

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SARAH HELOÍSA DE SOUZA LOPES

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA IMPLEMENTAÇÃO DO BIM NA
MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS:
EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE NA REDE BÁSICA**

GOIÂNIA
2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Sarah Heloísa de Souza Lopes

Matrícula: 20181011060346

Título do Trabalho: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA IMPLEMENTAÇÃO DO BIM NA MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS: EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE NA REDE BÁSICA

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

_____, 15 / 05 / 2025.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Sarah Heloísa de Souza Lopes

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA IMPLEMENTAÇÃO DO BIM NA
MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS:
EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE NA REDE BÁSICA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Fabio da Silva Marques

GOIÂNIA

2025

L864r

Lopes, Sarah Heloísa de Souza.

Revisão bibliográfica da implementação do BIM na manutenção e operação de subestações elétricas: eficiência e sustentabilidade na rede básica / Sarah Heloísa de Souza Lopes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2025.
109 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Fabio da Silva Marques.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. *Building Information Modeling* (BIM). 2. Subestações elétricas - manutenção. 3. Infraestrutura elétrica - modelagem tridimensional. 4. Gestão de ativos - setor elétrico. I. Marques, Fabio da Silva (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 621.319 2

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



ATA DE REALIZAÇÃO DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) DO CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS, CÂMPUS GOIÂNIA.

Aos vinte e oito dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte cinco, às 18 horas, reuniu-se presencialmente no campus Goiânia, sala S-310, a banca avaliadora, composta pelos seguintes membros: **Prof. Me. Fábio da Silva Marques** (Orientador e Presidente da Banca Avaliadora), **Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso de Lima** (Membro Interno da Banca Avaliadora), **Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior** (Membro Interno da Banca Avaliadora), para a realização da sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), intitulado **IMPLEMENTAÇÃO DO BIM NA MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS: EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE NA REDE BÁSICA**, de autoria da graduanda **SARAH HELOISA DE SOUZA LOPES (20181011060346)** do **CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, como requisito final para obtenção, do Título de **ENGENHEIRO ELETRICISTA. PARECER:** Após as arguições dos membros da banca examinadora, por decisão unânime, o trabalho foi **APROVADO COM CORREÇÕES**, a Nota Final atribuída foi **9,0 (nove)**. O trabalho corrigido deverá ser apresentado ao Professor Orientador no prazo máximo de 30 dias a partir da data de defesa. **FECHAMENTO:** Nada mais havendo a tratar, o presidente da banca avaliadora, **Professor Me. Fábio da Silva Marques**, agradeceu a participação de todos e encerrou a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) às 19 (dezenove) horas e 05 (cinco) minutos. Eu, **Paulo Sérgio Zanin Júnior**, Coordenador do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, (assinatura digital), lavrei a presente Ata assinada digitalmente pela banca avaliadora. Goiânia, 28 de abril de 2025. Nada mais a constar, encerro a presente Ata.

BANCA AVALIADORA

Prof. Fábio da Silva Marques	Orientador e Presidente - IFG
Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso de Lima	Membro Interno - IFG
Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior	Membro Interno - IFG

Prof. Paulo Sérgio Zanin Júnior

Coordenador do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
Portaria N.º 856 de 11/04/2025

Documento assinado eletronicamente por:

- Paulo Sergio Zanin Junior, COORDENADOR(A) - FUC1 - GYN-CCBEE, em 29/04/2025 15:46:22.
- Marcos Antonio Cardoso de Lima, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/04/2025 15:24:11.
- Fabio da Silva Marques, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/04/2025 11:51:02.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/04/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 644626
Código de Autenticação: c532e78385



RESUMO

Building Information Modeling (BIM) é uma metodologia transformadora que utiliza modelos 3D inteligentes enriquecidos com dados multidisciplinares (sistemas elétricos, civis e mecânicos) para otimizar a tomada de decisões ao longo do ciclo de vida de projetos de infraestrutura. Este trabalho investiga a implementação do BIM em subestações elétricas, destacando seu papel no aprimoramento da eficiência em manutenção, segurança operacional e sustentabilidade nas redes elétricas básicas. Por meio de uma revisão sistemática da literatura e análise de casos práticos, este trabalho demonstra como a integração via BIM reduz conflitos de projeto, simplifica a gestão de ativos e minimiza o desperdício de recursos durante a construção e operação de subestações. Os principais resultados revelam que o BIM viabiliza estratégias de manutenção preditiva, permite o compartilhamento de dados em tempo real entre stakeholders e reduz custos do ciclo de vida em até 20% nos cenários analisados. Adicionalmente, sua adoção alinha-se a objetivos globais de sustentabilidade, melhorando a eficiência energética por meio de *layouts* otimizados de subestações e uso racional de materiais. Esta pesquisa reforça o potencial do BIM como catalisador da modernização de infraestruturas elétricas, oferecendo percepções aplicáveis a concessionárias e engenheiros que buscam equilibrar precisão técnica e responsabilidade ambiental.

Palavras-chave: modelagem de informação da construção (BIM); modelos 3D inteligentes; modernização de infraestruturas; redes elétricas básicas; redução de custos; segurança operacional; subestações elétricas.

