode ser visto na Figura 6.22.

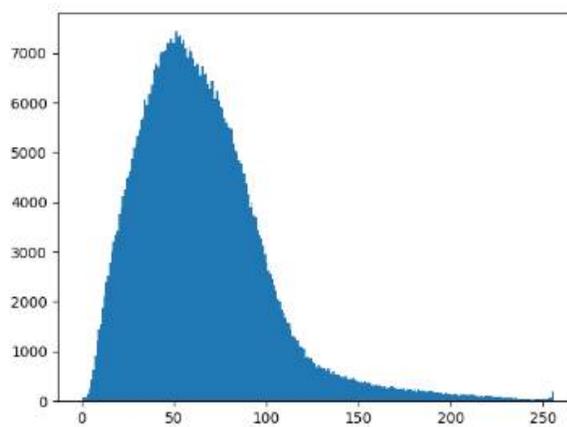


Figura 6.22: Histograma para a faixa de servidão da Figura 5.6 em tom de cinza.

Fonte: Autor.

6.3.2 Testes baseados em limiarização binária

Os testes baseados em limiarização binária foram os primeiros a serem realizados, por se tratar de um método simples, mas que poderia alcançar os resultados esperados. Tomando como referência o histograma da Figura 5.3, o valor do limiar foi definido em 100, ou seja, todos os tons que forem abaixo de 100 serão convertidos em tons escuros, ou 0. Já os valores acima de 100 serão convertidos em 255, e o resultado pode ser visto na Figura 6.23.



Figura 6.23: Limiarização da Figura 5.3 com limiar 100.

Fonte: Autor.

Aplicando a TH para detectar formas na Figura 6.23, o resultado pode ser visto na Figura 6.24.



Figura 6.24: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

Alterando o limiar para 200, o resultado pode ser visto na Figura 6.25. Nela notam-se com um pouco mais de nitidez os condutores da LT.

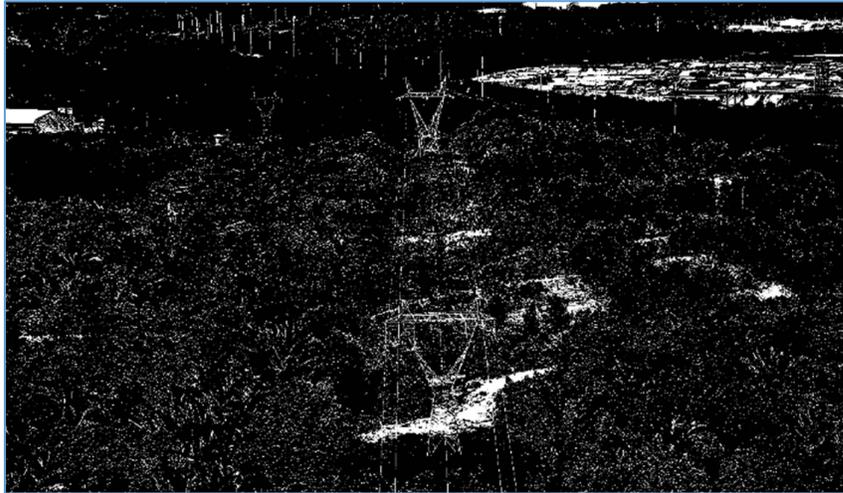


Figura 6.25: Limiarização da Figura 5.3 com limiar 200.

Fonte: Autor.

Quando se aplica a TH para detectar formas na Figura 6.25, obtém-se o resultado que pode ser visto na Figura 6.26.



Figura 6.26: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

Adotando como referência o histograma da Figura 5.6, o valor do limiar foi definido em 100 e o resultado pode ser visto na Figura 6.27.



Figura 6.27: Limiarização da Figura 5.6 com limiar 100.

Fonte: Autor.

E por fim, aplicando a TH para detectar formas na Figura 6.27, o resultado pode ser visto na Figura 6.28.



