



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Claudemir José Alves

**UMA ARQUITETURA DE AMBIENTE VIRTUAL INTERATIVO SUPORTADA
POR IMAGENS AÉREAS E ESFÉRICAS PARA VISUALIZAÇÃO DE DADOS E DE
DIAGRAMA UNIFILAR DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Uberlândia

2025

CLAUDEMIR JOSÉ ALVES

UMA ARQUITETURA DE AMBIENTE VIRTUAL INTERATIVO SUPORTADA
POR IMAGENS AÉREAS E ESFÉRICAS PARA VISUALIZAÇÃO DE DADOS E DE
DIAGRAMA UNIFILAR DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cardoso.

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A474 Alves, Claudemir José, 1974-
2025 Uma Arquitetura de Ambiente Virtual Interativo Suportada por
Imagens Aéreas e Esféricas para Visualização de Dados e de
Diagrama unifilar de
Subestações de Energia Elétrica [recurso eletrônico] / Claudemir
José Alves. - 2025.

Orientador: Alexandre Cardoso.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.28>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Cardoso, Alexandre, 1964-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2: Gizele
Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

CLAUDEMIR JOSÉ ALVES

UMA ARQUITETURA DE AMBIENTE VIRTUAL INTERATIVO SUPORTADA
POR IMAGENS AÉREAS E ESFÉRICAS PARA VISUALIZAÇÃO DE DADOS E DE
DIAGRAMA UNIFILAR DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Dissertação
apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Uberlândia 19 de dezembro de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva, Instituto Federal Goiano (IFG)

Prof. Dr. Paulo Henrique de Oliveira Rezende, Universidade Federal
de Uberlândia (UFU)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP
38400-902

Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 814, PPGEELT				
Data:	Dezenove de dezembro de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	9:30	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12322EEL002				
Nome do Discente:	Claudemir José Alves				
Título do Trabalho:	Uma Arquitetura de Ambiente Virtual Interativo suportada por Imagens Aéreas e Esféricas para Visualização de Dados e de Diagrama Unifilar de Subestações de Energia Elétrica				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Metodologia e Técnicas da Computação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Alexandre Cardoso. Título do projeto: Uso de Realidade Virtual e Aumentada aplicadas às fases de Engenharia, Manutenção e Controle do Sistema HVDC da Eletronorte. Agência financiadora: ANEEL - Eletronorte. Número do processo na agência financiadora: Contrato 4500062446. Vigência do projeto: 01/2023 - atual.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Paulo Henrique Oliveira Rezende (UFU), Alexandre Carvalho Silva (IF - Goiano) e Alexandre Cardoso, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Alexandre Cardoso, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Cardoso, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Carvalho Silva, Usuário Externo**, em 19/12/2025, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 14:33, 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 https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6944272** e o código CRC **E15AC542**.

Referência: Processo nº 23117.089102/2025-11

SEI nº 6944272

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta etapa tão significativa da minha trajetória acadêmica, expresso minha mais profunda gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Alexandre Cardoso, por sua dedicação, paciência e sabedoria ao longo de todo o processo. Suas críticas construtivas, incentivo constante e expertise foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Cada conversa, revisão e sugestão não apenas aprimorou este trabalho, mas também ampliou minha compreensão sobre o fazer científico.

Aos professores Edgard Lamounier e Gerson Flávio, minha gratidão pela compreensão, apoio e incentivo que tanto significaram nesta jornada.

Ao professor Gabriel Cyrino, meu especial reconhecimento por sua valiosa contribuição e suporte em todas as etapas da pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, especialmente aqueles que integraram a banca examinadora, meu sincero agradecimento pelas contribuições enriquecedoras e pelo rigor acadêmico que aprimoraram esta dissertação.

À Eletrobras/Eletronorte, meu reconhecimento pelo apoio estrutural e financeiro, fundamentais para a viabilização deste trabalho. Aos colegas de laboratório, grupo de estudo e sala de aula, agradeço(a) pela troca de conhecimentos, parcerias e momentos de descontração, que tornaram o caminho mais leve.

À minha família, em especial aos meus pais, Idair Alves de Freitas e Maria José de Freitas, e aos meus filhos, Tales Barbosa Alves, Laura Barbosa Alves e Júlia Barbosa Alves, minha eterna gratidão pelo amor incondicional, apoio emocional e compreensão nos momentos de dedicação intensa. Vocês são minha base e maior inspiração.

Aos amigos e amigas que estiveram ao meu lado nesta jornada, agradeço(a) pela paciência, pelo acolhimento e pelas palavras de incentivo nos momentos de incerteza.

Por fim, a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista, mesmo que não mencionados nominalmente, deixo meu sincero agradecimento. Cada gesto, por menor que pareça, foi fundamental para que este sonho se tornasse realidade.

Que este trabalho não represente apenas um fim, mas um impulso para novas descobertas e contribuições à sociedade.

RESUMO

ALVES, Claudemir J. Uma Arquitetura de Ambiente Virtual Interativo, Suportada por Imagens Aéreas e Esféricas, para Visualização de Dados e de Diagrama Unifilar de Subestações de Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

Subestações de energia elétrica são infraestruturas críticas cuja complexidade e altos níveis de tensão exigem soluções que garantam segurança, agilidade na navegação e eficiência na manutenção. Esta pesquisa desenvolveu uma plataforma digital navegável que integra ortomosaicos gerados por imagens capturadas por drones, plantas CAD (Computer-Aided Design) e imagens esféricas georreferenciadas capturadas em diferentes pontos do pátio de uma subestação. A interface interativa permite alternar entre camadas de visualização e vincular cada equipamento ao seu diagrama unifilar, viabilizando acesso imediato a especificações técnicas e diretrizes de segurança. A metodologia envolveu captura dos dados visuais, processamento fotogramétrico, georreferenciamento via pontos de controle e integração em banco de dados com atributos de cada ativo. Os resultados demonstram que a navegação virtual reduz deslocamentos para inspeção, acelera a identificação de equipamentos críticos e melhora a comunicação entre equipes, diminuindo o tempo de resposta em manutenções preventivas e corretivas. A adoção de drones, modelagem digital e imagens esféricas em um ambiente unificado representa avanço significativo na modernização das práticas de operação e monitoramento de subestações, promovendo maior eficiência, segurança e confiabilidade na gestão desses ativos críticos.

Palavras-chave: subestações de energia elétrica; imagens panorâmicas; esquemáticos CAD; navegação interativa; manutenção elétrica; segurança do trabalho; georreferenciamento; drones; imagens esféricas.

ABSTRACT

ALVES, Claudemir J. An Interactive Virtual Environment Architecture, Supported by Aerial and Spherical Images, for Visualizing Data and Single-Line Diagrams of Electrical Substations. Master's Thesis – Faculty of Electrical Engineering – Federal University of Uberlândia (UFU), Uberlândia, 2025.

Electrical substations are critical infrastructures whose complexity and high voltage levels require solutions that ensure safety, agile navigation, and efficient maintenance. This research developed a navigable digital platform designed to integrate and visualize orthomosaic images generated by drones, CAD (Computer-Aided Design) plans, and spherical georeferenced images captured at different points in the substation yard. The interactive interface allows switching between layers and links each piece of equipment to its single-line diagram, enabling immediate access to technical specifications and safety guidelines. The methodology involves visual data capture, photogrammetric processing, georeferencing via control points, and integration into a database with each asset's attributes. The results demonstrate that virtual navigation reduces the time needed for inspection, accelerates the identification of critical equipment, and improves communication between teams, speeding up response times in preventive and corrective maintenance. The usage of drones, digital modeling, and spherical images in a unified environment represents a significant advance in modernizing the substation operation and monitoring practices, promoting greater efficiency, safety, and reliability in the management of these critical assets.

Keywords: electrical substations, panoramic images, CAD schematics, virtual reality, interactive navigation, maintenance, safety, georeferencing, drones, spherical images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista parcial de uma subestação de 345 kV.	20
Figura 2 - Imagem 360° ilustrando a visualização do ambiente a partir de um único ponto de captura.	21
Figura 3 - Vista aérea parcial de uma subestação, capturada por drone.	23
Figura 4 - Uso de panoramas interativos 360° em sistemas de monitoramento de obras.	32
Figura 5 - Diagrama de fluxo da arquitetura proposta.	38
Figura 6 - Representação esquemática das quatro camadas de informação do sistema.	41
Figura 7 - Ilustração do operador no processo de captura.	42
Figura 8 - Visão de satélite da subestação, com áreas de captura demarcadas.	43
Figura 9 - Exemplo de imagem esférica capturada na Casa de Válvulas no ambiente HVDC.	43
Figura 10 - Visão de satélite da subestação de Porto Velho, com áreas de capturas demarcadas.	44
Figura 11 - Especificações técnicas da Câmera Drone Fimi.	45
Figura 12 - Plano de voo com Drone Fimi S8 SE 2020.	45
Figura 13 - Sobreposição entre Fotografias.	46
Figura 14 - Resultado.	48
Figura 15 - Metadados do arquivo CSV.	49
Figura 16 - Nuvem de pontos esparsa e posições das câmeras no Agisoft Metashape.	50
Figura 17 - Medição de distância no mosaico para validação de precisão geométrica (8,76 m).	51
Figura 18 - Ortomosaico final com linha de medição entre dois pontos.	51
Figura 19 - Ortomosaico final com linha de medição entre dois pontos.	52
Figura 20 - Interface do mapa com parte dos pinos.	53
Figura 21 - Foto 360° exibida ao clicar no seu pino correspondente.	53
Figura 22 - Visualização da camada do ortomosaico, com marcadores georreferenciados posicionados conforme os pontos reais de captura.	55
Figura 23 - Exemplo de camada CAD da subestação sobreposta ao ambiente geoespacial.	56
Figura 24 - Diagrama Unifilar da Subestação de Araraquara 2.	58
Figura 25 - Tela do diagrama unifilar e marcadores correlatos na Subestação de Araraquara 2.	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Filtros aplicados na seleção dos trabalhos e artigos	28
Quadro 2 - Comparativo dos artigos selecionados	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IMU	Unidade de Medição Inercial
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
CAD	Projeto CAD auxiliado por computador
CBM	Manutenção baseada em condições
UAVs	Veículos Aéreos Não Tripulados
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
GIS	Sistema de Informação Geográfica
BIM	Modelagem de informações de construção
GNSS	Sistema global de navegação por satélite
SLAM	Localização e mapeamento simultâneos
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
MDE	Modelos Digitais de Elevação
SCADA	Supervisão, Controle e Aquisição de Dados
ARP	Protocolo de Resolução de Endereços
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual
SLDs	Diagramas de Linha Única
ODS	Estereoscopia Omnidirecional
INS	Sistema de Navegação Inercial
CNN	Rede Neural Convolucional
LiDAR	Detecção e alcance por luz
PNT	Posicionamento, navegação e temporização
SfM	Estrutura a partir do movimento
FID	Distância de início de Fréchet
ATE	Erro Absoluto de Trajetória

RPE	Erro Relativo de Pose
NSS	Estatísticas de cenas naturais
SVR	Regresso de vetor de suporte
IQA	Avaliação da qualidade da imagem
FOV	Campo de Visão
ICP	Ponto mais próximo iterativo
UTM	Módulo de Rastreamento Urchin
FOV	Campo de Visão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 Justificativa da Pesquisa	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Subestações de Energia Elétrica	19
2.1.1 Definição e Função	19
2.2 Imagens Esféricas Georreferenciadas.....	20
2.2.1 Conceito de Imagens Esféricas.....	21
2.2.2 Georreferenciamento de Imagens Esféricas	21
2.3 Drones e Fotogrametria em Infraestruturas Elétricas	22
2.3.1 Aplicações de Drones em Subestações.....	22
2.3.2 Fotogrametria e Mosaicos	23
2.4 Plantas CAD e Diagramas Unifilares de Subestações.....	24
2.4.1 Plantas CAD	24
2.4.2 Diagramas Unifilares.....	25
2.4.3 Integração de Tecnologias para Navegação em Subestações.....	25
2.5 Conclusão	26
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1 Metodologia da Revisão	27
3.2 Estratégias de Busca por Base de Dados	27
3.3 Critérios de Seleção e Filtros Aplicados.....	28
3.4 Análise Preliminar da Literatura.....	29
3.5 Revisão dos Artigos Selecionados.....	29
3.5.1 Procedures for Condition Mapping Using 360° Images.....	29
3.5.2 Seamless 360-degree Panoramic Image Generation based on Diffusion Models	30
3.5.3 OmniSLAM: Omnidirectional Localization and Dense Mapping for Wide-baseline Multi-camera Systems	31
3.5.4 Using 360-Degree Interactive Panoramas to Develop an Information System for Construction Progress Visualization.....	31
3.5.5 Cubemap-Based Perception-Driven Blind Quality Assessment for 360-degree Images	33

3.6 Eixos Temáticos Complementares	34
3.6.1 Fotogrametria Esférica e Bundle Adjustment	35
3.6.2 Georreferenciamento de Modelos 3D a partir de Imagens Esféricas	35
3.6.3 Integração de Modelos 3D com Plataformas CAD/BIM/GIS	35
3.7 Síntese Geral e Conclusões da Revisão	36
4 METODOLOGIA E ARQUITETURA DO SISTEMA.....	37
4.1 Caracterização da Pesquisa.....	37
4.2 Arquitetura Proposta.....	37
4.3 Fase I – Captura da Realidade	38
4.3.1 Captura 360 (Imagens Esféricas).....	38
4.3.2 Drone (Imagens Aéreas).....	38
4.4 Fase II – Processamento	39
4.4.1 Extração de Metadados e Processamento (Imagens Esféricas).....	39
4.4.2 Extração de Metadados e Processamento (Ortomosaico).....	39
4.5 Fase III – Armazenamento em Nuvem.....	40
4.6 Fase IV – Aplicação	40
5 IMPLEMENTAÇÃO	42
5.1 Expedições de Campo	42
5.2 Aerofotogrametria com VANTs.....	44
5.3 Parâmetros de Voo: Altitude, Velocidade, Intervalo de Captura e Sobreposição	46
5.2 Processamento das Imagens Esféricas.....	49
5.2.2 Processamento Fotogramétrico.....	50
5.3. Desenvolvimento da Aplicação ELN360	51
5.3.1 Mapa de Satélite	54
5.3.2 Ortomosaico	54
5.3.3 Planta CAD.....	55
5.3.4 Armazenamento em Nuvem	56
5.3.5 Diagrama Unifilar e Integração com o ELN360	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.1 A Pesquisa como Produto.....	60
6.2 Facilidade de Interação e Usabilidade	60
6.3 Otimização dos Processos de Deslocamento para Inspeção.....	61
6.4 Aumento da Segurança nas Manutenções	62
6.5 Rapidez e Eficiência na Localização de Equipamentos	63

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	65
7.1 Conclusão	65
7.2 Trabalhos Futuros	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

As subestações de energia elétrica são infraestruturas críticas na rede de transmissão e distribuição, vitais para a estabilidade e eficiência do fornecimento de eletricidade (Ferreira *et al.*, 2024). Esses complexos sistemas abrigam uma gama de equipamentos essenciais, incluindo transformadores, disjuntores, capacitores, reatores e chaves seccionadoras, cuja operação segura e contínua é fundamental para a confiabilidade e resiliência do sistema elétrico.

Contudo, a gestão e a manutenção desses ativos representam desafios consideráveis. Subestações são ambientes inherentemente complexos e de alto risco (Simões *et al.*, 2012), exigindo inspeções periódicas rigorosas para garantir o funcionamento adequado e prevenir falhas que poderiam ter impactos severos na distribuição de energia. Os métodos tradicionais de monitoramento, frequentemente baseados em inspeções presenciais, acarretam elevados custos operacionais, riscos significativos para a segurança dos trabalhadores e substanciais dificuldades logísticas, especialmente em instalações remotas ou de difícil acesso (Simões *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2018).

Com o rápido avanço das tecnologias digitais, novas abordagens têm emergido para otimizar a gestão de subestações. O emprego de imagens esféricas georreferenciadas (Barazzetti; Previtali; Scaioni, 2020; Cyrino *et al.*, 2024; Olivete, 2014) e da fotogrametria baseada em drones (Barazzetti; Previtali; Scaioni, 2020; Campos, 2023; Olivete, 2014) permite a criação de modelos detalhados da infraestrutura. Essa capacidade possibilita inspeções remotas e a análise precisa dos equipamentos sem a necessidade de deslocamento físico, minimizando os riscos e custos associados (Cyrino *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2018).