Abstract

Building Information Modeling (BIM) is a transformative methodology that leverages intelligent 3D models enriched with multidisciplinary data (electrical, civil, and mechanical systems) to optimize decision-making across the lifecycle of infrastructure projects. This study investigates the implementation of BIM in electrical substations, emphasizing its role in enhancing maintenance efficiency, operational safety, and sustainability within core power networks. Through a systematic literature review and analysis of case studies, this paper demonstrates how BIM-driven integration reduces design conflicts, streamlines asset management, and minimizes resource waste during substation construction and operation. Key findings reveal that BIM supports predictive maintenance strategies, enables real-time data sharing among stakeholders, and reduces lifecycle costs by up to 20% in analyzed scenarios. Furthermore, the adoption of BIM aligns with global sustainability goals by improving energy efficiency and reducing carbon footprints through optimized substation layouts and material usage. This research underscores BIM's potential as a catalyst for modernizing power infrastructure, offering actionable insights for utilities and engineers seeking to balance technical precision with environmental responsibility.

Keywords: *basic electrical networks; building information modeling (BIM); cost reduction; electrical substations; infrastructure modernization; intelligent 3d models; operational safety.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

DIAGRAMAS

Diagrama 1 – Fluxo das etapas de implantação do BIM.....	72
Diagrama 2 – Integração entre BIM e GIS.....	77

FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo da evolução das tecnologias de projeto na engenharia.....	9
Figura 2 – Comparativo visual entre projeto em CAD e projeto em BIM.....	10
Figura 3 – Gráfico de níveis: CAD, modelagem colaborativa, interoperabilidade, integração completa (BIM 0 a BIM 3).....	11
Figura 4 – Mapa geoeletrico do ONS, rede elétrica básica do SIN.....	12
Figura 5 – Modelo BIM de uma subestação elétrica.....	13
Figura 6 – Ciclo de vida do BIM.....	41
Figura 7 – Diagrama de fluxo do processo de intercâmbio de dados BIM (CAD → IFC → XML → Gestão de Ativos).....	43
Figura 8 – Integração GIS-BIM.....	51
Figura 9 – Colaboração entre disciplinas no BIM.....	53
Figura 10 – Disjuntor ABB 500kV.....	55
Figura 11 – Sobreposição das áreas definidas com “Limite de proteção contra arco elétrico”... 58	
Figura 12 – Ambiente Virtual com modelos BIM.....	61
Figura 13 – Diagrama de interoperabilidade entre BIM, IoT e SIG em subestações.....	66
Figura 14 – Ciclo de vida de um ativo em BIM (do projeto à manutenção).....	67
Figura 15 – Principais problemas em projetos de construção.....	68
Figura 16 – Como o BIM contribui para a identificação de riscos e medidas de segurança... 78	
Figura 17 – Renderizações de modelos 3D desenvolvidos com BIM.....	80
Figura 18 – Uso de óculos de realidade virtual com visualização do modelo BIM de uma subestação.....	101
Figura 19 – Visão sistêmica de uma subestação conectada digitalmente — BIM, IoT, IA, GIS — como “coração” de uma Smart Grid.....	102

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual de adoção do BIM no setor elétrico por país.....	47
---	----

TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre métodos tradicionais vs. BIM na operação de subestações.....	13
Tabela 2 – Síntese das lacunas operacionais versus soluções habilitadas pelo BIM em subestações elétricas.....	15
Tabela 3 – Quadro comparativo entre CAD e BIM 1.....	40

Tabela 4 – Quadro comparativo entre CAD e BIM 2.....	52
Tabela 5 – Comparação quantitativa entre CAD e BIM.....	57
Tabela 6 – Benefícios da integração BIM-GIS.....	59
Tabela 7 – Comparativo de custos entre projetos tradicionais e projetos que utilizam BIM...	77
Tabela 8 – Benefícios da integração BIM-SIG na manutenção e operação de subestações de energia.....	80
Tabela 9 – Comparação entre níveis BIM (2D, 3D, 4D, 5D, etc.) e seus benefícios na operação.....	95
Tabela 10 – Comparativo entre consumo de materiais com e sem uso do BIM em projetos de subestações.....	97
Tabela 11 – Linha do tempo da evolução BIM 3D → 7D com destaque para o plano da FURNAS até 2028.....	99

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AEC - Arquitetura, Engenharia e Construção
AECO - Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
BIM - *Building Information Modeling* (Modelagem de Informação da Construção)
CAD - *Computer-Aided Design* (Desenho Assistido por Computador)
CAPEX - *Capital Expenditure* (Despesas de Capital)
CDCS/CDCON - Sistema de Classificação de Documentos de Construção
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
CM - *Construction Management* (Gestão de Construção)
CPROJ - Coordenação de Projetos de Rodovias
DIT - Demais Instalações de Transmissão
DXF - *Drawing Exchange Format*
DWG - *Drawing*
EPIs - Equipamentos de Proteção Individual
EUA - Estados Unidos da América
GIS - Sistema de Informação Geográfica
ICG - Instalações para Conexão Compartilhada de Geração
IEC - *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IFC - *Industry Foundation Classes*
IA - Inteligência Artificial
IoT - *Internet of Things* (Internet das Coisas)
IPD - Entrega Integrada de Projetos
IST - Instituto Superior Técnico
ITI - Instalações para Interligações Internacionais
LOD - *Levels of Development* (Level de Desenvolvimento)
MEP - Mecânico-Elétrico-Hidráulicos
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPEX - *Operational Expenditure*
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PRISMA - Protocolo para Revisão Sistemática
RAP - Receita Anual Permitida
RB - Rede Básica