Figura 6.28: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

6.3.3 Testes baseados em limiarização adaptativa

Os resultados baseados em limiarização adaptativa foram destacados na sequência dos testes realizados.

Na limiarização pelo método de Otsu, o resultado que o método considerou o mais apropriado foi um limiar em 129, com a imagem sendo mostrada na Figura 6.29.



Figura 6.29: Limiarização pelo método de Otsu, com limiar em 129 da Figura 5.3.

Fonte: Autor.

Aplicando a TH para detectar formas na Figura 6.29, o resultado pode ser visto na Figura 6.30.



Figura 6.30: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

Aplicando o método de detecção de borda de Marr e Hildreth na Figura 5.3, observa-se o resultado na Figura 6.31 com uma uniformização dos tons de cinza.



Figura 6.31: Detecção de bordas de Marr e Hildreth.

Fonte: Autor.

Aplicando a TH para detectar formas na Figura 6.31, o resultado pode ser visto na Figura 6.32.



Figura 6.32: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

Aplicando a detecção de bordas de Canny na Figura 5.3, o resultado é mostrado na Figura 6.33. Nela, todos os contornos da imagem são detectados e assumem valor de 255 (tom claro), enquanto o restante assume valor 0 (tom escuro).

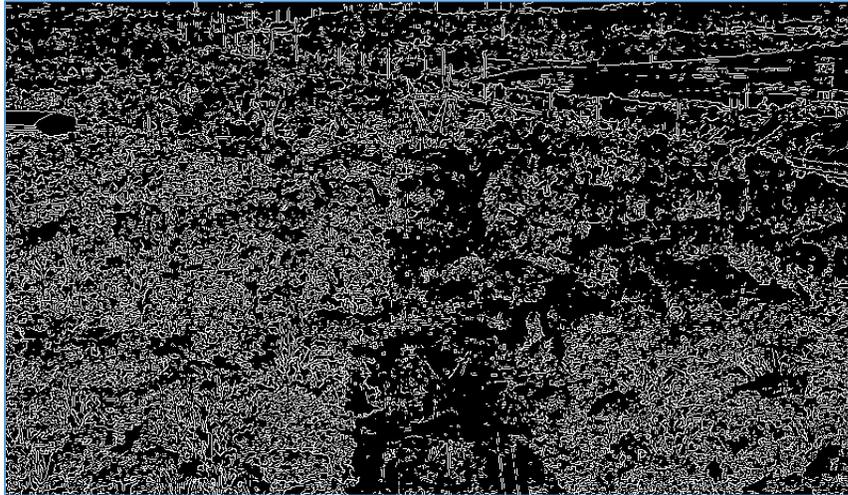


Figura 6.33: Detecção de bordas de Canny.

Fonte: Autor.

O resultado da TH aplicado na Figura 6.33 é ilustrado na Figura 6.34.

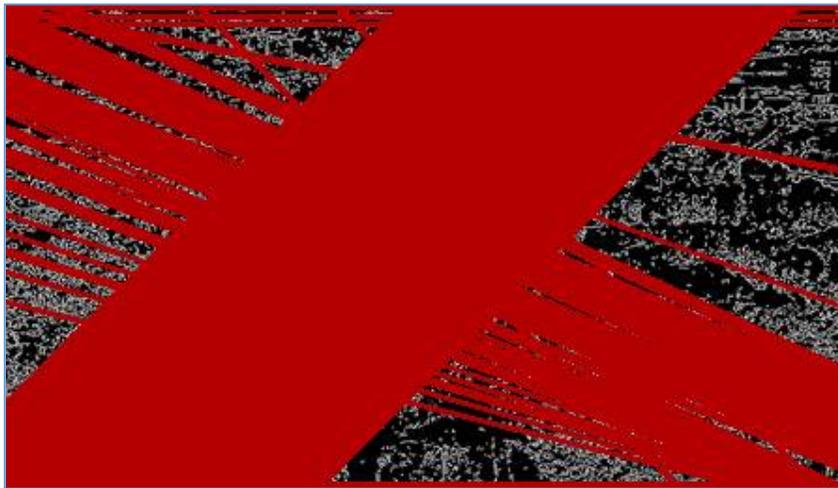


Figura 6.34: Identificação de linhas pela TH.