Além disso, a integração dessas imagens com plantas CAD (Al Rawashdeh Balqies Sadoun; Al Fukara, 2012) e diagramas unifilares facilita a correlação entre os elementos físicos da subestação e suas especificações técnicas, promovendo uma melhoria substancial na eficiência dos processos de manutenção e operação (Nordvall; Wiberg; Tarkian, 2023).

Apesar desses avanços promissores, a implementação e adoção em larga escala dessas tecnologias ainda enfrentam desafios significativos. Estes incluem a necessidade de metodologias robustas para a captura e processamento de imagens (Silveira *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2024), a padronização da integração entre diferentes tipos de dados espaciais e técnicos, e a validação contínua da confiabilidade dessas soluções no suporte às complexas operações das subestações (Cyrino *et al.*, 2024).

Diante desse panorama, o problema central que orienta esta pesquisa pode ser formulado da seguinte maneira: de que forma é possível superar as limitações associadas à segurança, aos custos operacionais e ao acesso fragmentado à informação na gestão de subestações de energia elétrica, por meio do desenvolvimento de uma plataforma digital que integre, de forma coerente e interativa, dados geoespaciais, visuais e técnicos?

Para enfrentar esse problema, adotou-se como estratégia o desenvolvimento de uma arquitetura de ambiente virtual concebida como um sistema integrador de informações. Essa arquitetura reúne ortomosaicos de alta resolução obtidos por drones, imagens esféricas georreferenciadas, plantas CAD e diagramas unifilares em uma única plataforma navegável, estruturada para permitir o acesso contextualizado aos dados técnicos dos equipamentos. A hipótese central deste trabalho sustenta que a centralização e a visualização integrada dessas informações potencializam a eficiência operacional, reduzem a necessidade de deslocamentos físicos e ampliam a capacidade de análise, planejamento e tomada de decisão.

Este trabalho, portanto, detalha o projeto, a implementação e a validação de uma plataforma digital interativa que oferece uma representação virtual fiel da subestação. A solução permite a exploração remota do ambiente, o acesso contextualizado a dados críticos dos equipamentos e a simulação de cenários operacionais. Com isso, esta pesquisa visa contribuir para a modernização das práticas de operação e manutenção no setor elétrico, alinhando-se às tendências globais de transformação digital e promovendo uma infraestrutura energética mais resiliente, segura e sustentável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Aprimorar a visualização espacial, a navegação, a manutenção e a gestão de ativos em subestações de energia elétrica, de modo a apoiar de forma mais eficiente as atividades operacionais e a tomada de decisões estratégicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, esta pesquisa estabelece os seguintes objetivos específicos, formulados em termos de resultados esperados nos eixos de visualização, navegação, georreferenciamento, integração de dados e suporte às atividades operacionais:

1. Assegurar cobertura visual contínua e completa de todos os equipamentos e áreas relevantes da subestação no ambiente virtual.
2. Garantir continuidade espacial de navegação entre os diferentes pontos do ambiente, permitindo ao usuário percorrer virtualmente a subestação sem rupturas visuais ou lógicas.
3. Obter georreferenciamento preciso dos panoramas e dos elementos, de modo que cada ponto visual esteja corretamente posicionado no espaço físico real.
4. Disponibilizar uma base cartográfica métrica da subestação, adequada para inspeção visual, análise espacial e planejamento de intervenções.
5. Possibilitar a visualização integrada e sobreposta entre imagens esféricas, ortomosaicos e plantas CAD, permitindo a correlação entre o ambiente real e os modelos técnicos.
6. Viabilizar a navegação interativa orientada por marcadores georreferenciados, permitindo o acesso direto aos equipamentos a partir do ambiente virtual.
7. Permitir a vinculação bidirecional entre cada equipamento e seu respectivo diagrama unifilar, assegurando acesso contextualizado às informações técnicas do sistema elétrico.
8. Avaliar a eficácia do ambiente virtual como ferramenta de apoio à inspeção, operação, treinamento e planejamento, por meio de testes de usabilidade em cenário piloto.

1.2 Justificativa da Pesquisa

A crescente complexidade das redes elétricas e a elevação contínua dos requisitos de confiabilidade, disponibilidade e segurança operacional tornam cada vez mais críticos a forma como as subestações de energia elétrica são geridas, inspecionadas e operadas (Ferreira et al., 2024). Essas instalações concentram ativos de alto valor estratégico, operando sob elevados níveis de tensão e em condições que impõem riscos significativos aos profissionais envolvidos, de modo que falhas de interpretação, atraso na identificação de anomalias ou dificuldades de acesso à informação podem resultar em impactos severos sobre a continuidade do fornecimento, a integridade dos equipamentos e a segurança das equipes.

Os métodos tradicionais de inspeção e acompanhamento dessas infraestruturas ainda dependem fortemente de deslocamentos físicos, consultas fragmentadas a documentos técnicos e interpretações baseadas em representações desconectadas do espaço real. Tal abordagem implica não apenas custos operacionais elevados e maior exposição a riscos ocupacionais, mas também limita a capacidade de análise integrada do ambiente, dificultando o planejamento de intervenções, a coordenação entre equipes e a tomada de decisões em situações críticas, sobretudo em subestações de grande porte ou localizadas em regiões remotas.

Nesse contexto, aprimorar a visualização espacial, a navegação no ambiente da subestação, a manutenção e a gestão dos ativos tornam-se uma necessidade estratégica para o setor elétrico. A ausência de uma visão integrada e espacialmente coerente dos equipamentos, de seus arranjos físicos e de suas interconexões elétricas contribui para a fragmentação da informação, o que afeta diretamente a eficiência das atividades operacionais e a qualidade das decisões técnicas. Como destacado por Wang et al. (2020), ambientes digitais que permitem a representação espacial precisa dos ativos favorecem análises mais rápidas, reduzem erros de interpretação e ampliam a capacidade de resposta a eventos de falha.

A literatura indica que representações visuais ricas, quando corretamente georreferenciadas e integradas a dados técnicos, promovem ganhos substanciais em processos de inspeção, treinamento, planejamento e gestão de infraestruturas críticas (Taneja; Ballan; Pollefey, 2015; Yu et al., 2023). Em particular, a possibilidade de navegar virtualmente por um ambiente realista e espacialmente coerente permite que operadores, engenheiros e equipes de manutenção compreendam melhor a disposição física dos equipamentos, identifiquem pontos críticos e antecipem riscos operacionais sem a necessidade de exposição direta a ambientes energizados.

Adicionalmente, estudos como os de Fonseca (2022) e Pereira, Moud e Gheisari (2017) demonstram que ambientes virtuais interativos baseados em documentação visual estruturada favorecem a redução do tempo de resposta a falhas, o aumento da confiabilidade das análises e a melhoria da segurança operacional. No contexto das subestações de energia elétrica, essas vantagens tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que atrasos ou interpretações incorretas podem resultar em interrupções de fornecimento de grande escala ou em acidentes de alto impacto.

A justificativa desta pesquisa fundamenta-se, portanto, na necessidade de superar as limitações impostas por modelos tradicionais de inspeção e gestão, promovendo uma abordagem que privilegie a integração espacial da informação, a acessibilidade aos dados

técnicos e a navegabilidade do ambiente físico de forma remota e segura. Ao possibilitar que os profissionais visualizem, localizem e interpretem os ativos da subestação dentro de um contexto espacial unificado, cria-se uma base mais sólida para decisões operacionais, planejamento de manutenção, treinamento de novos operadores e gestão estratégica dos sistemas elétricos.

Do ponto de vista organizacional, essa melhoria na visualização e na gestão dos ativos contribui para a redução de custos associados a deslocamentos, retrabalhos e paradas não programadas, além de favorecer uma cultura de operação mais preventiva e menos reativa. A centralização e a contextualização espacial das informações técnicas também facilitam a comunicação entre diferentes equipes, como operação, manutenção, engenharia e planejamento, fortalecendo a coordenação e a eficiência dos processos.

Dessa forma, a relevância desta pesquisa reside no seu potencial de contribuir para uma transformação qualitativa na forma como as subestações são compreendidas, operadas e geridas. Ao focar no aprimoramento da visualização espacial, da navegação, da manutenção e da gestão de ativos, este trabalho alinha-se às demandas contemporâneas do setor elétrico por maior segurança, eficiência e confiabilidade, oferecendo uma base conceitual e tecnológica que sustenta práticas mais modernas e integradas de operação e monitoramento de infraestruturas críticas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o embasamento teórico necessário para a compreensão do trabalho desenvolvido nesta dissertação, que aborda a utilização de imagens esféricas georreferenciadas, vinculadas aos diagramas CAD, integração e navegação em equipamentos de subestações de energia elétrica.

Serão explorados conceitos fundamentais relacionados às subestações de energia, suas funções e componentes, bem como as tecnologias de imagens esféricas (360 graus) e georreferenciamento. Adicionalmente, será discutido o papel crescente dos drones e da fotogrametria na inspeção e gestão de infraestruturas elétricas, contextualizando a relevância da abordagem proposta para a modernização das práticas de operação e monitoramento desses ativos críticos. Por fim, será detalhada a importância e a integração de ortomosaicos, imagens esféricas, planta CAD e diagramas unifilares na criação de uma plataforma digital interativa para subestações.

2.1 Subestações de Energia Elétrica

As subestações de energia elétrica constituem um elo vital no sistema de transmissão e distribuição de eletricidade, atuando como pontos estratégicos para o ajuste dos níveis de tensão e o controle do fluxo energético. Sua existência é imprescindível para garantir que a energia gerada nas usinas chegue aos consumidores finais de forma segura e eficiente.

2.1.1 Definição e Função

As subestações de energia elétrica constituem instalações essenciais ao sistema elétrico, formadas por um conjunto integrado de equipamentos responsáveis por transformar, controlar e distribuir a energia (Figura 1). Sua função primordial é ajustar os níveis de tensão, reduzindo perdas ao longo do transporte e adequando a energia às faixas compatíveis com o consumo.

Essas instalações reúnem diversos componentes que atuam de forma coordenada, como disjuntores, para-raios, chaves seccionadoras, barramentos, relés de proteção e transformadores, entre outros, garantindo segurança operacional, continuidade do fornecimento e flexibilidade nas manobras do sistema. Entre eles, destaca-se o transformador de potência,

elemento central da subestação, encarregado de modificar a relação entre tensão e corrente conforme as necessidades da rede.

Figura 1 - Vista parcial de uma subestação de 345 kV.



Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, a energia gerada em usinas é recebida em tensões elevadas nas subestações, onde dispositivos são empregados para a proteção e o controle dos níveis de tensão conforme as necessidades do sistema, permitindo o transporte por longas distâncias por meio das linhas de transmissão e reduzindo significativamente as perdas energéticas. À medida que a energia se aproxima dos centros de consumo, a tensão é novamente reduzida em outras subestações, viabilizando a distribuição para as redes urbanas e, posteriormente, para residências e estabelecimentos comerciais.

2.2 Imagens Esféricas Georreferenciadas

A evolução da tecnologia de captura e processamento de imagens tem proporcionado novas ferramentas para a documentação e análise de ambientes complexos. As imagens esféricas, também conhecidas como omnidirecionais, representam um avanço significativo nesse campo, oferecendo uma representação visual imersiva e abrangente de um espaço.

2.2.1 Conceito de Imagens Esféricas

Imagens esféricas são fotografias que capturam o ambiente em todas as direções, permitindo uma visualização completa do espaço a partir de um único ponto de observação (figura 2). Elas são criadas a partir da junção de múltiplas fotografias tiradas de um mesmo ponto, que são posteriormente “costuradas” por softwares especializados para formar uma única imagem imersiva.

Figura 2 - Imagem 360° ilustrando a visualização do ambiente a partir de um único ponto de captura.



Fonte: Elaboração própria.

A principal característica dessas imagens é a capacidade de proporcionar uma experiência interativa, onde o usuário pode explorar o ambiente virtualmente, girando a imagem e visualizando detalhes em qualquer direção. Essa imersão é valiosa para diversas aplicações, desde o turismo e o mercado imobiliário até a documentação de infraestruturas críticas.

2.2.2 Georreferenciamento de Imagens Esféricas

O georreferenciamento é o processo de atribuir coordenadas geográficas precisas a dados espaciais, como imagens. No contexto das imagens esféricas, o georreferenciamento

consiste em vincular cada panorama 360 graus a uma localização geográfica exata no mundo real (Hackeloeer et al., 2014).

Esse processo é fundamental para integrar as imagens esféricas a sistemas de informação geográfica (SIG) e outras plataformas de mapeamento. A coleta de dados de posicionamento (geralmente via GPS) no momento da captura da imagem é essencial, e softwares específicos são utilizados para associar essas coordenadas à imagem, garantindo seu posicionamento correto em um ambiente espacial.

No contexto da presente dissertação, o georreferenciamento de imagens esféricas em subestações de energia elétrica é crucial. Ele permite que cada imagem esférica seja precisamente localizada dentro da subestação, possibilitando a vinculação visual dos equipamentos a seus respectivos pontos no espaço.

Essa integração espacial é a base para a criação de plataformas digitais navegáveis, onde é possível alternar entre diferentes camadas de informação (como ortomosaicos e plantas CAD) e acessar dados técnicos específicos de cada ativo diretamente a partir da visualização interativa.

2.3 Drones e Fotogrametria em Infraestruturas Elétricas

A inspeção e o monitoramento de infraestruturas elétricas, como as subestações, são tarefas complexas e de alto risco. A introdução de tecnologias como drones e a fotogrametria tem transformado essas operações, oferecendo métodos mais seguros, eficientes e econômicos em comparação com as abordagens tradicionais (Shupe et al., 2025).

2.3.1 Aplicações de Drones em Subestações

Os drones, ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), equipados com uma variedade de sensores, tornaram-se ferramentas indispensáveis para a inspeção de subestações, (figura 3). Eles podem ser dotados de câmeras visuais de alta resolução, câmeras térmicas para detecção de pontos quentes (indicativos de falhas ou sobrecarga), e até mesmo sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) para levantamento tridimensional preciso.

Figura 3 - Vista aérea parcial de uma subestação, capturada por drone.



Fonte: Elaboração própria.

As aplicações de drones em subestações incluem:

- **Inspeção Visual Detalhada:** Captura de imagens e vídeos de alta qualidade de componentes de difícil acesso, como isoladores, disjuntores e transformadores, permitindo a identificação de danos físicos, corrosão ou desgaste (Wang et al., 2022).
- **Termografia:** Detecção de anomalias térmicas em equipamentos, que podem indicar superaquecimento, conexões frouxas ou falhas internas, prevenindo panes e otimizando a manutenção preditiva.
- **Mapeamento e Modelagem 3D:** Criação de modelos tridimensionais precisos da subestação, úteis para planejamento, simulações e gestão de ativos.

2.3.2 Fotogrametria e Mosaicos

A fotogrametria é a ciência de fazer medições a partir de fotografias. No contexto dos drones, ela envolve a captura de múltiplas imagens aéreas sobrepostas de uma área, que são então processadas por softwares específicos para gerar ortomosaicos, por exemplo.

Um mosaico é uma imagem aérea georreferenciada e retificada, o que significa que ela possui a precisão geométrica de um mapa, sem distorções causadas pela perspectiva da câmera ou pelo relevo do terreno. Os ortomosaicos gerados servem como uma base cartográfica precisa dos dispositivos na subestação.

Esses mosaicos são cruciais para a dissertação, pois fornecem a camada base georreferenciada sobre a qual as plantas CAD e as imagens esféricas podem ser integradas. Essa integração cria uma plataforma digital rica em informações espaciais, permitindo uma navegação interativa e o acesso rápido a dados relevantes dos equipamentos da subestação, conforme proposto no trabalho.

2.4 Plantas CAD e Diagramas Unifilares de Subestações

2.4.1 Plantas CAD

As plantas CAD (*Computer-Aided Design*) são representações gráficas detalhadas de projetos elétricos, incluindo o layout físico de subestações. Elas são essenciais para o planejamento, projeto e construção de subestações, fornecendo informações precisas sobre a localização de equipamentos, estruturas, rotas de cabos e sistemas de aterramento (Panova; Varganova; Panarina, 2019).