ROI - *Return on Investment* (Retorno sobre o Investimento)

RTM - *Real Time Management* (Gerenciamento em Tempo Real)

RV - Realidade Virtual

SAGE - Sistema de Apoio à Gestão Estratégica

SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition* (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados)

SIG - Sistema de Inteligência Geográfica/Sistema de Informação Geográfica

SIN - Sistema Interligado Nacional

SSoT - *Single Source of Truth* (Fonte Única de Verdade)

SRV - Sistema de Realidade Virtual

TI - Tecnologia da Informação

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

XML - *Extensible Markup Language*

ZNETH - *Zero Net Energy Test House* (Residência de Teste com Consumo Energético Nulo)

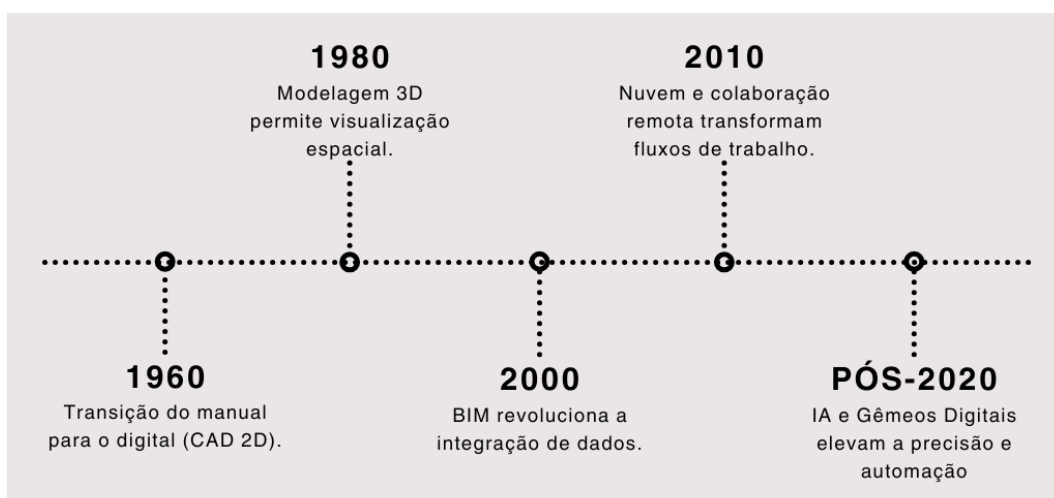
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. BIM e a Modernização das Subestações Elétricas	9
1.2. Problema de Pesquisa: Lacunas na Manutenção e Operação da Rede Básica	14
1.3. Objetivos Geral e Específicos	17
1.3.1. Objetivo geral	17
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Hipóteses e Premissas da Implementação do BIM	18
1.5. Justificativa: Eficiência Operacional e Sustentabilidade	20
1.6. Metodologia	21
2. REVISÃO DA LITERATURA	23
3. BIM NA ENGENHARIA ELÉTRICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES	40
3.1. Evolução do BIM: Do Projeto à Gestão de Ativos	40
3.2. BIM em Subestações Elétricas: Modelagem e Integração de Dados	51
3.3. Operação e Manutenção 4.0: O Papel do BIM na Rede Básica	60
4. IMPLEMENTAÇÃO DO BIM EM SUBESTAÇÕES: ANÁLISE DE DESAFIOS E BENEFÍCIOS	68
4.1. Desafios Técnicos e Operacionais na Adoção do BIM	68
4.2. Benefícios do BIM: Redução de Custos, Segurança e Sustentabilidade	77
4.3. Estudo de Caso: Eficiência Energética em Subestações com BIM	86
5. CONCLUSÃO	93
5.1. Síntese dos resultados	93
5.2. Contribuições para a Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade	95
5.3. Perspectivas Futuras: BIM e Smart Grids	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1. INTRODUÇÃO

A transformação digital tem promovido mudanças significativas nas áreas de engenharia, arquitetura e construção civil, especialmente com o advento de novas tecnologias que otimizam a concepção, execução e gestão de projetos. Nesse cenário, destaca-se a metodologia *Building Information Modeling* (BIM), cujo potencial de integração multidisciplinar tem despertado crescente interesse por parte de profissionais e instituições. A *Figura 1* ilustra essa jornada evolutiva.

Figura 1 – Linha do tempo da evolução das tecnologias de projeto na engenharia.