Fonte: Autor.

Aplicando a limiarização pelo método de Otsu na Figura 5.6, o resultado que o método considerou o mais apropriado foi um limiar em 75, com a imagem sendo mostrada na Figura 6.35.



Figura 6.35: Limiarização pelo método de Otsu, com limiar em 75.

Fonte: Autor.

Aplicando a TH para detectar formas na Figura 6.35, o resultado pode ser visto na Figura 6.36.



Figura 6.36: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

Aplicando o método de detecção de borda de Marr e Hildreth na Figura 5.6, observa-se o resultado na Figura 6.37.

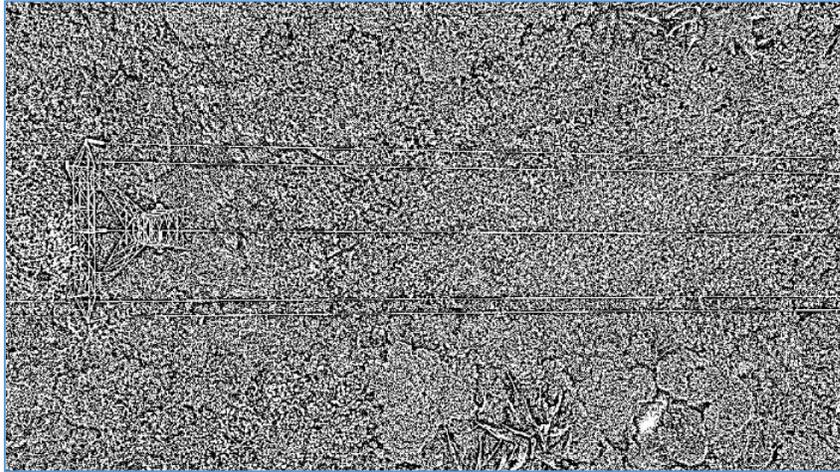


Figura 6.37: Detecção de bordas de Marr e Hildreth.

Fonte: Autor.

Aplicando a TH para detectar formas na Figura 6.37, o resultado pode ser visto na Figura 6.38.

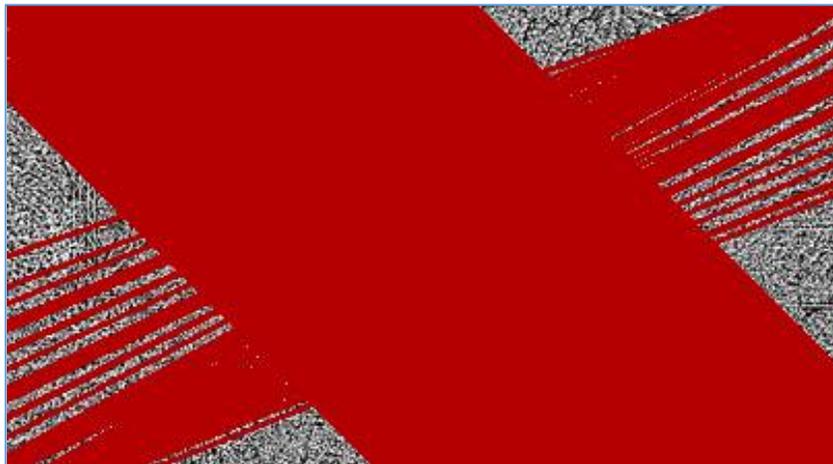


Figura 6.38: Formas detectadas pela TH.

Fonte: Autor.

Para esses testes que não foram bem-sucedidos, mesmo alterando os parâmetros da TH no código em Python, não foi possível obter resultados que atendiam minimamente o objetivo. De forma resumida, a Figura 6.39 representa os testes realizados.