O uso de softwares CAD em projetos elétricos oferece diversos benefícios, como a criação de desenhos técnicos precisos, a otimização do dimensionamento de componentes e a padronização de representações. Essas plantas servem como um guia visual para a equipe de engenharia e manutenção, garantindo que a instalação e as intervenções sejam realizadas de acordo com as especificações (Wu, 2021).

No contexto da dissertação, as plantas CAD complementam os ortomosaicos e as imagens esféricas, fornecendo uma camada técnica de informação que pode ser sobreposta para uma compreensão mais aprofundada do ambiente da subestação. A integração das plantas CAD em uma plataforma digital navegável permite que os usuários visualizem o projeto elétrico em conjunto com a realidade capturada pelas imagens, facilitando a identificação de equipamentos e a consulta de detalhes de projeto.

2.4.2 Diagramas Unifilares

O diagrama unifilar é uma representação gráfica simplificada de um sistema elétrico, onde os componentes trifásicos são representados por uma única linha. Em subestações, o diagrama unifilar é um dos documentos mais importantes, pois mostra de forma clara as interconexões dos equipamentos, a sequência de operação e os dispositivos de proteção.

Sua importância reside na capacidade de simplificar a complexidade de um sistema elétrico, tornando-o mais fácil de entender para engenheiros, técnicos e operadores. Ele é fundamental para a análise de fluxo de potência, coordenação de proteção, identificação de falhas e planejamento de manobras (Yang *et al.*, 2024).

No contexto da dissertação, a vinculação de cada equipamento da subestação ao seu diagrama unifilar correspondente, dentro da plataforma digital navegável, é um diferencial. Isso permite que, ao navegar virtualmente pela subestação através das imagens esféricas, o usuário possa acessar imediatamente o diagrama unifilar de um equipamento específico, obtendo informações cruciais sobre suas especificações técnicas e sua função no sistema elétrico.

2.4.3 Integração de Tecnologias para Navegação em Subestações

A proposta central desta dissertação, conforme delineado no resumo, reside na integração de ortomosaicos gerados a partir de imagens capturadas por drones, plantas CAD e imagens esféricas georreferenciadas para criar uma plataforma digital navegável em subestações de energia elétrica. Essa abordagem multidisciplinar visa otimizar a segurança, a agilidade na navegação e a eficiência na manutenção de infraestruturas críticas.

A sinergia entre essas tecnologias permite a criação de um ambiente virtual abrangente, onde diferentes camadas de informação podem ser acessadas de forma intuitiva. Os ortomosaicos fornecem a base espacial precisa do pátio da subestação, as plantas CAD adicionam a dimensão técnica e de projeto, e as imagens esféricas georreferenciadas oferecem a imersão visual e a capacidade de vincular equipamentos a seus dados específicos.

Essa integração resulta em uma interface interativa que permite alternar entre camadas e vincular cada equipamento ao seu diagrama unifilar, proporcionando acesso imediato a especificações técnicas e diretrizes de segurança. A navegação virtual, por sua vez, reduz a necessidade de deslocamentos físicos para inspeção, acelera a identificação de equipamentos

críticos e melhora a comunicação entre as equipes, impactando positivamente o tempo de resposta em manutenções preventivas e corretivas.

2.5 Conclusão

Este capítulo apresentou o referencial teórico que fundamenta a pesquisa sobre a utilização de imagens esféricas georreferenciadas, esquemáticos CAD, imagens drone, mosaicos para integração e navegação em equipamentos de subestações de energia elétrica. Foram abordados os conceitos essenciais sobre subestações, suas funções, classificações e componentes, destacando sua importância no sistema elétrico.

A discussão sobre imagens esféricas e seu georreferenciamento evidenciou o potencial dessas tecnologias para a criação de ambientes visuais imersivos e espacialmente precisos. A análise do uso de drones e fotogrametria em infraestruturas elétricas ressaltou as vantagens operacionais e de segurança que essas ferramentas proporcionam.

Por fim, destacou-se a relevância das plantas em CAD, dos diagramas unifilares, das imagens esféricas e das imagens aéreas, evidenciando como a integração desses elementos se torna fundamental para a proposta da dissertação. A utilização conjunta dessas tecnologias, conforme delineado no estudo, representa um avanço significativo no processo de modernização das práticas de operação e monitoramento de subestações, contribuindo para maior eficiência, segurança e confiabilidade na gestão desses ativos críticos. O conhecimento consolidado neste referencial teórico constitui, assim, uma base sólida para a metodologia empregada e para a análise dos resultados apresentados nos capítulos subsequentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O avanço das tecnologias de aquisição e representação digital de ambientes complexos tem transformado profundamente os processos de inspeção, manutenção e gestão de infraestruturas críticas, como as subestações de energia elétrica. A integração entre imagens esféricas georreferenciadas, fotogrametria aérea com drones, plantas CAD e diagramas unifilares tem se mostrado uma abordagem promissora para superar desafios operacionais, de segurança e de acessibilidade em ambientes de alta periculosidade.

Neste contexto, a presente revisão bibliográfica visa apresentar e analisar os principais estudos que embasam a proposta desta pesquisa, focando em metodologias de modelagem tridimensional, imagens esféricas, fotogrametria, ortofoto, georreferenciamento, navegação virtual interativa, diagramas esquemáticos e unifilares e integração de dados técnicos em subestações.

A escolha por tecnologias baseadas em imagens se justifica pela sua capacidade de oferecer documentação visual rica, cobertura espacial ampla e realista, o que favorece o planejamento, a capacitação técnica e a realização de inspeções remotas. Estudos que aplicam essas tecnologias em contextos correlatos, como construções civis, ambientes industriais e espaços educacionais, também são considerados, dada sua relevância para a adaptação ao setor elétrico.

3.1 Metodologia da Revisão

Para assegurar uma revisão bibliográfica consistente e fundamentada, adotou-se uma estratégia de busca sistemática, pautada por protocolos de pesquisa bem definidos, critérios de seleção rigorosos e análise crítica comparativa das fontes. Esse procedimento metodológico é essencial para garantir a validade, a confiabilidade e a abrangência dos resultados, reduzindo vieses e possibilitando a replicabilidade do estudo.

3.2 Estratégias de Busca por Base de Dados

A pesquisa bibliográfica foi conduzida nas seguintes bases de dados: *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Google Scholar*, *Web of Science*, *Scopus* e repositórios institucionais, como os da CAPES, USP e UFPE. Foram utilizadas *strings* de busca que

combinam termos relacionados a imagens panorâmicas, esféricas e georreferenciadas, modelagem tridimensional, diagramas CAD, diagrama unifilar, inspeção por drones, mosaicos e integração de dados técnicos em subestações de energia elétrica.

As seguintes *strings* de busca foram utilizadas:

- ("electrical substation" AND "panoramic images" AND drones)
- ("360-degree images" AND "power substation" AND georeferenced)
- ("panoramic images" AND "electrical substation" AND "3D modeling")
- ("drone photogrammetry" AND "substation mapping")
- ("interactive navigation" AND "spherical images" AND "electrical substation")
- ("spherical images" AND "electrical substation" AND safety)
- ("360-degree images" AND "electrical substation" AND "CAD integration")
- ("CAD schematics" AND (maintenance OR safety) AND georeferencing)

3.3 Critérios de Seleção e Filtros Aplicados

Para garantir a seleção dos trabalhos mais relevantes, foram adotados filtros progressivos baseados em critérios de relevância temática, qualidade da publicação, período de publicação, entre outros. O **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresenta de forma resumida os filtros aplicados, seus respectivos critérios e a quantidade de artigos resultantes em cada etapa.

Quadro 1 - Filtros aplicados na seleção dos trabalhos e artigos.

Filtro	Critério	Artigos Resultantes
Busca inicial	Todas as <i>strings</i> de busca	~200 artigos
Relevância temática	Relacionados a imagens esféricas, drones, subestações	85 artigos
Qualidade da publicação	Periódicos indexados, conferências reconhecidas	60 artigos
Período de publicação	Últimos 10 anos (2015-2025)	45 artigos
Acesso ao texto completo	Disponibilidade integral do documento	35 artigos
Análise detalhada	Contribuição direta para os objetivos da pesquisa	15 artigos
Seleção final	Maior relevância e profundidade metodológica	5 artigos

Fonte: elaboração própria.

3.4 Análise Preliminar da Literatura

A análise preliminar da literatura evidencia um conjunto diversificado de trabalhos relacionados, direta ou indiretamente, à aplicação de tecnologias digitais para modelagem, inspeção e navegação em ambientes técnicos complexos, com especial destaque para subestações de energia elétrica.

No âmbito desta dissertação, que investiga o uso de imagens esféricas georreferenciadas em subestações de energia elétrica, integração de CAD esquemáticos e navegação interativa, foram identificados cerca de 85 artigos relevantes. Esses estudos abordam o georreferenciamento com uso de drones, as técnicas de levantamento fotogramétrico para geração de imagens georreferenciadas, a integração de CAD esquemáticos extraídos de modelos tridimensionais e as soluções de navegação interativa em ambientes de subestação, bem como suas aplicações voltadas à manutenção e à segurança operacional.

3.5 Revisão dos Artigos Selecionados

Esta seção apresenta uma análise aprofundada dos cinco artigos selecionados, destacando suas contribuições relevantes para o desenvolvimento da presente dissertação. Os estudos revisados abordam o uso de imagens esféricas em diversas aplicações, tais como geração e reconstrução de imagens, localização e mapeamento denso por meio de técnicas de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), avaliação da qualidade visual, mapeamento de condições operacionais e criação de ambientes virtuais interativos.

3.5.1 Procedures for Condition Mapping Using 360° Images

O trabalho de (Barazzetti; Previtali; Scaioni, 2020) aborda a utilização de imagens esféricas para o mapeamento de condições e inspeção de estruturas ou ambientes, com foco nos procedimentos fotogramétricos necessários à obtenção de informações métricas precisas. A proposta central do estudo é o desenvolvimento e validação de um fluxo de trabalho que permita não apenas a visualização panorâmica, mas também a medição e documentação precisa de defeitos ou características relevantes diretamente a partir das imagens esféricas.

A principal contribuição do estudo reside na consolidação de metodologias práticas que vão além da simples observação panorâmica, propondo processos que viabilizam o uso das imagens esféricas em tarefas de documentação e análise métrica.

Dentre essas contribuições, destacam-se três aplicações fundamentais: a retificação métrica, que permite converter segmentos das imagens esféricas em representações planas com escala, possibilitando o mapeamento bidimensional e a quantificação de áreas deterioradas; a modelagem tridimensional, que utiliza séries de imagens esféricas para a geração de modelos 3D texturizados por meio de técnicas de fotogrametria adaptadas; e a detecção de mudanças, que consiste na análise comparativa de imagens obtidas em diferentes momentos, possibilitando o monitoramento de alterações físicas ou estruturais.

Os resultados obtidos no estudo demonstram a viabilidade do uso de imagens esféricas em aplicações que demandam precisão métrica, desde que os procedimentos de calibração e processamento sejam executados de forma rigorosa. A metodologia proposta oferece uma base sólida para a adoção de imagens esféricas em aplicações técnicas, especialmente na engenharia e na inspeção de estruturas, onde a documentação geométrica precisa é essencial.

3.5.2 Seamless 360-degree Panoramic Image Generation based on Diffusion Models

O trabalho de (Feng *et al.*, 2023) propõe o *Diffusion360*, um método inovador para a geração de imagens esféricas de alta qualidade e sem descontinuidades visuais, utilizando modelos de difusão condicionados por descrições textuais. O principal objetivo do estudo é superar as limitações observadas em abordagens anteriores de geração de panoramas esféricos, particularmente no que se refere à coerência visual ao longo das bordas da imagem equiretangular.

A metodologia apresentada baseia-se em modelos de difusão, uma classe de redes neurais que opera revertendo um processo de degradação da imagem por ruído. O diferencial técnico do *Diffusion360* reside na adaptação do processo de difusão para respeitar a topologia esférica inerente às imagens esféricas, especialmente através de mecanismos que asseguram a continuidade entre as bordas laterais da projeção equiretangular.

Os resultados obtidos evidenciam a superioridade do *Diffusion360* em relação aos métodos anteriores de geração de imagens esféricas. As imagens geradas apresentam maior fidelidade visual e um realismo aprimorado, especialmente no que diz respeito à continuidade

entre as bordas, eliminando as transições abruptas e descontinuidades que comprometem a experiência imersiva.

No contexto da presente dissertação, que se concentra no uso de imagens esféricas capturadas em ambientes reais, como subestações elétricas, o trabalho oferece contribuições valiosas no tocante ao entendimento e manipulação de imagens equirretangular. As técnicas propostas para garantir continuidade nas bordas podem ser relevantes para o tratamento e melhoramento de imagens reais.

3.5.3 OmniSLAM: Omnidirectional Localization and Dense Mapping for Wide-baseline Multi-camera Systems

O trabalho de (Won *et al.*, 2020) apresenta o *OmniSLAM*, um sistema de localização e mapeamento denso simultâneos (SLAM) desenvolvido especificamente para câmeras omnidirecionais, integrando de forma fortemente acoplada dados visuais e inerciais. O principal objetivo do trabalho é oferecer uma solução robusta e precisa para estimativa da pose da câmera, ou seja, sua posição e orientação no espaço, enquanto gera simultaneamente um mapa tridimensional denso do ambiente capturado em 360°.

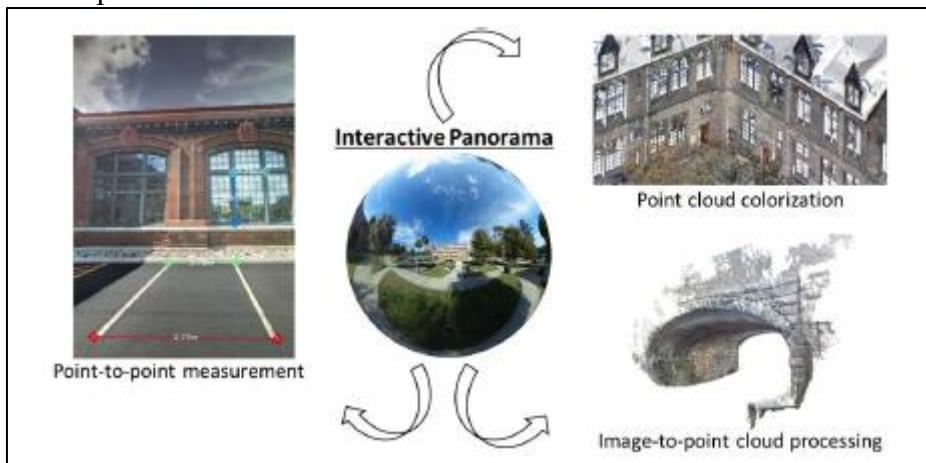
A metodologia adotada baseia-se na fusão visual-inercial fortemente acoplada, em que os dados provenientes da câmera esférica e da IMU (Unidade de Medição Inercial) são integrados em uma única função de otimização, permitindo que as forças de cada sensor compensem as limitações do outro. O sistema é estruturado em duas frentes principais: *front-end* e *back-end*, realizando a extração e rastreamento de características visuais e a otimização da trajetória da câmera respectivamente.

Os resultados demonstram que o sistema atinge elevados níveis de precisão e robustez, especialmente em ambientes desafiadores, nos quais métodos puramente visuais ou de acoplamento fraco não apresentam desempenho satisfatório. No contexto desta dissertação, o trabalho apresenta grande relevância, especialmente no que se refere ao eixo de georreferenciamento, oferecendo uma solução eficaz para posicionar com precisão as imagens no espaço tridimensional.

3.5.4 Using 360-Degree Interactive Panoramas to Develop an Information System for Construction Progress Visualization

O estudo de (Pereira; Moud; Gheisari, 2017) apresenta uma proposta centrada no desenvolvimento e avaliação de um sistema de informação baseado em panoramas interativos 360°, voltado à visualização do progresso em projetos de construção (figura 4). A iniciativa tem como objetivo principal proporcionar aos gestores e demais stakeholders uma ferramenta visual e interativa que permita o acompanhamento do andamento das obras de forma mais clara, contextualizada e intuitiva do que os métodos tradicionais.

Figura 4 - Uso de panoramas interativos 360° em sistemas de monitoramento de obras.



Fonte: Pereira, Moud e Gheisari, (2017).