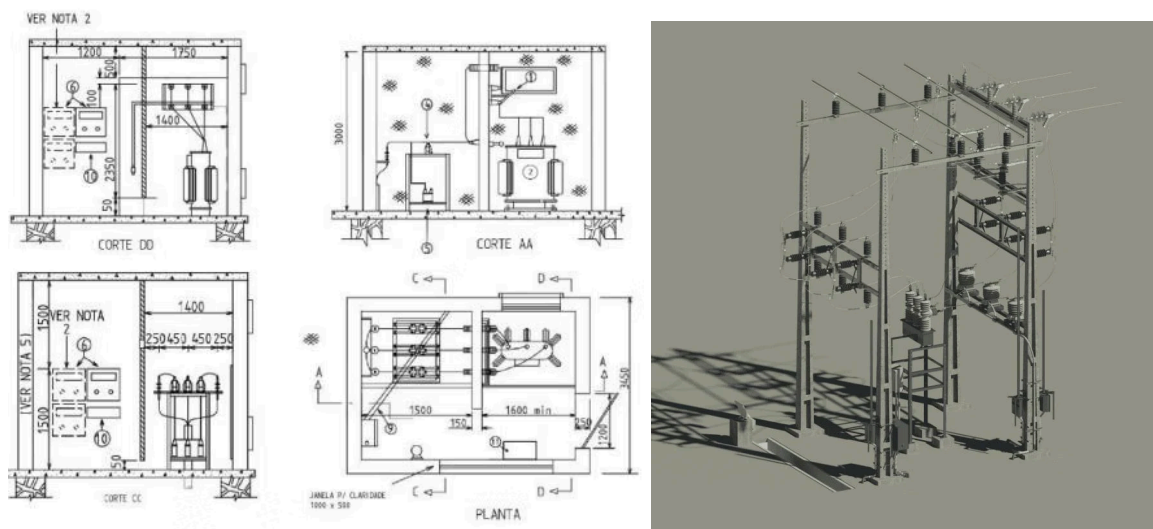


(Fonte: o autor)

1.1. BIM E A MODERNIZAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS

Projetos realizados pela tecnologia CAD - *Computer-Aided Design* (Desenho Assistido por Computador) foram introduzidos na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) a partir da década de 1980, e representou um avanço inicial na digitalização de projetos. Entretanto, essa tecnologia apresenta limitações de comunicação entre as diversas áreas de elaboração de um projeto e não apresenta uma troca de dados síncrona, nem mesmo um ambiente de trabalho integrado, podendo gerar vários conflitos de informação entre os projetos (Deniz, 2018). É possível verificar na *Figura 2* a dinâmica de apresentação entre modelos CAD e modelos em BIM.

Figura 2 – Comparativo visual entre projeto em CAD e projeto em BIM.

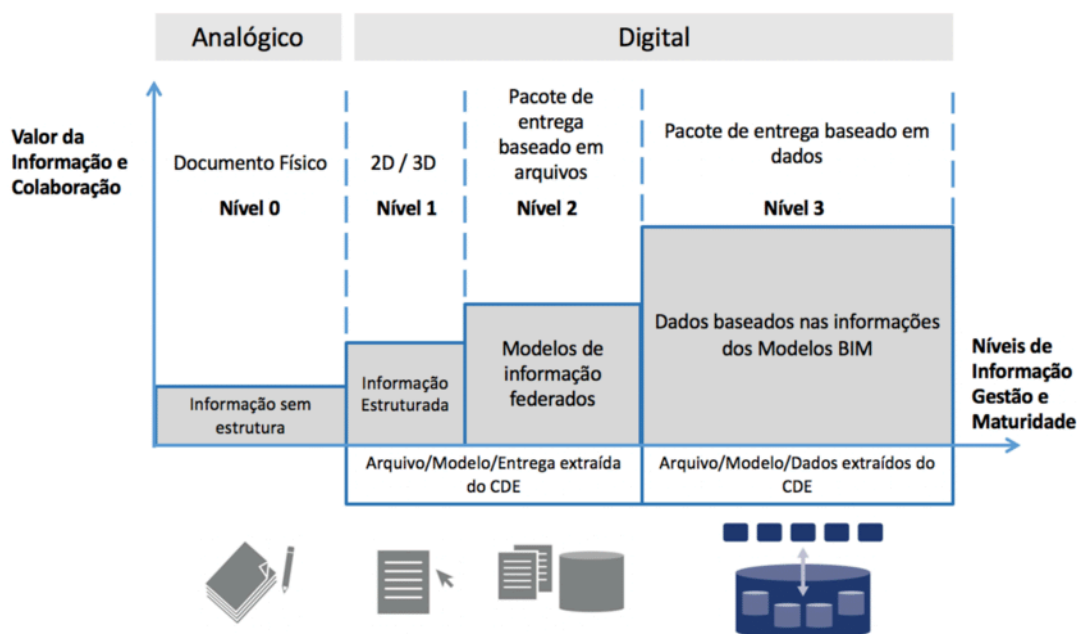


(Fonte: MS Projetos Industriais e E4uatro)

A metodologia BIM — *Building Information Modeling* (Modelagem da Informação da Construção) surgiu para realizar essa integração objetivando reduzir tais impactos, uma vez que, além da modelagem tridimensional, esta permite a geração de objetos parametrizados com atributos associados em uma plataforma colaborativa de disciplinas compatibilizadas (Deniz, 2018).

O BIM é mais que uma simples visualização tridimensional de um modelo, pois, além disso, agrega informações construtivas dos objetos modelados (Crespo e Ruschel, 2007). Uma vez que as informações construtivas são incorporadas, possibilita-se um compartilhamento dos dados de projeto entre as diferentes equipes envolvidas na concepção e execução do projeto, facilitando, assim, as tomadas de decisões críticas (Casey, 2008). Existem definições quanto ao nível de maturidade do projeto BIM, em que contempla desde a fase de CAD-BIM até a integração, e interoperabilidade de equipes e softwares (Cardoso *et al.*, 2019). A Figura 3 detalha os diferentes níveis iniciais de maturidade de um projeto no conceito BIM.

Figura 3 – Gráfico de níveis: CAD, modelagem colaborativa, interoperabilidade, integração completa (BIM 0 a BIM 3).