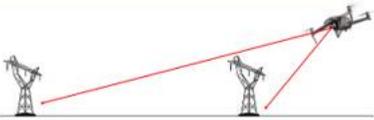
Tipo de captura da Imagem com VANT	Técnica utilizada preparando a imagem para a TH			
	Limiarização Binária	Otsu	Marr e Hildreth	Canny
	Mal-sucedido	Mal-sucedido	Mal-sucedido	Mal-sucedido
	Mal-sucedido	Mal-sucedido	Mal-sucedido	Bem-sucedido

Figura 6.39: Comparação entre os testes realizados, preparando a imagem para a TH.

Fonte: Autor.

6.4 Teste bem-sucedido

A detecção de bordas de Canny com o ângulo da câmera do VANT ajustado em 90 graus foi a técnica mais adequada para a identificação dos condutores da LT por meio da TH. Nas Figuras 6.40 e 6.41, observam-se, respectivamente, um trecho da LT e a faixa de servidão destacada pelo retângulo azul (os condutores que estão destacados em vermelho).

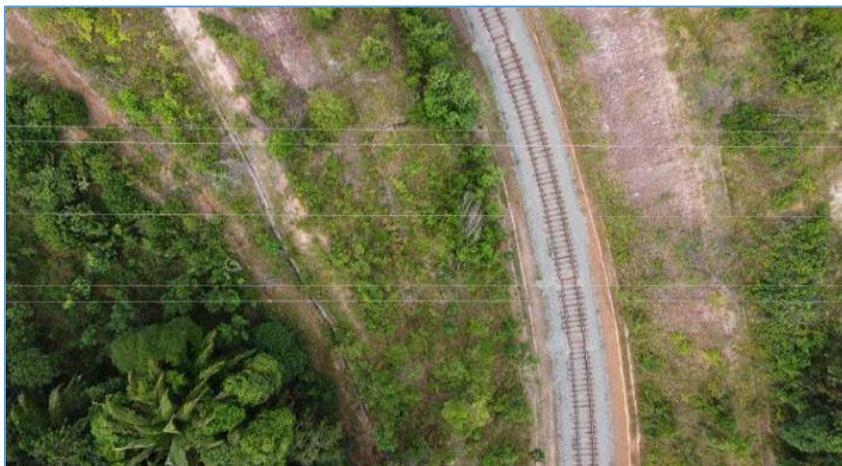


Figura 6.40: Vista superior de trecho da LT.

Fonte: Autor.



Figura 6.41: Segmentação da faixa de servidão destacada em azul.

Fonte: Autor.

A detecção de bordas de Canny com o ângulo da câmera do VANT ajustado em 90 graus foi a técnica mais adequada para a identificação dos condutores da LT por meio da TH. Nas Figuras 6.40 e 6.41, observam-se, respectivamente, um trecho da LT e a faixa de servidão destacada pelo retângulo azul (os condutores que estão destacados em vermelho).

7 Conclusão

A etapa de busca por trabalhos relacionados para aplicação de visão computacional em inspeções em LTs foi longa, por haver poucos trabalhos abertos, sendo a maioria fechados, visto que são aplicados com fins lucrativos. Tentou-se contato com algumas empresas que trabalham no ramo, mas o código fonte ou metodologia não era compartilhada por se tratar de um item comercial.

Os testes com vários métodos mostraram aquele que melhor se encaixava para o trabalho proposto, de tal forma que a técnica utilizada se mostrou leve, sem necessidade de aplicação de *deep learning*, trazendo baixo esforço computacional para obtenção dos resultados.

Levando em consideração a extensão do conhecimento no campo proposto e os objetivos terem sido atingidos utilizando uma metodologia que exige pouco esforço computacional, o trabalho foi bem-sucedido, estando o código proposto pronto e disponível para aperfeiçoamento e aplicações em outros tipos de trabalhos relacionados a LT's ou outros sistemas semelhantes.