A metodologia empregada fundamenta-se na captura periódica de imagens esféricas no canteiro de obras, utilizando câmeras específicas em pontos previamente estabelecidos. Essas imagens são posteriormente processadas e organizadas em um tour virtual, que permite a criação de links interativos (*hotspots*) entre diferentes panoramas, os quais podem representar distintas áreas do canteiro ou diferentes momentos no tempo.

Os resultados obtidos pelo estudo demonstram a viabilidade técnica da criação de um sistema baseado em panoramas esféricos interativos para a visualização de progresso em obras. A avaliação indicou que a ferramenta oferece uma compreensão mais ágil e precisa do estado da construção, em comparação aos métodos convencionais.

No contexto da presente dissertação, o trabalho apresenta grande relevância, sobretudo nos eixos de Integração e Navegação. A abordagem prática demonstrada no estudo serve como base conceitual para o desenvolvimento de sistemas que utilizem imagens esféricas como meio de documentação interativa, aplicando-se de forma análoga ao ambiente das subestações elétricas.

3.5.5 Cubemap-Based Perception-Driven Blind Quality Assessment for 360-degree Images

O trabalho de (Jiang et al., 2021) aborda o problema da Avaliação de Qualidade de Imagem (*Image Quality Assessment* – IQA) para imagens esféricas, com foco específico na avaliação cega (Blind IQA – BIQA), que se caracteriza pela ausência de uma imagem de referência original sem distorções. A proposta central consiste no desenvolvimento de um método automático e eficaz para prever a qualidade perceptiva de imagens esféricas, incorporando princípios da percepção visual humana.

A metodologia proposta inicia-se com a conversão da imagem esférica original, usualmente apresentada em formato equiretangular, para a projeção *cubemap*, que segmenta a cena em seis faces ortogonais, correspondentes às faces de um cubo. Essa transformação proporciona uma representação mais regular e isotrópica, mais bem adaptada ao processamento computacional.

Os resultados apresentados demonstram que o método baseado na projeção *cubemap*, aliado à extração de características perceptivas, alcança desempenho competitivo ou superior em comparação com outras abordagens de BIQA disponíveis na literatura.

Embora a avaliação de qualidade de imagem não constitua o foco principal da presente dissertação, o trabalho fornece contribuições importantes para a compreensão do processamento de imagens esféricas, particularmente no que tange à representação *cubemap*, que pode ser relevante em etapas posteriores do pipeline de documentação e visualização.

O Erro! Fonte de referência não encontrada. sintetiza as principais características metodológicas dos cinco trabalhos selecionados, considerando seis critérios de avaliação: uso de imagens esféricas, georreferenciamento, ambiente interativo, integração com esquemas CAD/unifilar, geração de mosaico e banco de dados associado.

Quadro 2 - Comparativo dos artigos selecionados.

Autor	Imagens Esféricas	Georreferenciamento	Ambiente Interativo	Integração D. unifilar/ Imagens	Ortomosaico
Barazzetti, Previtali e Scaioni (2020)	✓	✓	X	X	X
Gu, J., et al. (2023) - Diffusion360	✓	X	X	X	X
Won, C., et al. (2020)- mniSLAM	✓	✓	X	✓	✓
Eiris Pereira, Moud & Gheisari (2017)	✓	✓	✓	X	✓
Jiang, S., et al. (2021) - Cubemap	✓	✓	✓	X	✓

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que, embora todas as publicações analisadas utilizem imagens esféricas, apenas quatro realizam o georreferenciamento completo, e somente duas exploram ambientes interativos. Isso evidencia uma limitação no aproveitamento pleno dos recursos oferecidos por esse tipo de imagem.

Adicionalmente, a integração com esquemas CAD ou diagramas unifilares é pouco abordada, estando presente apenas no estudo de (Won et al., 2020). Tal fato indica uma lacuna relevante na literatura, especialmente no que diz respeito à interoperabilidade entre representações visuais e modelos técnicos.

Quanto à geração de mosaicos, esta é mencionada em três estudos, no entanto, apenas dois deles associam essa geração a um banco de dados estruturado, o que restringe o potencial de sistematização e reutilização da informação visual coletada.

3.6 Eixos Temáticos Complementares

Além dos artigos específicos analisados, é imprescindível considerar determinados eixos temáticos que, embora abordados de forma transversal na literatura, desempenham papel fundamental na consolidação da proposta metodológica desta dissertação.

3.6.1 Fotogrametria Esférica e Bundle Adjustment

A fotogrametria esférica constitui a base teórica e técnica essencial para a reconstrução tridimensional precisa de ambientes a partir de imagens capturadas com câmeras panorâmicas. Diferentemente do modelo de câmera *pinhole*, a fotogrametria esférica requer a formulação de novos modelos matemáticos capazes de descrever com precisão a projeção e orientação espacial das imagens.

Um elemento central neste contexto é o *bundle adjustment*, que consiste em um processo de otimização simultânea das posições e orientações externas das imagens, bem como das coordenadas tridimensionais dos pontos de ligação, com o objetivo de minimizar os erros de reprojeção.

3.6.2 Georreferenciamento de Modelos 3D a partir de Imagens Esféricas

O georreferenciamento refere-se ao processo de posicionamento do modelo 3D reconstruído, originalmente em um sistema de coordenadas local, em um sistema de referência geográfico ou topográfico, como UTM (*Urchin Tracking Module*). Diversas metodologias são descritas na literatura para alcançar esse objetivo, incluindo o uso de pontos de controle terrestre GCPs (*Ground Control Points*), orientação direta com sensores embarcados, e registro com dados externos.

3.6.3 Integração de Modelos 3D com Plataformas CAD/BIM/GIS

O terceiro eixo temático é crucial, mergulha na fase vital de integração de modelos 3D georreferenciados com os sistemas de informação geoespacial (GIS), *Building Information Modeling* (BIM) e *Computer-Aided Design* (CAD) que são pilares nas áreas de engenharia, planejamento urbano, gestão de infraestruturas e patrimônio. A capacidade de harmonizar dados 3D ricos com essas plataformas estabelecidas é fundamental para desbloquear análises mais sofisticadas, visualizações imersivas e tomadas de decisão informadas.

3.7 Síntese Geral e Conclusões da Revisão

Esta seleção de cinco artigos, complementada pelos eixos temáticos adicionais, oferece uma base sólida para a esta dissertação.

O trabalho de (Barazzetti; Previtali; Scaioni, 2020) fornece a base metodológica para o processamento fotogramétrico e métrico de imagens esféricas, essencial para a modelagem precisa. (Pereira; Moud; Gheisari, 2017) demonstra uma abordagem prática para criar sistemas de navegação interativos baseados em panoramas esféricas. (Won *et al.*, 2020) apresenta uma solução robusta para localização e mapeamento denso usando câmeras omnidirecionais. Os demais trabalhos oferecem insights sobre o processamento e a avaliação de imagens esféricas.

O valor agregado da dissertação residirá na combinação dessas tecnologias e processos, aplicando-os ao domínio específico das subestações elétricas, onde a documentação precisa, a gestão integrada da informação e a visualização intuitiva são de grande importância para operação, manutenção e segurança.

Com base na análise crítica da literatura especializada, pode-se concluir que a utilização de imagens esféricas georreferenciadas constitui uma abordagem metodológica robusta e promissora para a modelagem, integração e navegação em ambientes técnicos complexos, como subestações de energia elétrica. A dissertação se apoia em fundamentos consolidados, mas também propõe inovações ao integrar esses componentes em um fluxo de trabalho coerente e orientado para aplicações práticas no setor elétrico.

4 METODOLOGIA E ARQUITETURA DO SISTEMA

A presente pesquisa adota uma metodologia de caráter multidisciplinar e aplicado, direcionada ao desenvolvimento de uma plataforma digital navegável destinada à gestão e ao monitoramento de subestações de energia elétrica. O objetivo central consiste em integrar e harmonizar tecnologias avançadas de aquisição e modelagem de dados espaciais, como imagens esféricas georreferenciadas, fotogrametria aérea por veículos aéreos não tripulados (UAVs) e modelos de projeto assistido por computador (CAD). Essa integração busca viabilizar uma interface interativa e intuitiva que proporcione uma navegação virtual precisa e imersiva no ambiente das subestações.

A abordagem metodológica foi estruturada em fases interdependentes, de forma a garantir um fluxo de trabalho coerente e sistemático, abrangendo desde a coleta e o processamento dos dados até a validação final do sistema. Cada etapa foi delineada com foco na precisão métrica, na consistência geoespacial e na aplicabilidade prática da solução desenvolvida, assegurando a conformidade com as normas da ABNT e com as boas práticas da fotogrametria digital (Fraser, 2013; Barazzetti et al., 2020).

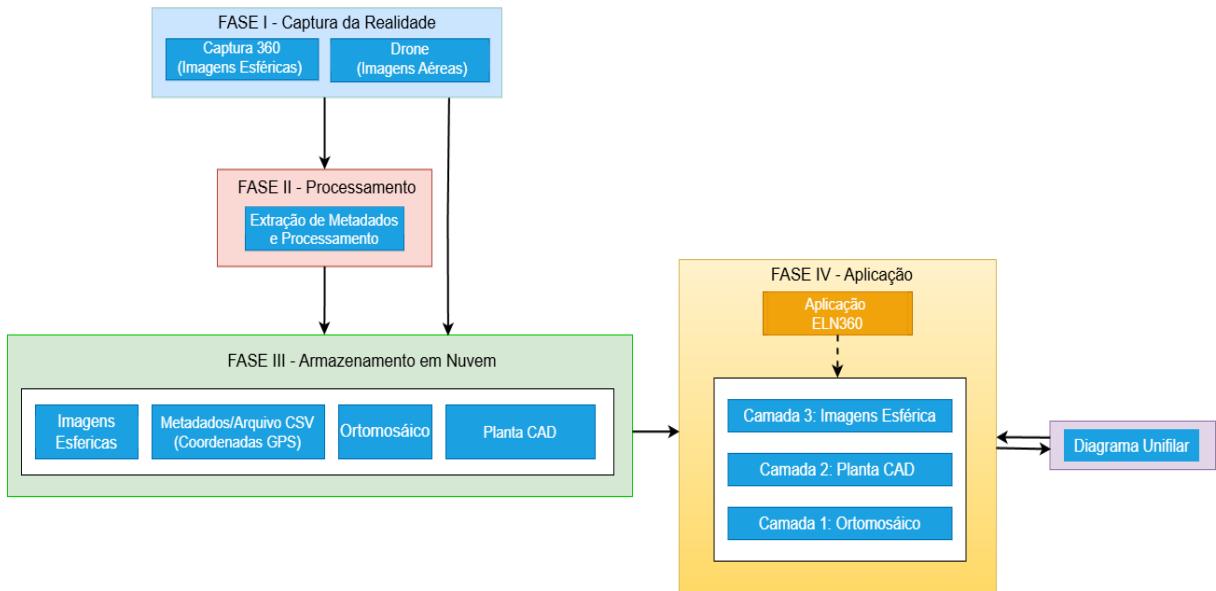
4.1 Caracterização da Pesquisa

Esta pesquisa classifica-se como aplicada, uma vez que visa à geração de conhecimento voltado à utilização prática, direcionado à solução de problemas específicos no contexto da gestão de infraestruturas elétricas. Adota-se uma abordagem experimental e de desenvolvimento, na qual um sistema denominado “ELN360” é projetado, implementado e avaliado com o objetivo de validar a metodologia proposta.

4.2 Arquitetura Proposta

A arquitetura do sistema proposto é ilustrada na figura 5. O fluxo metodológico foi estruturado em quatro fases principais, organizadas de forma sequencial e integrada, assegurando a rastreabilidade dos dados e a qualidade das informações em cada etapa do processo. Essa arquitetura foi concebida para garantir a modularidade e a escalabilidade do sistema, permitindo que cada fase seja executada de forma independente, mas com resultados que se integram de maneira coesa.

Figura 5 - Diagrama de fluxo da arquitetura proposta.



Fonte: Elaboração própria.

4.3 Fase I – Captura da Realidade

4.3.1 Captura 360 (Imagens Esféricas)

O processo de captura da realidade fundamenta-se na utilização de imagens esféricas, obtidas por meio de uma câmera omnidirecional capaz de registrar o ambiente em 360°, formando uma representação imersiva do espaço físico. Para esta pesquisa, empregou-se a câmera *Insta360 One X2*, selecionada por apresentar características alinhadas às exigências do estudo, como alta resolução de captura e conexão com módulo de GPS do smartphone, que permite o georreferenciamento automático das imagens. Esse georreferenciamento constitui um elemento essencial do método, pois vincula cada panorama a coordenadas geográficas precisas (latitude, longitude e altitude), viabilizando sua integração posterior com demais camadas de informação geoespacial.

4.3.2 Drone (Imagens Aéreas)

A aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) é o método utilizado para a obtenção de uma visão aérea detalhada da subestação. O fundamento teórico

desta técnica reside na captura de imagens aéreas com alta sobreposição, que são posteriormente processadas para gerar produtos cartográficos de alta precisão.

A sobreposição das imagens, tanto frontal quanto lateral, é um requisito crítico e segue as recomendações de normas técnicas, como as da ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*), que preconizam sobreposições mínimas de 60% para garantir a correta reconstrução tridimensional. Os parâmetros de voo, como altitude e velocidade, são definidos com base em um compromisso entre a resolução espacial desejada (Ground Sample Distance - GSD) e a segurança operacional em ambientes de alta interferência eletromagnética, como as subestações.

4.4 Fase II – Processamento

4.4.1 Extração de Metadados e Processamento (Imagens Esféricas)

O processamento das imagens esféricas inicia-se pela etapa de *stitching*, técnica responsável por unir automaticamente os registros capturados pelas lentes da câmera omnidirecional, resultando em um panorama contínuo de 360°. Esse procedimento é realizado no software *Insta360 Studio*, que aplica algoritmos de alinhamento geométrico, correção de distorções ópticas e suavização das linhas de junção, assegurando uma representação visual uniforme e adequada.

Em seguida, procede-se à extração dos metadados EXIF (*Exchangeable Image File Format*). Essa etapa é fundamental, pois permite recuperar informações críticas incorporadas automaticamente pelo dispositivo durante a captura, como as coordenadas geográficas (latitude e longitude) fornecidas pelo GPS e o *timestamp* para organização temporal e rastreabilidade da aquisição.

4.4.2 Extração de Metadados e Processamento (Ortomosaico)

O processamento fotogramétrico das imagens aéreas é fundamentado no método *Structure from Motion* (SfM), uma técnica que permite reconstruir a estrutura tridimensional de uma cena a partir de uma série de imagens bidimensionais com sobreposição. O software *Agisoft Metashape* foi escolhido por ser uma ferramenta consolidada na área. O processo inclui o alinhamento das imagens, a geração de uma nuvem de pontos densa, a criação de um Modelo

Digital de Superfície (MDS) e, finalmente, a ortorretificação das imagens para a criação de um ortomosaico.

4.5 Fase III – Armazenamento em Nuvem

A metodologia adotada estabelece o armazenamento em nuvem como elemento central da gestão e organização dos dados. A plataforma *Google Cloud Storage* foi selecionada com base em critérios de alta disponibilidade, elevada durabilidade dos objetos armazenados, escalabilidade elástica e ampla compatibilidade com integrações por meio de APIs (*Application Programming Interface*). Esses atributos garantem não apenas a confiabilidade no acesso, mas também a capacidade de sustentar o crescimento contínuo do volume de dados gerados pelo sistema.

A arquitetura de dados foi concebida de forma hierárquica e modular, segmentando os diferentes tipos de informações (imagens esféricas, metadados, ortomosaicos, documentos complementares e demais recursos geoespaciais) em estruturas de pastas independentes. Essa organização facilita o gerenciamento, a rastreabilidade e o versionamento dos arquivos, além de otimizar o acesso programático pela aplicação final, permitindo consultas eficientes, carregamento seletivo de conteúdos e integração fluida com os módulos de navegação, visualização e análise do ambiente.