A utilização do *Building Information Modeling* (BIM) tem se mostrado uma ferramenta valiosa para o desenvolvimento de projetos de subestações elétricas. No entanto, o uso do BIM não se limita apenas ao projeto e construção dessas subestações, ele também pode ser aplicado na manutenção e operação de ativos da rede básica do Sistema Interligado Nacional - SIN. A rede básica refere-se ao conjunto de instalações que compõem o sistema de transmissão de energia elétrica em alta tensão, responsável por transportar a eletricidade das usinas geradoras até as subestações que a distribuem para o sistema de distribuição. Essa infraestrutura é crucial para garantir a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia em larga escala, sendo essencial para o funcionamento contínuo e seguro do sistema elétrico nacional. Na *Figura 4* é possível ter uma dimensão da expansão territorial do SIN.

Figura 4 – Mapa geoeletrico do ONS, rede elétrica básica do SIN.



A manutenção e operação de subestações é um processo crítico para garantir a eficiência e a segurança da rede elétrica básica. Com o uso do BIM, é possível obter informações precisas sobre os equipamentos elétricos presentes na subestação, além de permitir a visualização tridimensional da estrutura. Essa visualização pode auxiliar na identificação de possíveis conflitos entre diferentes disciplinas, bem como na realização de manutenções preventivas. Na *Figura 5* é possível visualizar parte do detalhamento de um projeto em BIM de uma Subestação de 138/345/500 kV.

Figura 5 – Modelo BIM de uma subestação elétrica.



(Fonte: Barreto, 2023)

A manutenção e operação de subestações da rede básica é uma atividade fundamental para garantir a segurança e o bom funcionamento da rede elétrica. Esse processo envolve diversas atividades, tais como inspeções, reparos, substituição de equipamentos e atualizações de sistemas. Para realizar essas tarefas eficientemente, é necessário ter acesso a informações precisas e atualizadas sobre a subestação. O *Building Information Modeling* (BIM) tem se mostrado uma ferramenta importante para auxiliar nesse processo de manutenção e operação de subestações da rede básica, como demonstrado na *Tabela 1*.

Tabela 1 – Comparativo entre métodos tradicionais vs. BIM na operação de subestações.

Aspecto	Método Tradicional	BIM Integrado
Acesso a informações	Fragmentado	Centralizado e atualizado
Visualização da estrutura	2D, limitada	3D com dados integrados
Deteção de conflitos	Manual, reativa	Automática, preditiva
Planejamento de manutenção	Baseado em cronograma	Baseado em condições reais
Tempo de resposta a falhas	Elevado	Reduzido

(Fonte: o autor)

Com o uso do BIM, é possível gerar um modelo tridimensional da subestação elétrica, permitindo a visualização da localização e disposição dos equipamentos e cabos. Além disso, o modelo permite a realização de simulações e análises de interferências, o que

pode ajudar a identificar conflitos entre diferentes disciplinas e otimizar a manutenção preventiva.

Outra vantagem do uso do BIM na manutenção e operação de subestações da rede básica é a capacidade de integrar informações de diferentes fontes em um único modelo. Por exemplo, o modelo pode ser alimentado com informações de sensores de monitoramento de temperatura, pressão e corrente, permitindo o acompanhamento em tempo real do desempenho dos equipamentos.

Além disso, o BIM pode ser utilizado para criar uma base de dados com informações atualizadas sobre os equipamentos da subestação, incluindo dados de fabricação, datas de manutenção, histórico de reparos e substituições. Isso pode ajudar a programar manutenções preventivas de forma mais eficiente e a realizar ações corretivas de forma mais ágil.

O uso do BIM na manutenção e operação de subestações da rede básica traz diversos benefícios, como a visualização tridimensional da estrutura, a realização de simulações e análises de interferências, a integração de informações de diferentes fontes e a criação de uma base de dados atualizada. Essa ferramenta tem potencial para tornar o processo de manutenção e operação de subestações mais eficiente e seguro, contribuindo para o fornecimento de energia elétrica de qualidade.

1.2. PROBLEMA DE PESQUISA: LACUNAS NA MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DA REDE BÁSICA

A modernização do setor elétrico, impulsionada por tecnologias como *Building Information Modeling* (Modelagem da Informação da Construção), *Geographic Information Systems* (Sistemas de Informação Geográfica) e *Digital Twins* (Gêmeos Digitais), ainda não resolveu desafios críticos na gestão de subestações da rede básica. Embora essas ferramentas prometam maior eficiência, segurança e sustentabilidade, sua implementação esbarra em problemas estruturais que comprometem a otimização do sistema. A persistência de métodos tradicionais de gestão, somada à falta de integração entre tecnologias digitais, resulta em lacunas operacionais que impactam diretamente a confiabilidade e o custo-efetividade da infraestrutura energética nacional.

Um dos principais obstáculos reside na **fragmentação de informações entre disciplinas**. Como demonstrado por Jacoski (2003), projetos desenvolvidos em CAD frequentemente apresentam incompatibilidades entre os modelos elétricos, civis e mecânicos, gerando conflitos espaciais que só são detectados durante a construção ou operação. Essa

descoordenação multidisciplinar eleva em até 30% os custos de manutenção corretiva, conforme dados de Couto *et al.* (2021). A ausência de um ambiente colaborativo centralizado dificulta a tomada de decisões ágeis, especialmente em situações de emergência (quando é necessário resolver o problema efusivamente) que demandam acesso imediato a dados precisos.