8 Trabalhos futuros

Visto que os resultados obtidos para segmentação da faixa de servidão foram alcançados, as etapas seguintes podem ser executadas conforme abaixo:

- Realizar a identificação de vegetação na região segmentada, de tal forma que seja possível distinguir vegetações mais altas que representem um risco à LT;
- Testar obtenção de imagens e vídeos em ângulos diferentes dos aplicados neste trabalho, de tal forma que se obtenha maior varredura da faixa de servidão em apenas uma coleta de dados, realizando a segmentação desse trecho (de forma semelhante à que pode ser vista na Figura 4.6);
- Construir o modelo para detecção de altura de vegetação na faixa de servidão da LT com câmera posicionada em qualquer ângulo durante voo;
- Construir um modelo para detecção de residências ou similares na região da faixa de servidão da LT.

Referências

- BARROS, B. F.; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- COPPIN, B. **Inteligência artificial**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. **Remote Sensing**, Baltimore, v. 2, p. 1157-1176, 2010.
- FACELI, K. et al. **Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- HAMYLTON, S. M. et al. Evaluating techniques for mapping island vegetation from unmanned aerial vehicle (UAV) images: Pixel classification, visual interpretation and machine learning approaches. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, New South Wales, v. 89, p. 102085, 2020.
- MA, J. et al. Real-time detection of wildfire risk caused by powerline vegetation faults using advanced machine learning techniques. **Advanced Engineering Informatics**, Hong Kong, v. 44, p. 101070, 2020.
- MCCOOL, C. et al. Automating analysis of vegetation with computer vision: Cover estimates and classification. **Ecology and Evolution**, Brisbane, v. 8, p. 6005-6015, 2018.
- MUKHOPADHYAY, P.; CHAUDHURI, B. B. A Survey of Hough Transform. **Pattern Recognition**, Singapore, v. 48, p. 933-1010, 2015.
- NGUYEN, V. N. et al. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. **Electrical Power and Energy Systems**, Tromsø, v. 99, p. 107-120, 2018.
- PINTO, M. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- ROBBA, E. J. et al. **Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2020. 522 p.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Inteligência artificial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 1324 p.

SAMIEI, S. et al. Toward a Computer Vision Perspective on the Visual Impact of Vegetation in Symmetries of Urban Environments. **Symmetry**, Angers, v. 10, p. 666-684, 2018.

SEIFOZZAKERINI, S. et al. Hough Transform Implementation For Event-Based Systems: Concepts and Challenges. **Frontiers in Computational Neuroscience**, Singapore, v. 12, p. 1-19, 2018.

SOLEM, J. E. **Programming Computer Vision with Python: Tools and Algorithms for Analyzing Images**. 1. ed. Cambridge: O'Reilly, 2012. 247 p.

TENÓRIO, T. G. **Um novo algoritmo para segmentação de imagens de mamografias robusto a ruído**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. 58 p.

VIOLA, P.; JONES, M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. **Conference on computer vision and pattern recognition**, Cambridge, v. 1, p. 1-9, 2001.

ZHUANG, S. et al. Vegetation extraction in the field using multi-level features. **Biosystems Engineering**, Tianjin, v. 197, p. 352-366, 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Código para segmentação da faixa de servidão com destaque em azul

```
import cv2
import numpy as np

#carregar imagem com OpenCV
img = cv2.imread("caminho da imagem")
gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
edges = cv2.Canny(gray, 150, 200)
lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi/180, 350, maxLineGap=200)
i=0
min=0
max=0
teste=0
for line in lines:
    x1, y1, x2, y2 = line[0]
    cv2.line(img, (x1, y1), (x2, y2), (0, 0, 180), 2)
    print(i,y1,y2)
    if y1<=y2:
        if min == 0:
            min=y1
            max=y2
        if y2>=max:
            max=y2
        if y1<=min:
            min=y1
    if y1>y2:
        if min == 0:
            min=y2
            max=y1
        if y1>=max:
            max=y1
        if y2<=min:
            min=y2
    i=i+1
print(min,max)
print(img.shape[1],img.shape[0])
media = int((max-min)*0.5)
cv2.rectangle(img, (2, min-media), (img.shape[1]-2, max+media), (255, 0, 0), 2)
cv2.imshow("img", img)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

APÊNDICE B – Código para segmentação da faixa de servidão com corte da imagem