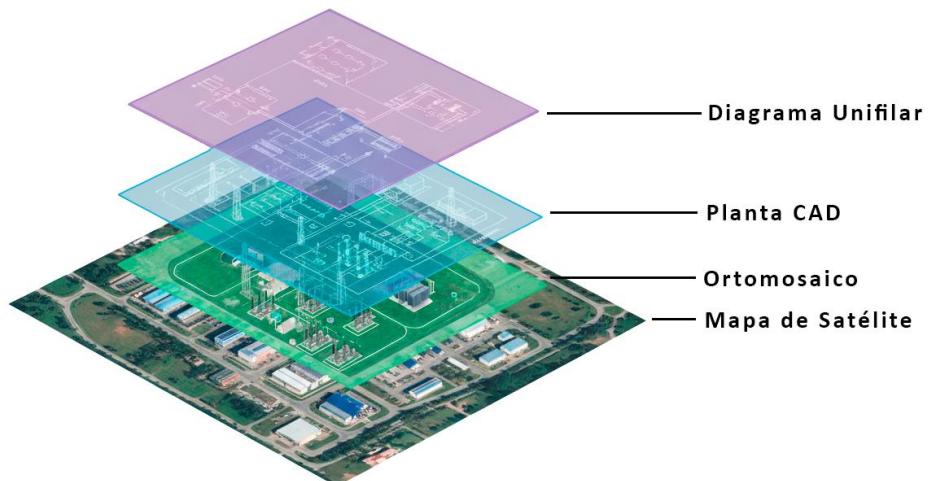
4.6 Fase IV – Aplicação

A fase de aplicação compreende a IMPLEMENTAÇÃO “ELN360”, concebido como uma plataforma imersiva de informação geográfica (GIS) voltada à visualização, navegação e análise espacial de subestações. A arquitetura da aplicação organiza-se em quatro camadas de informação sobrepostas, estruturadas de modo a fornecer diferentes níveis de detalhe e contexto: mapa de satélite, ortomosaico, planta CAD e diagrama unifilar, conforme ilustrado na Figura 6.

A opção metodológica por posicionar o ortomosaico como segunda camada, em sobreposição direta às imagens de satélite, constitui uma decisão estratégica fundamental. Enquanto imagens de satélite oferecem cobertura ampla, apresentam limitações significativas em termos de resolução espacial, atualidade e precisão geométrica. Em contraste, o ortomosaico produzido a partir do voo fotogramétrico fornece uma representação detalhada, métrica e

atualizada da área da subestação, atendendo aos requisitos de inspeções visuais, identificação de equipamentos, detecção de anomalias físicas e apoio ao planejamento de intervenções.

Figura 6 - Representação esquemática das quatro camadas de informação do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, com apoio da inteligência artificial ChatGPT.

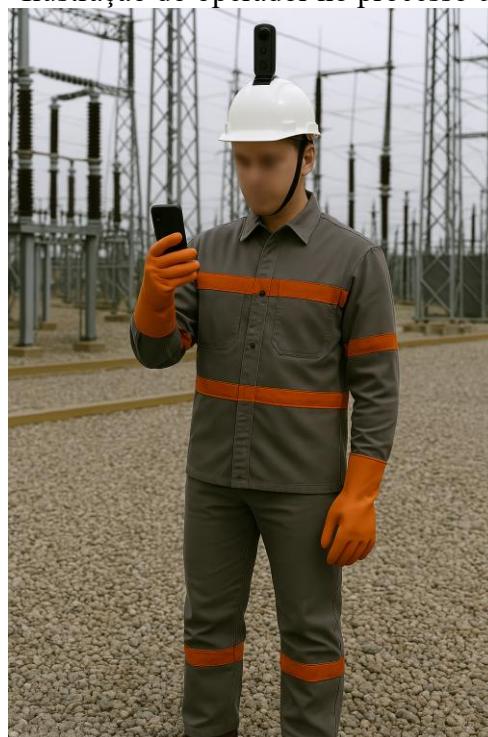
5 IMPLEMENTAÇÃO

5.1 Expedições de Campo

Com o objetivo de garantir estabilidade, precisão e uniformidade no processo de captura, a câmera foi fixada ao capacete (EPI) do operador (figura 7) e conectada a um smartphone por meio do aplicativo *Insta360*. Durante as atividades em campo, o operador deslocava-se em intervalos regulares de aproximadamente três metros, acionando a captura das imagens pelo dispositivo móvel. Esse procedimento foi executado de maneira sistemática e padronizada, assegurando cobertura completa e homogênea das áreas de interesse.

A coleta de dados ocorreu em três expedições distintas, resultando em um total de 2.998 imagens esféricas georreferenciadas. A primeira expedição, realizada na Subestação Araraquara 2, produziu 1.180 fotografias. A segunda, conduzida na Sala de Válvulas da mesma subestação, adicionou 260 imagens. Por fim, a terceira expedição, efetuada na Subestação de Porto Velho, gerou 1.558 registros, permitindo validar a metodologia em um ambiente de maior complexidade operacional. As áreas de captura foram devidamente documentadas, conforme ilustrado nas figuras 8, 9 e 10.

Figura 7 - Ilustração do operador no processo de captura.



Fonte: Elaborado pelo autor, com apoio da inteligência artificial ChatGPT.

Figura 8 - Visão de satélite da subestação, com áreas de captura demarcadas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 9 - Exemplo de imagem esférica capturada na Casa de Válvulas no ambiente HVDC.



Fonte: Elaboração própria

Figura 10 - Visão de satélite da subestação de Porto Velho, com áreas de capturas demarcadas.



Fonte: Elaboração própria.

5.2 Aerofotogrametria com VANTS

A aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) foi empregada como método principal para a obtenção de uma visão aérea detalhada da subestação de energia. Essa técnica baseia-se na captura sistemática de imagens aéreas com elevada sobreposição, possibilitando a geração de produtos cartográficos de alta precisão métrica por meio de processamento fotogramétrico.

Neste estudo, utilizou-se a câmera embarcada no drone FIMI X8 SE, cujas principais características técnicas são apresentadas na figura 11. O equipamento foi selecionado por sua estabilidade de voo, precisão de posicionamento e capacidade de captura em alta resolução, requisitos essenciais para aplicações fotogramétricas em ambientes industriais complexos.

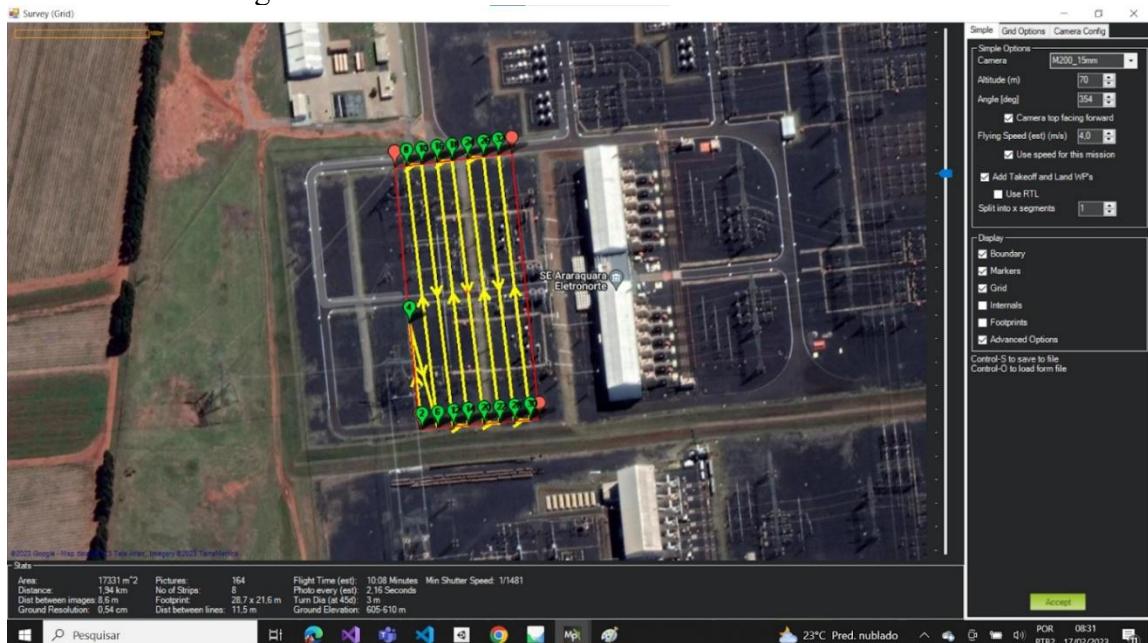
Figura 11 - Especificações técnicas da Câmera Drone Fimi.

Gimbal	3 eixos
Vídeo	4K 30fps 2.7k 60 fps 1080p 90 fps 720p 120 fps
Formato de vídeo	MP4
Foto	JPG e DNG
Abertura	f2.0 (distância focal 26mm)
Sensor	Sony CMOS 1/2,6"
ISO	100 - 3200
Campo de Visão	80°

Fonte: Elaboração própria

O êxito da aerofotogrametria depende de um plano de voo que assegure sobreposição lateral e frontal adequadas, cobrindo integralmente a área de interesse. Nesta pesquisa, elaboraram-se diferentes planos de voo (figura 12), variando trajetórias e parâmetros específicos, de modo a capturar imagens em condições distintas e maximizar a precisão do mosaico.

Figura 12 - Plano de voo com Drone Fimi S8 SE 2020.



Fonte: Elaboração própria.

5.3 Parâmetros de Voo: Altitude, Velocidade, Intervalo de Captura e Sobreposição

Em ambientes de subestações de alta tensão, os elevados campos eletromagnéticos podem afetar a estabilidade da aeronave e a qualidade do sinal GPS, comprometendo o georreferenciamento das imagens. Assim, a definição dos parâmetros de voo buscou equilibrar segurança operacional, resolução espacial e qualidade fotogramétrica, de forma a atender às recomendações de sobreposição mínima ($\geq 75\%$ frontal; $\geq 65\%$ lateral).

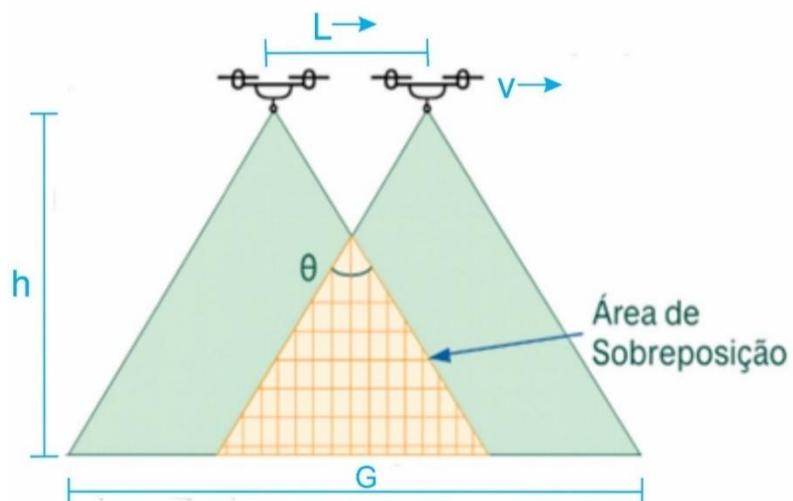
a) Altitude de Voo (h)

Foram avaliadas três altitudes de operação: 120 m, 60 m e 40 m. Altitudes mais baixas proporcionam maior resolução espacial das imagens, porém aumentam a suscetibilidade a interferências eletromagnéticas, especialmente em áreas próximas a subestações de alta tensão. Após os testes, foi definida a altitude de 40 m como limite mínimo (figura 13), considerada a mais adequada para esta aplicação específica, por conciliar qualidade de imagem e segurança operacional.

Os valores adotados foram determinados com base nas condições particulares desta pesquisa e não devem ser utilizados como referência geral para o planejamento de missões aerofotogramétricas. Esses parâmetros refletem circunstâncias específicas do estudo e não devem ser extrapolados para outros contextos ou tipos de levantamento.

Tais configurações possibilitaram a obtenção de imagens com qualidade superior às exigências mínimas, assegurando mosaicos de alta precisão.

Figura 13 - Sobreposição entre Fotografias.



Fonte: Elaboração própria.

Onde:

- G = Dimensão da imagem no solo (m)
- h = Altitude de voo (m)
- θ = Campo de Visão (FOV) da câmera (em graus)
- v = velocidade de Avanço(m/s)
- L = Distância percorrida entre disparos(m)

A dimensão projetada da imagem no solo (G) em um dado eixo é calculada por:

$$G = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

Com $\theta = 80^\circ$ (FOV da câmera) e $h = 40$ m:

$$G = 2 \cdot 40 \cdot \tan(40^\circ) = 67,13 \text{ m} \quad (2)$$

b) Velocidade de Avanço (v) e Intervalo de Captura (Δt)

Considerando que foram definidos os parâmetros de voo:

$$v = 3 \text{ m/s}$$

$$\Delta t = 2 \text{ s}$$

Temos:

$$L = v \cdot \Delta t = 3 \cdot 2 = 6 \text{ m} \quad (3)$$

c) Sobreposição Frontal ($O_{frontal}$)

$$O_{frontal} = \frac{G_{frontal} - L}{G_{frontal}} \quad (4)$$

Substituindo os valores:

$$O_{frontal} = \frac{67,13 - 6}{67,13} = 91\% \quad (5)$$

d) Sobreposição Lateral (S)

O espaçamento entre linhas de voo (S) deve respeitar:

$$O_{lateral} = \frac{G_{lateral} - S}{G_{lateral}} \quad (6)$$

Rearranjando:

$$S \leq (1 - O_{lateral}) \cdot G_{lateral} \quad (7)$$

Para $O_{lateral} = 65\%$

$$S \leq (1 - 0,65) \cdot 67,13 = 23,5 \text{ m} \quad (8)$$

Assim, qualquer espaçamento de faixa menor ou igual a 23,5 m, assegura a sobreposição lateral requerida.

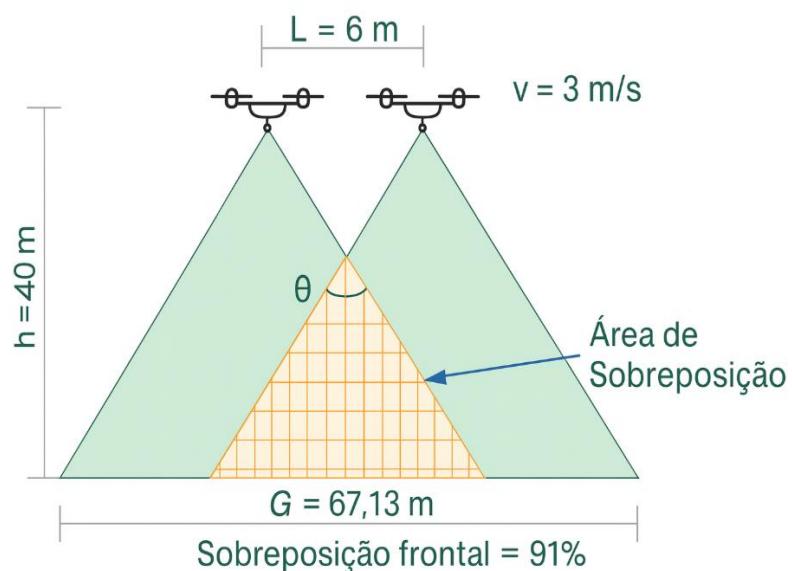
e) Resultados Obtidos

Com os parâmetros ajustados às condições desta aplicação em subestação elétrica, obteve-se:

- Imagem no solo: $G = 67,13 \text{ m}$.
- Distância entre disparos: $L = 6 \text{ m}$.
- Sobreposição frontal: $Of = 91\%$.

Sobreposição lateral: $Ol \geq 65\%$, para espaçamento $S \leq 23,5 \text{ m}$.

Figura 14 - Resultado.



Fonte: Elaboração própria.

5.2 Processamento das Imagens Esféricas

As imagens esféricas foram processadas no Insta360 Studio 2023, onde se realizou a etapa de *stitching* e os ajustes necessários para geração dos panoramas finais. Em seguida, procedeu-se à extração dos metadados EXIF por meio do software *EXIF Extractor*, resultando em um arquivo CSV estruturado, utilizado como referência para o posicionamento geográfico das imagens no sistema. A figura 15 apresenta um exemplo do arquivo formatado para leitura pela aplicação).

Figura 15 - Metadados do arquivo CSV.