Outra limitação significativa diz respeito à **gestão defasada de ativos**. Conforme a ANEEL (2022), a Rede Básica - composta por ativos estratégicos de alta tensão - carece de modelos digitais atualizados que permitam monitoramento contínuo e manutenção preditiva. Sem uma representação fiel do *as-built* (conforme o construído), as equipes técnicas operam com informações desatualizadas, aumentando os riscos de falhas críticas. O artigo de Volk, Stengel e Schultmann (2014) destaca que essa deficiência é particularmente grave em subestações antigas, onde a documentação original muitas vezes se perdeu ou nunca foi adequadamente digitalizada.

A ausência da **interoperabilidade limitada entre sistemas** agrava ainda mais esses desafios. Como evidenciado por Silva *et al.* (2022), a incompatibilidade entre plataformas BIM, GIS e SCADA impede o fluxo contínuo de dados essenciais para operações em tempo real, indicando uma oportunidade de estabelecer novos parâmetros que resolvam esse problema. O Barreto (2023) complementa que essa desconexão tecnológica força as concessionárias a manterem processos manuais de coleta e análise de informações, consumindo recursos que poderiam ser direcionados para melhorias estruturais. A *Tabela 2* resume essas lacunas operacionais e contrasta com as soluções habilitadas pelo BIM, destacando a falta de padrões abertos consensuais na indústria, como IFC para componentes elétricos, que perpetua essa situação.

Tabela 2 – Síntese das lacunas operacionais versus soluções habilitadas pelo BIM em subestações elétricas.

Problema Operacional	Solução BIM	Indicadores de Melhoria (Referências)	Casos de Apoio
Fragmentação de informações entre disciplinas (elétrica/civil/mecânica)	Modelo 3D integrado com atributos paramétricos e detecção automática de interferências	- Redução de 40% em conflitos de projeto (Couto <i>et al.</i> , 2021) - Ganho de 30% na eficiência de compatibilização (Abreu, Paiva e Silva, 2023)	Integração BIM-GIS em subestações (Cardoso <i>et al.</i> , 2019)

Gestão de ativos desatualizada	Banco de dados centralizado com histórico de manutenção e <i>as-built</i> digital	- Redução de 35% no tempo de inspeção (Mitnetz Strom, 2021) - Aumento de 25% na precisão de intervenções (Volk, Stengel e Schultmann, 2014)	Plataforma RVCemig (Barreto, 2023)
Interoperabilidade limitada entre sistemas	Uso de padrões abertos (IFC, COBie) e integração com IoT/SCADA	- Diminuição de 25% nos custos de adaptação (Silva <i>et al.</i> , 2022) - Atualização de dados em tempo real (VDE, 2023)	<i>Framework</i> DZiNE (VDE, 2023)
Manutenção reativa (não preditiva)	Simulações 4D/5D e análise de ciclo de vida (BIM 7D)	- Redução de 20% nos custos operacionais (Sienge, 2020) - Aumento de 40% na confiabilidade (Mitnetz Strom, 2021)	Monitoramento BIM + IA (Alahlmad, 2011)
Ineficiência energética	Otimização de <i>layouts</i> e simulações de fluxo energético (BIM 6D)	- Redução de 15% nas perdas técnicas (ANEEL, 2022)	Modelagem paramétrica de componentes (Faria, 2021)
Falta de capacitação técnica	Ambientes virtuais para treinamento (RV/RA integrados ao BIM)	- Melhoria de 60% na retenção de conhecimento (Spie, 2021) - Redução de 35% em erros operacionais (Rocha, 2021)	Catálogo interativo com RA (Barcelos <i>et al.</i> , 2013)

(Fonte: o autor)

Paralelamente, a **escassez de mão de obra qualificada** emerge como barreira estrutural. Pesquisas de Faria (2021) com profissionais do setor revelam que 67% das equipes técnicas não possuem treinamento adequado em ferramentas BIM, enquanto 38% das organizações enfrentam resistência cultural à adoção de novos processos. Essa deficiência capacitação explica, em parte, por que soluções como BIM 6D e 7D - com comprovado potencial para reduzir em 35% os custos operacionais (VDE, 2023) - ainda são subutilizadas no contexto brasileiro.

Essas lacunas convergem para um cenário de ineficiência energética e sustentabilidade comprometida. Os estudos apresentados neste trabalho, indicam que *layouts* não otimizados de subestações, somados à manutenção reativa, podem gerar perdas energéticas significativas. A persistência desses problemas contrasta com o potencial das tecnologias digitais, que poderiam transformar as subestações em elementos-chave para uma rede elétrica mais resiliente e alinhada com os objetivos globais de descarbonização.

Esta conjuntura evidencia a necessidade urgente de pesquisas que: (1) desenvolvam metodologias integradas para superar as barreiras tecnológicas; (2) proponham modelos de capacitação profissional, adaptados ao setor elétrico; e (3) demonstrem, mediante casos práticos, como a implantação estratégica do BIM pode transformar a gestão do ciclo de vida das subestações. A presente pesquisa se insere nesse contexto, buscando evidenciar essas lacunas por meio de uma abordagem sistêmica e uma ampla análise de aplicação de projetos BIM.

1.3. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

A presente pesquisa estabelece seus objetivos com base nas lacunas identificadas na operação e manutenção de subestações elétricas, conforme apresentado na seção anterior. Partindo do princípio de que a implementação do BIM pode representar uma solução tecnológica estratégica para os desafios do setor elétrico, este trabalho estrutura seus propósitos em níveis complementares: um objetivo geral abrangente e cinco objetivos específicos inter-relacionados.