```
import cv2
import numpy as np

#carregar imagem com OpenCV

img = cv2.imread("caminho da imagem")
gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
edges = cv2.Canny(gray, 170, 200)
lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi/180, 300, maxLineGap=200)
i=0
min=0
max=0
teste=0
for line in lines:
    x1, y1, x2, y2 = line[0]
    cv2.line(img, (x1, y1), (x2, y2), (0, 0, 180), 2)
    print(i,y1,y2)
    if y1<=y2:
        if min == 0:
            min=y1
            max=y2
        if y2>=max:
            max=y2
        if y1<=min:
            min=y1
    if y1>y2:
        if min == 0:
            min=y2
            max=y1
        if y1>=max:
            max=y1
        if y2<=min:
            min=y2
    i=i+1
print(min,max)
print(img.shape[1],img.shape[0])
media = int((max-min)*0.5)
crop_img = img[min-media:max+media,0:img.shape[1]]
cv2.imshow("img", crop_img)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

APÊNDICE C – Código para segmentação da faixa de servidão a partir de vídeo com destaque em azul

```
import cv2
import numpy as np

video = cv2.VideoCapture("VID-20210926-WA0017.mp4")

while True:
    ret, frame = video.read()
    gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    edges = cv2.Canny(gray, 170, 200)
    lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi / 180, 250, maxLineGap=200)
    i=0
    min=0
    max=0
    teste=0
    for line in lines:
        x1, y1, x2, y2 = line[0]
        cv2.line(frame, (x1, y1), (x2, y2), (0, 0, 180), 2)
        print(i,y1,y2)
        if y1<=y2:
            if min == 0:
                min=y1
                max=y2
            if y2>=max:
                max=y2
            if y1<=min:
                min=y1
        if y1>y2:
            if min == 0:
                min=y2
                max=y1
            if y1>=max:
                max=y1
            if y2<=min:
                min=y2
        i=i+1
    print(min,max)
    print(frame.shape[1],frame.shape[0])
    media = int((max - min) * 0.33)
    cv2.rectangle(frame, (2, min - media), (frame.shape[1] - 2, max +
media), (255, 0, 0), 2)

    cv2.imshow("frame", frame)
    key = cv2.waitKey(3)
    if key == 27:
        break
video.release()
cv2.destroyAllWindows()
```

APÊNDICE D – Código para segmentação da faixa de servidão com corte do vídeo

```
import cv2
import numpy as np

video = cv2.VideoCapture("VID-20210926-WA0017.mp4")

while True:
    ret, frame = video.read()
    gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    edges = cv2.Canny(gray, 170, 200)
    lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi / 180, 250, maxLineGap=200)
    i=0
    min=0
    max=0
    teste=0
    for line in lines:
        x1, y1, x2, y2 = line[0]
        cv2.line(frame, (x1, y1), (x2, y2), (0, 0, 180), 2)
        print(i,y1,y2)
        if y1<=y2:
            if min == 0:
                min=y1
                max=y2
            if y2>=max:
                max=y2
            if y1<=min:
                min=y1
        if y1>y2:
            if min == 0:
                min=y2
                max=y1
            if y1>=max:
                max=y1
            if y2<=min:
                min=y2
        i=i+1
    print(min,max)
    print(frame.shape[1],frame.shape[0])
    media = int((max - min) * 0.3)
    crop_frame = frame[min - media:max + media, 0:frame.shape[1]]
    cv2.imshow("frame", crop_frame)
    key = cv2.waitKey(5)
    if key == 27:
        break
video.release()
cv2.destroyAllWindows()
```