1	file-name	latitude	longitude	level
2	IMG_20230620_111553_00_002.jpg	-21.82990599999988	-48.3459975000004	1
3	IMG_20230620_111737_00_003.jpg	-21.8301470000017	-48.345739999998	1
4	IMG_20230620_111757_00_004.jpg	-21.8298579999998	-48.3459455000011	1
5	IMG_20230620_111814_00_005.jpg	-21.8298529999998	-48.3458655000024	1
6	IMG_20230620_111839_00_006.jpg	-21.8298439999995	-48.3457600000014	1
7	IMG_20230620_111907_00_007.jpg	-21.8298384999997	-48.3456520000018	1
8	IMG_20230620_111928_00_008.jpg	-21.8298310000044	-48.3455904999994	1
9	IMG_20230620_111956_00_009.jpg	-21.829899999995	-48.3455735000016	1
10	IMG_20230620_112019_00_010.jpg	-21.8299864999988	-48.345558500001	1
11	IMG_20230620_112039_00_011.jpg	-21.8300664999993	-48.3455535000008	1
12	IMG_20230620_112056_00_012.jpg	-21.830133499999	-48.3455485000013	1
13	IMG_20230620_112114_00_013.jpg	-21.8301384999998	-48.3456125000001	1
14	IMG_20230620_112135_00_014.jpg	-21.8301464999987	-48.3456780000008	1
15	IMG_20230620_112201_00_015.jpg	-21.8301485	-48.3457414999998	1
16	IMG_20230620_112221_00_016.jpg	-21.830152999999	-48.3457984999994	1
17	IMG_20230620_112239_00_017.jpg	-21.8301579999987	-48.3458449999995	1
18	IMG_20230620_112256_00_018.jpg	-21.830170999999	-48.3459275	1

Fonte: Elaboração própria.

O arquivo CSV consolidado contém os campos essenciais para a geolocalização e organização das imagens, descritos a seguir:

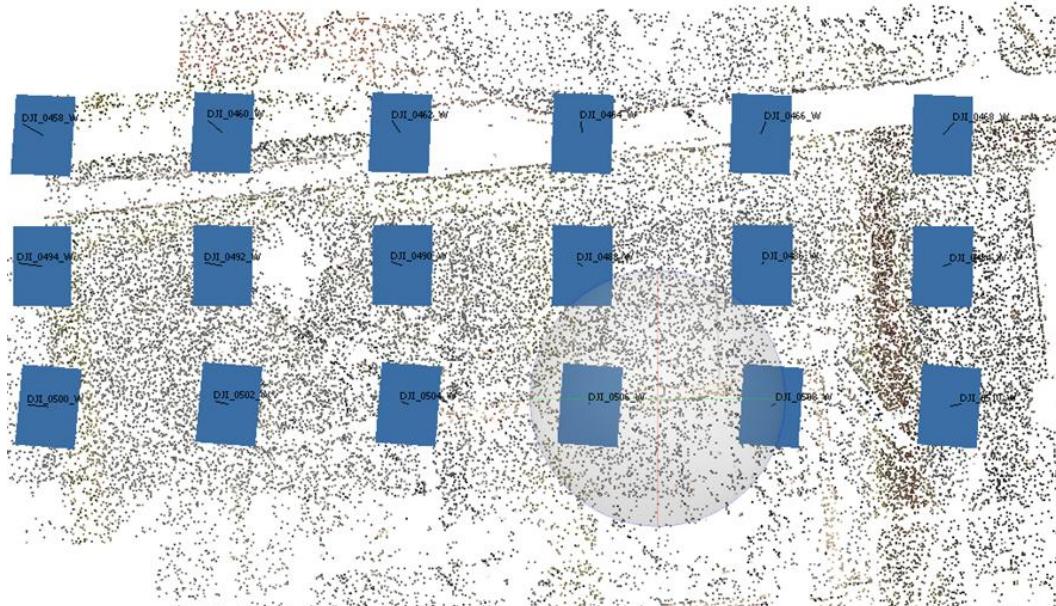
- “file-name”: Nome do arquivo da imagem 360°, incluindo sua extensão. Utilizado como referência direta no sistema para localizar e carregar a foto correspondente.
- “latitude”: Coordenada geográfica que indica a posição norte-sul do ponto onde a imagem foi capturada.
- “longitude”: Coordenada geográfica que indica a posição leste-oeste do ponto onde a imagem foi capturada.
- “level”: Identifica o nível, pavimento ou setor onde a imagem foi capturada. Este campo representa a posição vertical ou hierárquica da fotografia na estrutura. No contexto da Bi-Válvula, especifica a altura correspondente à área fotografada (por exemplo, o andar, a elevação ou a seção vertical da Bi-Válvula).

Esse conjunto de informações garante que cada panorama seja corretamente identificado, organizado e posicionado no ambiente virtual, assegurando coerência espacial e navegabilidade precisa dentro do sistema.

5.2.2 Processamento Fotogramétrico

O processamento das imagens aéreas no *Agisoft Metashape* resultou na geração de uma nuvem de pontos densa (figura 16) e, subsequentemente, em um ortomosaico com resolução de 2 cm/pixel (figura 17). A validação da precisão geométrica do mosaico, realizada através de medições de controle, apresentou desvios inferiores a 80 cm (figura 18), confirmando a alta acurácia do produto.

Figura 16 - Nuvem de pontos esparsa e posições das câmeras no Agisoft Metashape.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 - Medição de distância no mosaico para validação de precisão geométrica (8,76 m).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 - Ortomosaico final com linha de medição entre dois pontos.



Fonte: Elaboração própria.

5.3. Desenvolvimento da Aplicação ELN360

O “ELN360” foi desenvolvido utilizando o motor gráfico *Unity 3D* como base. Toda a lógica do sistema foi implementada utilizando a linguagem de programação C#, assegurando uma estrutura robusta e de fácil manutenção.

Uma das funcionalidades chave do “ELN360” é a interação com o mapa de satélite da subestação, possibilitada pela integração com a API do *Bing Maps SDK for Unity*. Através desta integração, os usuários podem explorar o mapa utilizando o mouse, oferecendo uma experiência intuitiva e prática. Além disso, o uso da API garante imagens de satélite sempre atualizadas.

Com base no arquivo CSV gerado anteriormente, marcadores georreferenciados para cada foto são inseridas no mapa. Esses marcadores são automaticamente posicionados nas suas respectivas coordenadas de latitude e longitude assim que a aplicação é iniciada. Para facilitar a visualização, os marcadores foram agrupados em “clusters”, permitindo uma compreensão rápida da distribuição das fotos em diferentes áreas da subestação. A figura 19 oferece uma visão geral do mapa da subestação de Porto Velho através da API do *Bing Maps*, com os marcadores agrupados em “clusters”, indicando a quantidade de fotos em cada região.

Figura 19 - Ortomosaico final com linha de medição entre dois pontos.



Fonte: Elaboração própria.

Ao ampliar o mapa, os marcadores são exibidos em suas posições correspondentes. O marcador que representa a foto atualmente selecionada é destacado em amarelo para facilitar a identificação pelo usuário. Ao clicar em qualquer um dos marcadores, a foto 360° associada é exibida na tela, permitindo que o usuário interaja com ela através de comandos de rotação e zoom. As figuras 20 e 21 ilustram a interface do mapa com os marcadores e uma foto 360° sendo exibida após clicar em um dos marcadores. Essa funcionalidade proporciona uma experiência imersiva e intuitiva, permitindo uma análise detalhada das fotografias dentro do sistema “ELN360”.

Figura 20 - Interface do mapa com parte dos pinos.

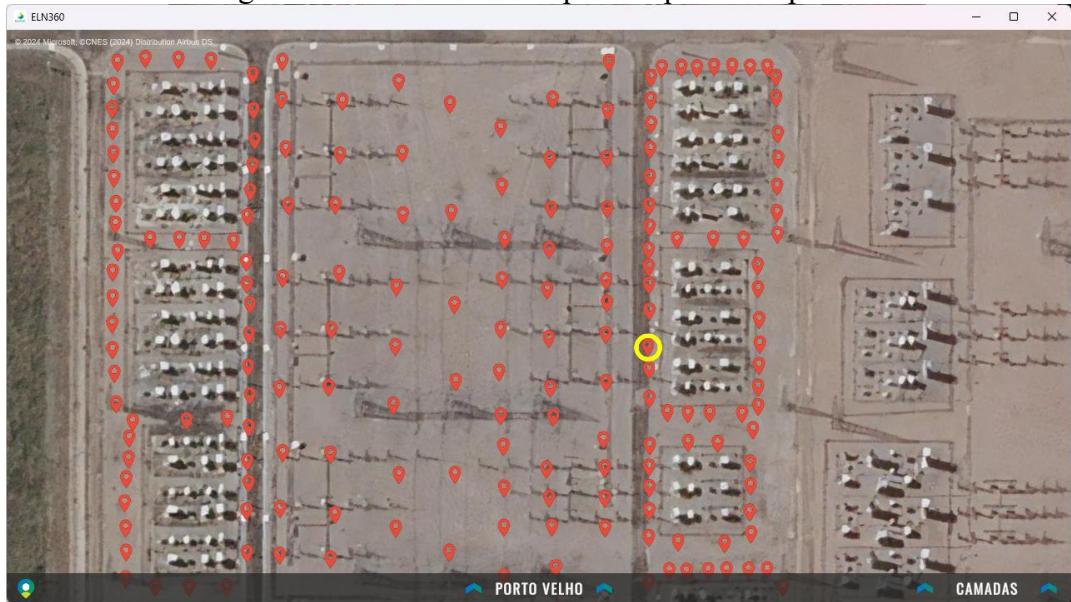
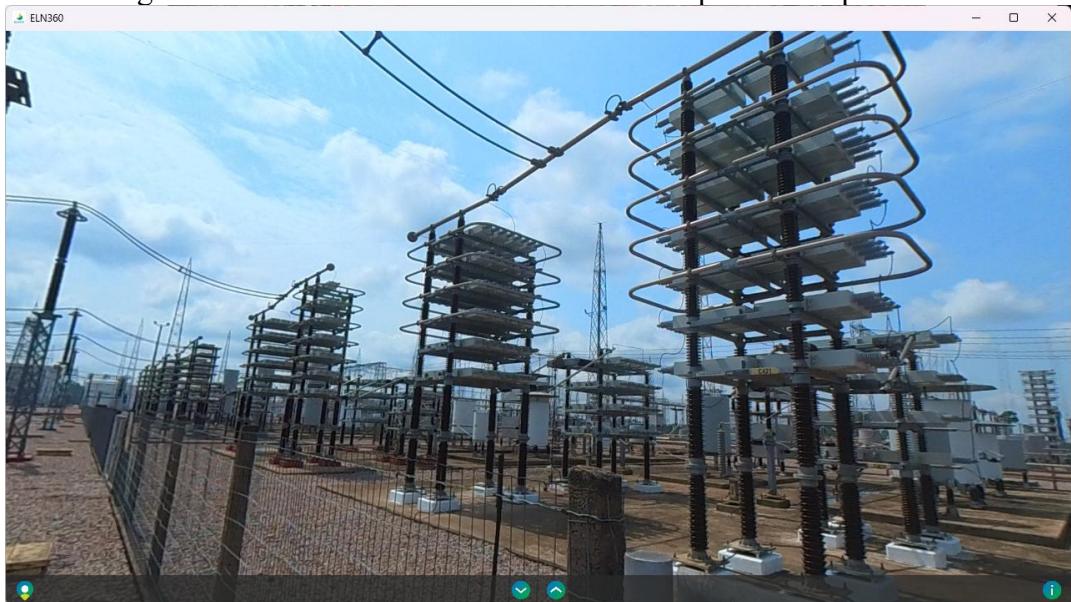


Figura 21- Foto 360° exibida ao clicar no seu pino correspondente.



Fonte: Elaboração própria.

Foi implementado no “ELN360” um menu de camadas que permite ao usuário modificar o estilo do mapa base e sobrepor diferentes representações da planta da subestação. Por meio desse recurso, é possível ativar ou desativar camadas como mapa de satélite, ortomosaico, planta CAD e diagrama unifilar, oferecendo flexibilidade na visualização e permitindo análises em múltiplos níveis de detalhe conforme a necessidade da inspeção ou do planejamento operacional.

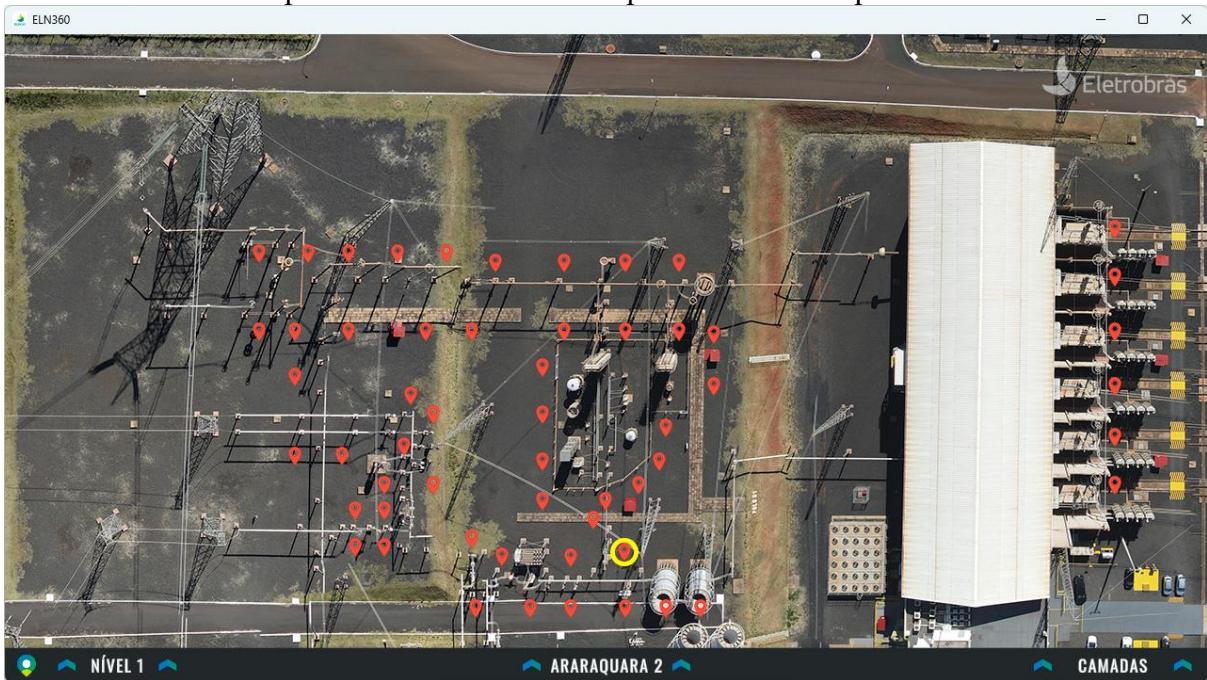
5.3.1 Mapa de Satélite

A camada inicial da aplicação corresponde ao mapa de satélite, que atua como base de contextualização geográfica para o sistema. Essa camada permite visualizar a subestação em relação ao seu entorno imediato, como vias de acesso, áreas adjacentes, limites do terreno e elementos ambientais, facilitando a orientação espacial e contribuindo para a compreensão da disposição geral da instalação no território. Essa representação amplia a percepção situacional e complementa as camadas de maior detalhe técnico presentes nas etapas superiores do sistema.

5.3.2 Ortomosaico

O ortomosaico, produzido na Fase II, é incorporado como a principal camada de representação visual da aplicação. Com resolução espacial em torno de 2 cm/pixel, essa camada substitui integralmente as imagens de satélite de menor qualidade, proporcionando uma visão aérea altamente nítida e detalhada de toda a subestação. Sua fidelidade métrica e riqueza de detalhes tornam o ortomosaico essencial para inspeções visuais remotas, permitindo identificar anomalias estruturais, avaliar o estado de equipamentos, planejar intervenções de manutenção e analisar a configuração física da planta com elevado grau de precisão. A figura 22 apresenta a camada de visualização do ortomosaico diretamente no ambiente do “ELN360”, exibindo também os marcadores georreferenciados posicionados de acordo com suas coordenadas reais.

Figura 22 - Visualização da camada do ortomosaico, com marcadores georreferenciados posicionados conforme os pontos reais de captura.



Fonte: Elaboração própria.