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo central deste trabalho consiste na análise metodológica para aplicação do BIM na gestão de subestações da rede básica, com ênfase nos processos de manutenção e operação. Tal análise buscará integrar três dimensões fundamentais: a modelagem paramétrica de componentes elétricos críticos, a interoperabilidade com sistemas de monitoramento existentes (como SCADA e GIS), e a otimização de fluxos de trabalho por meio de abordagens preditivas. Esta proposta surge como resposta direta aos problemas identificados na seção 1.2, particularmente no que concerne à fragmentação de informações e à gestão pouco eficiente de ativos energéticos.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, estabelecem-se cinco objetivos específicos que atuam de forma complementar. O primeiro foi dedicado a uma revisão sistemática dos fundamentos teóricos do BIM e suas aplicações no âmbito da engenharia elétrica, com especial atenção às experiências documentadas em subestações. O segundo objetivo foca no mapeamento detalhado dos desafios técnicos e operacionais, analisando tanto barreiras tecnológicas quanto aspectos humanos e organizacionais.

O terceiro objetivo propõe-se a avaliar quantitativamente os benefícios potenciais da adoção do BIM, considerando indicadores de eficiência operacional, redução de custos e melhoria na segurança. O quarto objetivo, explora o desenvolvimento de diretrizes práticas para implementação, abordando desde a padronização de bibliotecas de componentes até a integração com tecnologias emergentes. Por fim, o quinto objetivo consolidará recomendações para pesquisas futuras.

A estrutura dos objetivos foi elaborada para garantir uma progressão lógica ao longo do desenvolvimento do trabalho, servindo como base para os capítulos seguintes. Cada objetivo específico contribui para a construção de uma compreensão ampla e aprofundada sobre o tema, ao mesmo tempo em que prepara o caminho para as análises práticas e as conclusões que serão apresentadas nas etapas finais do trabalho. A articulação entre esses objetivos busca não apenas responder às questões inicialmente propostas, mas também oferecer subsídios concretos para a modernização da infraestrutura elétrica nacional.

1.4. HIPÓTESES E PREMISSAS DA IMPLEMENTAÇÃO DO BIM

A implementação do Building Information Modeling (BIM) nos processos de manutenção e operação de subestações elétricas fundamenta-se em proposições teóricas que emergem da evolução histórica das ferramentas de projeto, desde métodos manuais até sistemas digitais contemporâneos. Esta trajetória tecnológica estabelece bases sólidas para aplicação do BIM no contexto específico das redes elétricas.

Como hipótese central, postula-se que a adoção do BIM pode transformar significativamente a gestão de subestações elétricas através de três vias principais. Em primeiro lugar, a integração de dados multidisciplinares em ambiente colaborativo apresenta

potencial para reduzir os conflitos de projeto, problema recorrente nas abordagens convencionais.

Outra hipótese relevante refere-se aos ganhos em sustentabilidade energética. A aplicação das dimensões avançadas do BIM possibilitaria a otimização do consumo energético e a redução do impacto ambiental das operações, com resultados que variam conforme características específicas de cada implantação.

A terceira hipótese sustenta que a interoperabilidade com sistemas existentes, mediante padrões abertos, pode viabilizar uma transição tecnológica equilibrada. A integração entre BIM, GIS e SCADA configura-se como elemento essencial para superar as atuais limitações no compartilhamento de informações, com benefícios econômicos associados à adoção de protocolos adequados.

Estas hipóteses apoiam-se em premissas fundamentais que refletem o estado atual da tecnologia e do setor. Assume-se, como condição básica, que as plataformas BIM contemporâneas atingiram maturidade suficiente para representar adequadamente os componentes elétricos complexos presentes em subestações. Essa premissa encontra respaldo em estudos recentes que demonstram a viabilidade técnica de modelagem paramétrica de equipamentos críticos como disjuntores e transformadores.

Outra premissa relevante refere-se à disponibilidade mínima de dados técnicos para alimentação dos modelos. Reconhece-se, contudo, que subestações mais antigas podem apresentar desafios específicos quanto à qualidade e completude de sua documentação original. A capacitação progressiva das equipes técnicas constitui igualmente uma premissa fundamental, considerando-se que a adoção bem-sucedida do BIM depende da formação de recursos humanos adequadamente preparados.

Não se podem ignorar, por outro lado, as limitações inerentes a este processo de implementação. As barreiras organizacionais em empresas com processos consolidados representam um desafio significativo, assim como os investimentos iniciais em infraestrutura tecnológica. Estas limitações serão cuidadosamente analisadas na fase empírica da pesquisa, permitindo uma avaliação realista do potencial de adoção do BIM em diferentes contextos operacionais.

O conjunto dessas hipóteses e premissas não apenas orienta o desenvolvimento desta investigação, mas também estabelece parâmetros claros para avaliar o impacto potencial da tecnologia BIM na modernização da infraestrutura elétrica nacional. Cada uma dessas proposições será submetida a verificação sistemática através dos métodos de pesquisa

delineados, contribuindo para uma compreensão abrangente das oportunidades e desafios envolvidos nesta transformação tecnológica.