5.3.3 Planta CAD

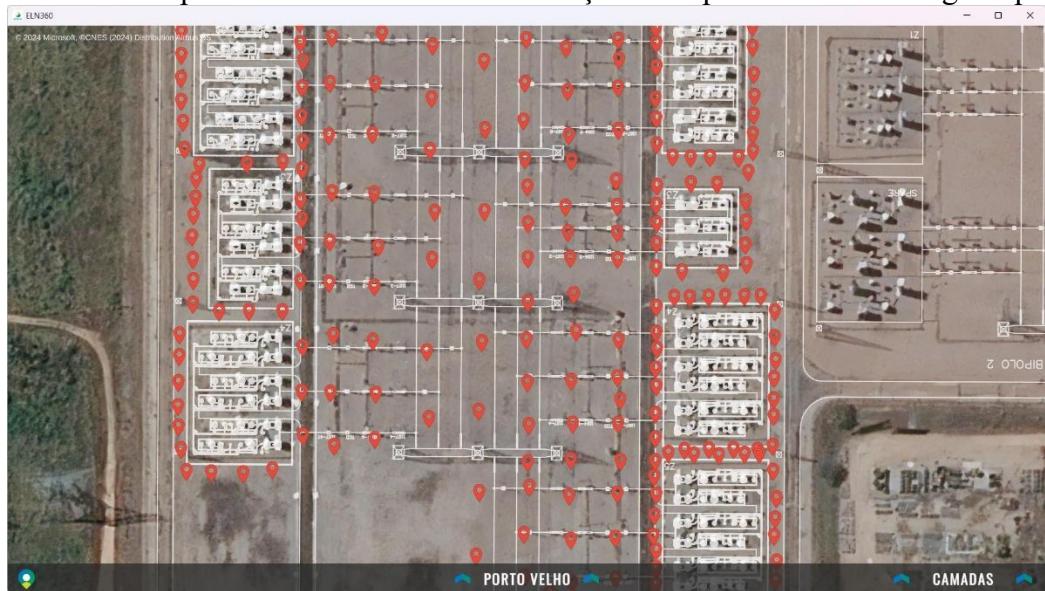
A planta CAD constitui uma representação gráfica detalhada da subestação, desenvolvida em softwares de desenho assistido por computador. Ela contém informações precisas sobre a disposição física dos equipamentos e componentes, como transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, pórticos, barramentos, painéis de controle e estruturas de suporte, organizadas de forma clara e sistemática. Embora essas plantas possam ser elaboradas em 2D ou 3D, sua principal função é fornecer uma visão estruturada da infraestrutura elétrica. A figura 23 apresenta um exemplo dessa camada aplicada na subestação.

Além de representar a configuração física, a planta CAD pode incorporar dados técnicos, rotas de cabos, legendas e especificações dos componentes, tornando-se uma ferramenta indispensável nas fases de projeto, construção, manutenção e inspeção. Sua precisão geométrica assegura coerência na disposição dos equipamentos e confiabilidade nas intervenções realizadas ao longo do ciclo de vida da instalação.

No contexto deste trabalho, a planta CAD desempenha papel central na integração com as imagens esféricas e o ortomosaico. Ao ser sobreposta ao mosaico, forma-se uma camada técnica que permite visualizar simultaneamente a representação esquemática dos equipamentos

e sua aparência real. Essa integração aprimora a identificação de componentes, apoia o planejamento de intervenções e facilita a documentação de alterações na subestação, contribuindo para um ambiente de análise mais completo e eficiente.

Figura 23 - Exemplo de camada CAD da subestação sobreposta ao ambiente geoespacial.



Fonte: Elaboração própria.

5.3.4 Armazenamento em Nuvem

Devido ao grande volume de dados gerado durante a aquisição, especialmente as 2.998 imagens esféricas, tornou-se indispensável adotar uma solução de armazenamento robusta, escalável e confiável para viabilizar o funcionamento do “ELN360”. Para atender a essa demanda, a plataforma *Google Cloud Storage* foi selecionada, considerando critérios técnicos como alta disponibilidade, durabilidade dos dados, escalabilidade e facilidade de integração por meio de APIs.

A configuração das credenciais e permissões de acesso foi realizada no *Google Cloud Console*, assegurando autenticação segura e controle adequado durante todas as operações de upload e download realizadas pelo sistema. Para facilitar a gestão e o acesso programático, os dados foram organizados em uma estrutura hierárquica de pastas, distribuindo imagens, arquivos CSV e demais ativos digitais conforme a lógica do projeto. Essa organização permite que cada recurso seja acessado independentemente por meio de URLs diretas, eliminando a necessidade de manter cópias locais e reduzindo o tamanho final do aplicativo.

A integração entre o armazenamento em nuvem e o *Unity* foi implementada por meio de métodos específicos que utilizam a API do *Google Cloud* para realizar operações de transferência e sincronização. Além disso, foram desenvolvidos mecanismos para comparar e atualizar automaticamente o arquivo CSV contendo os metadados das imagens, assegurando que cada panorama seja corretamente associado à sua posição geográfica e às informações de identificação utilizadas no sistema.

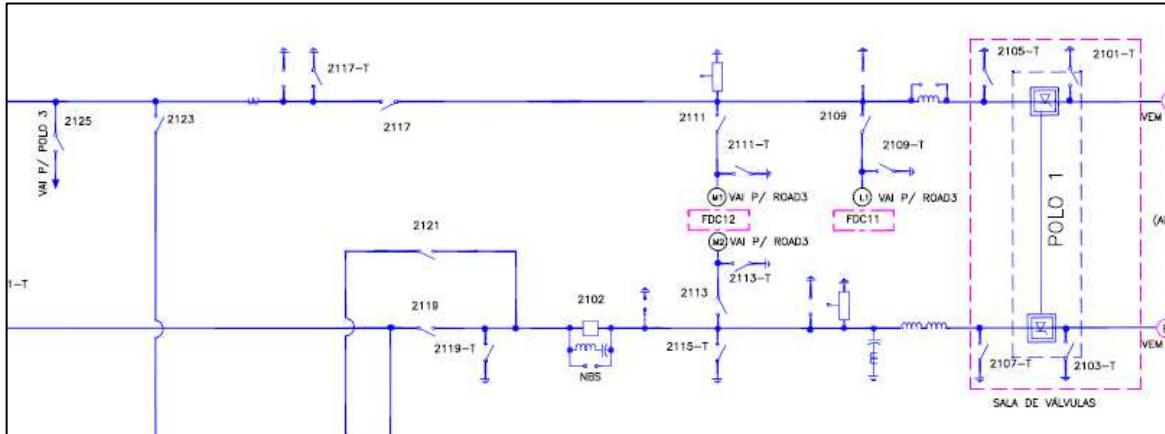
Durante o uso do “ELN360”, quando o usuário solicita a visualização de uma imagem específica, o sistema inicia o processo de download sob demanda, transferindo apenas o arquivo necessário naquele momento. Após o download, a imagem é convertida em tempo de execução para o formato de visualização esférica, proporcionando uma experiência imersiva e interativa. Esse método otimiza o desempenho geral da aplicação, reduzindo o consumo de recursos e assegurando que apenas os arquivos efetivamente requeridos sejam carregados.

Essa abordagem centralizada de armazenamento em nuvem não apenas simplifica o processo de desenvolvimento e manutenção, como também garante que todas as informações permaneçam sincronizadas, atualizadas e facilmente acessíveis, conferindo maior confiabilidade e eficiência ao sistema “ELN360”.

5.3.5 Diagrama Unifilar e Integração com o ELN360

A última camada de informação corresponde ao diagrama unifilar da subestação, o qual é integrado ao ELN360 como uma representação esquemática das conexões elétricas entre os equipamentos. Esses diagramas, como ilustrado na figura 24, sintetizam a topologia elétrica do sistema, indicando barramentos, disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores, linhas de transmissão e demais componentes, bem como a forma como esses elementos se interligam dentro da instalação.

Figura 24 - Diagrama Unifilar parcial da subestação de Araraquara 2.



Fonte: Elaboração própria.

Após a obtenção das plantas CAD e dos diagramas unifilares, a etapa seguinte consistiu em integrá-los à plataforma de navegação do “ELN360”, formando uma interface capaz de unir informações técnicas e representações visuais de maneira contínua e coerente. Para isso, foi desenvolvida uma estrutura dedicada à vinculação direta entre os elementos do diagrama unifilar e os respectivos equipamentos representados nas imagens esféricas de 360°, permitindo uma navegação bidirecional entre o modelo lógico da subestação e sua configuração física real.

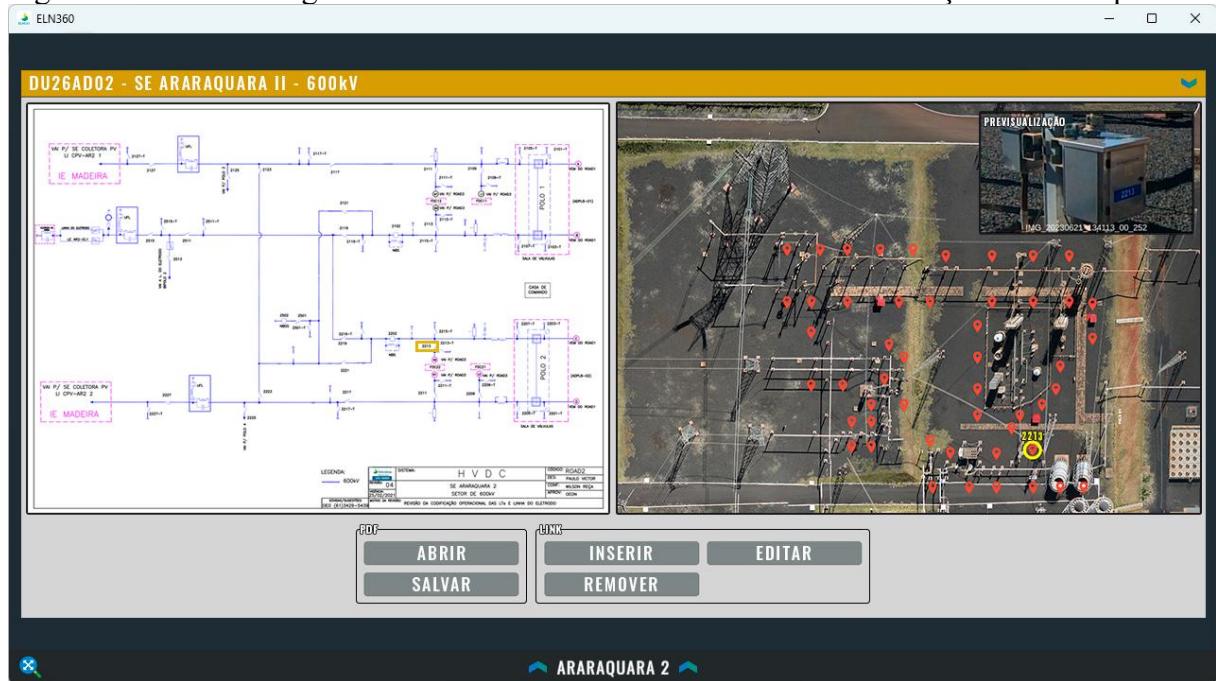
A integração foi implementada por meio da criação de links dinâmicos, que associam as *tags* dos equipamentos presentes no diagrama unifilar aos marcadores georreferenciados da plataforma. Dessa forma, cada símbolo técnico do diagrama passa a corresponder a um ponto real no pátio da subestação, garantindo precisão e consistência nas consultas realizadas pelos usuários.

Para operacionalizar esse processo, foi desenvolvido um modo de edição de PDFs integrado ao “ELN360”. Nesse modo, o usuário pode abrir qualquer diagrama unifilar exportado em PDF e inserir, modificar ou remover links conforme necessário. A interface permite que o usuário selecione graficamente a tag do PDF correspondente ao equipamento desejado e, em seguida, associe essa tag ao marcador apropriado no ambiente do sistema. Após a conclusão das edições, o usuário escolhe o local de salvamento do novo PDF, enquanto uma cópia sincronizada é armazenada automaticamente na nuvem para uso posterior.

Como resultado, o PDF editado passa a conter hiperligações inteligentes que, ao serem acionadas, direcionam o usuário ao ELN360 e abrem diretamente a imagem esférica relacionada ao equipamento, além de destacar seu posicionamento no mapa ou no ortomosaico. Essa integração estabelece uma correspondência imediata entre a representação lógica do

sistema elétrico e sua materialização física, facilitando a identificação de componentes, reduzindo ambiguidades e aprimorando o processo de inspeção, análise e documentação da subestação. A figura 25 apresenta o modo de edição utilizado para criação desses links dinâmicos.

Figura 25 - Tela do diagrama unifilar e marcadores correlatos na Subestação de Araraquara 2.



Fonte: Elaboração própria.

O processo inverso também foi implementado na plataforma. Durante a navegação no “ELN360”, o usuário pode clicar com o botão direito sobre qualquer marcador georreferenciado. Caso esse marcador tenha sido previamente associado a um equipamento no diagrama unifilar por meio do modo de edição, o sistema exibe automaticamente um *popup* sobreposto ao mapa, apresentando a tag do equipamento correspondente do diagrama e destacando o símbolo vinculado. Dessa forma, cada ponto físico da subestação pode ser consultado em sua representação lógica, reforçando a correlação entre localização real e função elétrica.

Essa funcionalidade permite ao usuário alternar rapidamente entre a visão esquemática e a visão geográfica dos equipamentos, facilitando a compreensão da disposição dos componentes na subestação. Com isso, processos de inspeção, manutenção, planejamento e treinamento tornam-se mais eficientes, uma vez que a plataforma integra, em uma única interface, a representação lógica e a representação física da instalação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento da plataforma digital ELN360, destacando os impactos operacionais, a validação junto à Eletrobras no âmbito do projeto de P&D e os benefícios concretos identificados durante os testes de usabilidade e aplicação em campo. Em consonância com os objetivos definidos neste trabalho, os resultados são analisados segundo os eixos de visualização espacial, navegação, georreferenciamento, integração de informações técnicas e apoio às atividades operacionais.

6.1 A Pesquisa como Produto

O desenvolvimento do ELN360 resultou em um produto plenamente funcional, validado e disponibilizado para uso pela Eletrobras ao término do projeto de P&D. A solução integra imagens esféricas georreferenciadas, fotogrametria por drones e modelos CAD, consolidando um ambiente navegável capaz de reproduzir com fidelidade espacial a subestação estudada.

Ao longo da pesquisa, cada módulo desenvolvido era entregue à equipe técnica da Eletrobras para testes preliminares em suas próprias máquinas. As inconsistências identificadas e sugestões de melhoria foram sistematicamente encaminhadas aos pesquisadores da Universidade, resultando em um ciclo contínuo de aprimoramento. Essa dinâmica evidenciou a viabilidade técnica da plataforma, que ao final do projeto foi instalada para uso definitivo, caracterizando-se como um produto maduro e operacional.

Durante o período de validação do P&D, o sistema foi utilizado por operadores, engenheiros e técnicos em atividades reais de inspeção, análise de ativos e consulta a diagramas unifilares, em subestações do grupo Eletrobras. A plataforma passou a integrar o fluxo de trabalho das equipes, substituindo, em diversas situações, etapas presenciais por consultas remotas estruturadas, o que caracteriza sua efetiva incorporação como ferramenta de apoio operacional.

6.2 Facilidade de Interação e Usabilidade

A etapa de usabilidade constituiu um componente central da validação da plataforma. Foram conduzidos testes com operadores, engenheiros e técnicos da Eletrobras ao longo de todo o P&D, em ciclos iterativos.

O processo ocorreu da seguinte forma:

- Disponibilização gradual das versões do ELN360.
- Avaliação em ambiente real de trabalho.
- Registro estruturado de feedback.
- Visitas presenciais de validação.

A avaliação final realizada pela Eletrobras indicou que a plataforma oferecia navegação intuitiva, aprendizado rápido e significativa redução do tempo necessário para localizar informações técnicas. Esses resultados foram observados principalmente em tarefas como a identificação de equipamentos no pátio da subestação, a consulta aos seus respectivos diagramas unifilares e a navegação entre pontos esféricos.

Em termos operacionais, os usuários relataram que tarefas que anteriormente exigiam múltiplas consultas a plantas, deslocamentos físicos ou contato com diferentes setores passaram a ser executadas diretamente no ambiente virtual, com acesso imediato à localização espacial e à representação lógica dos ativos. Essa redução do esforço cognitivo e operacional evidencia que o sistema atingiu o objetivo de facilitar a interação e a navegação no ambiente da subestação.

6.3 Otimização dos Processos de Deslocamento para Inspeção

Os resultados do projeto evidenciaram impactos diretos sobre a logística de inspeção e planejamento de atividades em subestações de energia elétrica. Antes da adoção do ELN360, diversas tarefas preliminares, como reconhecimento do layout do pátio, identificação de acessos, verificação da disposição dos equipamentos e preparação de intervenções, exigiam deslocamentos físicos das equipes até a subestação, mesmo quando nenhuma ação imediata de manutenção seria realizada.

Com a disponibilização do ambiente virtual georreferenciado, essas atividades passaram a ser realizadas de forma remota, reduzindo significativamente o número de visitas exploratórias às subestações. Durante o projeto de P&D, operadores e engenheiros relataram que análises de viabilidade, estudos de planejamento e avaliações iniciais de campo puderam ser conduzidas diretamente a partir do ambiente digital, sem a necessidade de deslocamento até o local.

Essa mudança operacional impactou diretamente os custos e o tempo envolvidos nos processos de inspeção. A redução de viagens, e a diminuição da mobilização de equipes

resultaram em economia de recursos e em maior eficiência no uso do tempo dos profissionais, conforme observado nas atividades conduzidas em parceria com a Eletrobras.

Além disso, a possibilidade de realizar o planejamento prévio de intervenções por meio do ELN360 contribuiu para que as visitas de campo passassem a ser mais objetivas e direcionadas, focadas na execução das atividades necessárias, e não em levantamentos iniciais. Dessa forma, o sistema passou a atuar como um instrumento de filtragem e qualificação das demandas presenciais, otimizando a logística de inspeção e manutenção das subestações.

6.4 Aumento da Segurança nas Manutenções

A segurança dos profissionais que atuam em subestações de energia elétrica constitui um dos principais desafios operacionais, em função dos elevados níveis de tensão, da densidade de equipamentos energizados e da complexidade dos arranjos físicos. Nesse contexto, os resultados obtidos ao longo do projeto de P&D indicam que o uso do ELN360 contribuiu de forma direta para a redução da exposição dos trabalhadores a situações de risco durante as etapas de planejamento e execução das atividades de manutenção.

A possibilidade de realizar um reconhecimento detalhado do ambiente de forma remota permitiu que técnicos e engenheiros analisassem previamente o posicionamento dos equipamentos, os corredores de circulação, os pontos de acesso e as áreas de maior criticidade antes de qualquer entrada em campo. Esse reconhecimento antecipado reduz a necessidade de inspeções exploratórias presenciais, que são justamente aquelas realizadas em condições de menor preparo e maior incerteza, e que, portanto, apresentam maior potencial de risco.

Durante os testes conduzidos com a Eletrobras, verificou-se que o planejamento prévio das intervenções passou a ser realizado com base em informações espaciais e visuais precisas, extraídas diretamente do ambiente virtual. Esse processo permitiu que as equipes definissem, ainda em ambiente seguro, a sequência de ações, os pontos de aproximação aos equipamentos e os posicionamentos mais adequados para a execução das atividades, minimizando improvisações e decisões tomadas sob pressão no local da subestação.

Além disso, a utilização do ELN360 como referência comum entre os membros das equipes favoreceu a padronização do entendimento do cenário operacional. Ao trabalharem sobre a mesma representação virtual do ambiente real, operadores, engenheiros e técnicos puderam discutir procedimentos, esclarecer dúvidas e alinhar estratégias antes da execução das

tarefas, reduzindo ambiguidades que, em campo, poderiam resultar em erros operacionais ou situações inseguras.

Em síntese, os resultados demonstram que o ELN360 atua como um instrumento de apoio à segurança operacional ao deslocar uma parcela significativa da análise, do planejamento e da tomada de decisão para um ambiente virtual controlado, diminuindo a exposição direta dos profissionais aos riscos inerentes às subestações e contribuindo para a condução de manutenções mais seguras, previsíveis e estruturadas.

6.5 Rapidez e Eficiência na Localização de Equipamentos

Durante os testes conduzidos no âmbito do projeto de P&D, observou-se uma redução significativa no tempo necessário para localizar equipamentos e acessar suas informações técnicas. Antes da adoção do ELN360, esse processo dependia da consulta sequencial a diferentes documentos, como plantas CAD, diagramas unifilares e registros de campo, frequentemente exigindo múltiplas etapas de verificação até que o equipamento correto fosse identificado.

Com a integração entre imagens esféricas georreferenciadas, ortomosaicos e diagramas unifilares, a localização de um ativo passou a ocorrer de forma direta e contextualizada. O usuário passou a identificar o equipamento simultaneamente em sua posição física no pátio da subestação e em sua representação lógica no diagrama elétrico, reduzindo ambiguidades e eliminando a necessidade de cruzamentos manuais entre diferentes fontes de informação.

Nos testes de validação realizados com técnicos e engenheiros da Eletrobras, verificou-se que tarefas de identificação de equipamentos, que anteriormente demandavam maior tempo de consulta e verificação, passaram a ser executadas em poucos instantes por meio do ambiente virtual. Essa redução de tempo foi particularmente relevante em atividades que envolvem a análise de ativos críticos, como transformadores, disjuntores e barras, nos quais a precisão da identificação é essencial para evitar erros operacionais.

Além do ganho em rapidez, observou-se um aumento na precisão da localização dos equipamentos. A correspondência direta entre o marcador georreferenciado, a imagem esférica e o símbolo no diagrama unifilar permitiu que os usuários confirmassem, de forma inequívoca, a identidade e a posição de cada ativo, minimizando o risco de confusão entre equipamentos fisicamente próximos ou funcionalmente semelhantes.

Dessa forma, os resultados demonstram que o ELN360 contribui de maneira efetiva para o aumento da eficiência operacional, ao reduzir o tempo de busca, aumentar a confiabilidade da identificação dos ativos e apoiar decisões técnicas baseadas em informações espaciais e lógicas integradas, atendendo aos objetivos de aprimoramento da gestão e da manutenção das subestações.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta a síntese final da pesquisa desenvolvida, destacando as principais contribuições alcançadas, as limitações do estudo e as perspectivas para sua continuidade. A organização do capítulo busca consolidar os resultados obtidos ao longo do trabalho e, ao mesmo tempo, indicar caminhos objetivos para investigações futuras, em consonância com as recomendações da banca examinadora.

7.1 Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo principal aprimorar a visualização espacial, a navegação, a manutenção e a gestão de ativos em subestações de energia elétrica por meio da integração de representações digitais georreferenciadas. A partir desse objetivo, foi concebida e validada a plataforma ELN360, que consolidou imagens esféricas, ortomosaicos obtidos por drones, plantas CAD e diagramas unifilares em um ambiente virtual único e navegável.

Os resultados apresentados no Capítulo 6 demonstraram que os objetivos específicos definidos foram atingidos. No que se refere à visualização espacial, o sistema possibilitou a representação fiel do arranjo físico da subestação, permitindo o reconhecimento remoto e contextualizado de equipamentos, estruturas e acessos. Em relação à navegação, a plataforma proporcionou deslocamento contínuo entre diferentes pontos da área da subestação, reduzindo a fragmentação da informação e facilitando a compreensão do ambiente físico.

Quanto ao georreferenciamento e à integração de dados técnicos, a vinculação entre imagens, plantas CAD e diagramas unifilares permitiu identificar os ativos simultaneamente em sua posição física e lógica, aumentando a precisão da localização e reduzindo ambiguidades operacionais.

Do ponto de vista da gestão e da manutenção, os resultados evidenciaram ganhos concretos na eficiência dos processos de inspeção e planejamento. A realização de análises preliminares de forma remota contribuiu para a redução de deslocamentos desnecessários, qualificou as visitas de campo e favoreceu a otimização dos recursos humanos e logísticos. Adicionalmente, o reconhecimento prévio do ambiente e o planejamento das intervenções em um contexto virtual seguro ampliaram a previsibilidade das operações e reduziram a exposição dos profissionais a situações de risco.

A principal contribuição científica deste trabalho reside na proposição e validação de uma abordagem integrada para a representação e a navegação em subestações de energia elétrica, articulando diferentes fontes de dados espaciais e técnicos em um único ambiente digital. Ao demonstrar que a integração de imagens esféricas georreferenciadas, fotogrametria aérea e modelos CAD pode sustentar processos de visualização, localização e análise operacional mais eficientes, esta pesquisa amplia o repertório metodológico disponível para a gestão de infraestruturas críticas.

Como limitações do estudo, destaca-se o fato de a validação ter sido realizada em uma subestação específica, bem como a dependência da qualidade dos dados de entrada para a precisão do sistema. Além disso, a avaliação de impactos de longo prazo, como redução de custos operacionais e efeitos no treinamento de operadores, demanda estudos complementares e aplicações em contextos mais amplos.

Dessa forma, este trabalho não se propõe a esgotar o tema da digitalização de subestações, mas a demonstrar, de maneira fundamentada, um caminho metodológico consistente para a representação integrada de ambientes técnicos complexos, dentro dos limites assumidos, oferecendo uma base conceitual e técnica para pesquisas subsequentes no domínio da gestão de infraestruturas críticas.

7.2 Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos nesta pesquisa tenham demonstrado a viabilidade e a relevância da abordagem proposta, algumas limitações identificadas ao longo do desenvolvimento e da validação da plataforma indicam oportunidades para a continuidade e o aprofundamento do trabalho. Nesse contexto, destacam-se como linhas para trabalhos futuros

- Avaliação de novas tecnologias de captura, como sensores LiDAR, visando ao aumento da precisão geométrica da representação espacial;
- Integração do ambiente virtual com sistemas de manutenção preditiva e bancos de dados operacionais;
- Ampliação da abordagem para outras infraestruturas críticas, como usinas e linhas de transmissão;
- Desenvolvimento de módulos específicos de treinamento para capacitação de operadores e técnicos;

- Implementação de um banco de dados estruturado para centralização das informações dos equipamentos;
- Desenvolvimento de uma versão web da plataforma, facilitando o acesso, a distribuição e a integração em ambientes corporativos e educacionais.

REFERÊNCIAS

- AL RAWASHDEH BALQIES SADOUN, S.; AL FUKARA, Akif. CAD file conversion to GIS layers: Issues and solutions. *In: 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER, INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS (CITS 2012). 2012 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*. Amman: IEEE, maio 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6220391/>>. Acesso em: 5 dez. 2024
- BARAZZETTI, Luigi; PREVITALI, Mattia; SCAIONI, Marco. Procedures for Condition Mapping Using 360° Images. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 1, p. 34, jan. 2020.
- CAMPOS, Hiago Pereira. Mapeamento de pontos de iluminação pública por meio de sistema equipado com câmara esférica. 6 fev. 2023.
- CYRINO, Gabriel F. *et al.* Georeferenced 360-Degree Photos for Enhancing Navigation and Interaction within Virtual Electric Power Substations. *In: 2024 IEEE CONFERENCE ON VIRTUAL REALITY AND 3D USER INTERFACES ABSTRACTS AND WORKSHOPS (VRW). 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. mar. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10536434>>. Acesso em: 15 abr. 2025
- DA SILVEIRA, Thiago L. T. *et al.* 3D Scene Geometry Estimation from 360° Imagery: A Survey. **ACM Computing Surveys**, v. 55, n. 4, p. 1–39, 30 abr. 2023.
- EIRIS PEREIRA, Ricardo; MOUD, Hashem Izadi; GHEISARI, Masoud. Using 360-Degree Interactive Panoramas to Develop Virtual Representation of Construction Sites. *In: LEAN AND COMPUTING IN CONSTRUCTION CONGRESS - JOINT CONFERENCE ON COMPUTING IN CONSTRUCTION. Lean and Computing in Construction Congress - Volume 1: Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction*. Heraklion, Crete, Greece: Heriot-Watt University, 4 jul. 2017. Disponível em: <http://itc.scix.net/cgi-bin/works/Show?_id=lc3-2017-122>. Acesso em: 5 dez. 2024
- FENG, Mengyang *et al.* Diffusion360: Seamless 360 Degree Panoramic Image Generation based on Diffusion Models. **CoRR**, 1 jan. 2023.
- FERREIRA, Solange Gomes De Amorim *et al.* Inovações Tecnológicas em Subestações de Energia: Aplicação de Drones, Realidade Aumentada e BIM na etapa de Projeto. **OBSERVATORIO DE LA ECONOMIA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 12, p. e8164, 11 dez. 2024.
- FONSECA, Anderson Silva. Sistema de anotação baseado em visualização 3D com imagens 360° de instalações industriais. **Dissertação Mestrado**, [S.d.].
- HACKELOER, Andreas *et al.* Georeferencing: a review of methods and applications. **Annals of GIS**, v. 20, n. 1, p. 61–69, 2 jan. 2014.
- JIANG, Hao *et al.* Cubemap-Based Perception-Driven Blind Quality Assessment for 360-degree Images. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 30, p. 2364–2377, 2021.

JIANG, San *et al.* 3D reconstruction of spherical images: a review of techniques, applications, and prospects. **Geo-spatial Information Science**, p. 1–30, 8 mar. 2024.

NORDVALL, Erik; WIBERG, Anton; TARKIAN, Mehdi. Knowledge-based engineering and computer vision for configuration-based substation design. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 9, 17 abr. 2023.

OLIVETE, André Luís. UTILIZAÇÃO DE IMAGENS OMNIDIRECIONAIS GEORREFERENCIADAS COMO CONTROLE DE CAMPO PARA ORIENTAÇÃO DE IMAGENS ORBITAIS. **Dissertação de Mestrado**, 2014.

PANOVA, Evgeniya A.; VARGANOVA, Aleksandra V.; PANARINA, Mariya S. Automation of the Process of Electrical Substations Design through the Development and Application of CAD when Choosing Electrical Equipment. *In: 2019 INTERNATIONAL RUSSIAN AUTOMATION CONFERENCE (RUSAUTOCON). 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. set. 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867594>. Acesso em: 10 jul. 2025

SANTOS, Gabriel Rodrigues *et al.* From conventional to smart substations: A classification model. **Electric Power Systems Research**, v. 226, p. 109887, 1 jan. 2024.

SHUPE, Ethan *et al.* Evaluating Orthophoto Mosaic Accuracy Using RTK UAVs and AeroPoints 2 Ground Control Points: A User's Perspective. **Drones and Autonomous Vehicles**, v. 2, n. 2, p. 10009, maio 2025.

SIMOES, Francisco *et al.* Challenges in 3D Reconstruction from Images for Difficult Large-Scale Objects: A Study on the Modeling of Electrical Substations. *In: 2012 14TH SYMPOSIUM ON VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY (SVR). 2012 14th Symposium on Virtual and Augmented Reality*. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, maio 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6297562/>>. Acesso em: 5 dez. 2024

TANEJA, Aparna; BALLAN, Luca; POLLEFEYS, Marc. Geometric Change Detection in Urban Environments Using Images. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 37, n. 11, p. 2193–2206, nov. 2015.

WANG, Chenjie *et al.* An intelligent robot for indoor substation inspection. **Industrial Robot: the international journal of robotics research and application**, v. 47, n. 5, p. 705–712, 3 ago. 2020.

WANG, Zhaoyang *et al.* A Review of UAV Power Line Inspection. *In: YAN, Liang; DUAN, Haibin; YU, Xiang (orgs.).* Singapore: Springer, 2022.

WON, Changhee *et al.* OmniSLAM: Omnidirectional Localization and Dense Mapping for Wide-baseline Multi-camera Systems. *In: 2020 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA). 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. maio 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9196695>>. Acesso em: 6 jun. 2025

WU, Guizhou. Research on Building Electrical Design Based on Computer-Aided. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1744, n. 2, p. 022030, fev. 2021.

WU, Qiaoyun *et al.* Automatic 3D reconstruction of electrical substation scene from LiDAR point cloud. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 143, p. 57–71, set. 2018.

YANG, Lvyang *et al.* Practical single-line diagram recognition based on digital image processing and deep vision models. **Expert Systems with Applications**, v. 238, p. 122389, mar. 2024.

YU, Changle *et al.* Panoramic visual inspection of substation based on image recognition technology. In: BATISTA, Paulo; BILAS PACHORI, Ram (orgs.). INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE, SIGNAL PROCESSING, AND PATTERN RECOGNITION (ISPP 2023). **International Conference on Image, Signal Processing, and Pattern Recognition (ISPP 2023)**. Changsha, China: SPIE, 8 jun. 2023. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12707/2681278/Panoramic-visual-inspection-of-substation-based-on-image-recognition-technology/10.1117/12.2681278.full>>. Acesso em: 17 abr. 2025