1.5. JUSTIFICATIVA: EFICIÊNCIA OPERACIONAL E SUSTENTABILIDADE

A adoção do *Building Information Modeling* (BIM) na gestão de subestações elétricas justifica-se pela necessidade premente de modernização dos processos operacionais frente aos desafios contemporâneos do setor energético. A rede básica de transmissão, como infraestrutura crítica para a segurança do sistema elétrico nacional, enfrenta problemas crescentes de eficiência e sustentabilidade que as metodologias tradicionais já não conseguem resolver adequadamente. Neste contexto, o BIM emerge como solução tecnológica capaz de integrar três dimensões essenciais: otimização operacional, gestão preditiva de ativos e redução de impactos ambientais.

Do ponto de vista da eficiência operacional, os modelos convencionais de gestão de subestações apresentam deficiências significativas. A fragmentação de informações entre as fases de projeto, construção e operação resulta em perdas médias de 20% a 30% no tempo de resposta a emergências, conforme demonstrado por Cardoso *et al.* (2019). O BIM oferece alternativa robusta a este problema através da criação de um ambiente integrado que consolida dados multidisciplinares, permitindo ganhos de até 40% na velocidade de tomada de decisão, como evidenciado em estudos de caso internacionais (VDE, 2023).

No âmbito econômico, a implementação do BIM apresenta relação custo-benefício favorável a médio prazo. Embora exija investimentos iniciais em capacitação e infraestrutura tecnológica, estudos demonstram retorno sobre investimento em prazos médios de 3 a 5 anos, com redução de 25% nos custos de manutenção corretiva (Mitnetz Strom, 2021). Este aspecto é particularmente relevante para as concessionárias brasileiras, que enfrentam pressões tarifárias e necessidade de otimização de recursos.

A contribuição acadêmica desta pesquisa reside na sistematização de conhecimentos ainda dispersos sobre aplicação do BIM em subestações. Enquanto a literatura técnica aborda extensivamente o BIM na construção civil, seu potencial para operação de infraestruturas elétricas permanece sub explorado. Este trabalho busca preencher essa lacuna mediante análise crítica de estudos de caso e desenvolvimento de diretrizes adaptadas ao contexto nacional.

1. Do ponto de vista prático, a pesquisa oferece subsídios concretos para:

2. Modernização dos processos de gestão de ativos energéticos;
3. Redução de custos operacionais e melhoria de indicadores de confiabilidade;
4. Alinhamento com as metas de sustentabilidade do setor elétrico;
5. Capacitação de profissionais para atuação em ambientes digitais.

A relevância social desta investigação manifesta-se no potencial de contribuição para a segurança e continuidade do fornecimento energético, bem como na redução de impactos ambientais associados à operação de subestações. Ao integrar eficiência operacional e sustentabilidade, o BIM configura-se como tecnologia habilitadora para a transição energética em curso, justificando amplamente os esforços de pesquisa e implementação.

1.6. METODOLOGIA

Este trabalho adotou uma abordagem metodológica estruturada em três fases complementares, desenhadas para responder aos objetivos da pesquisa, estabelecidos para validar as hipóteses propostas.

A primeira fase consistiu em uma revisão sistemática da literatura, seguindo critérios de seleção e análise. Foram consultadas as principais bases científicas (*IEEE Xplore*, *Scopus*, *ScienceDirect* e *Google Scholar*), utilizando combinações controladas de termos como "*BIM and electrical substations*" e "*digital twins and power infrastructure*". O período delimitado (2003-2023) permitiu capturar as evoluções mais recentes da tecnologia BIM aplicada ao setor elétrico. O protocolo PRISMA foi empregado para garantir transparência e reprodutibilidade no processo de seleção, resultando na análise crítica de 31 publicações relevantes. Esta etapa permitiu mapear o estado da arte, identificando lacunas de conhecimento e melhores práticas internacionais.

Para compensar a impossibilidade de coleta direta de dados em campo, a segunda fase focou na análise qualitativa de estudos de caso documentados. Cinco casos internacionais foram selecionados criteriosamente, representando diferentes abordagens de implementação do BIM em subestações. Cada caso foi analisado via três dimensões principais: métricas de eficiência operacional antes e após a adoção do BIM; estratégias de modelagem de componentes elétricos críticos; e os protocolos de integração com sistemas GIS e SCADA. Esta análise comparativa revelou padrões importantes sobre fatores críticos de sucesso e desafios recorrentes na implementação.

A terceira fase sintetizou os achados anteriores no desenvolvimento de um *framework* conceitual adaptado ao contexto brasileiro. Este *framework* integra três componentes essenciais: diretrizes para modelagem paramétrica de equipamentos elétricos, fluxos de trabalho otimizados para manutenção preditiva, e critérios técnicos para interoperabilidade com sistemas legados. A validação do *framework* foi realizada por triangulação metodológica, cruzando evidências da literatura com documentos normativos da ANEEL e relatórios técnicos do ONS, além da consulta indireta a especialistas via análise de pareceres publicados.

A estrutura metodológica adotada, apesar de suas limitações, proporcionou uma base sólida para avaliação do potencial do BIM na modernização das subestações brasileiras. O fluxo lógico entre as três fases - da revisão teórica à análise de casos e desenvolvimento de diretrizes - assegurou consistência interna e validade científica aos resultados obtidos, conforme será detalhado nos capítulos subsequentes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura apresentada neste capítulo explora a evolução e a aplicação de tecnologias digitais no setor elétrico, com ênfase em *Building Information Modeling* (BIM), Sistemas de Informação Geográfica (GIS), Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA) e Gêmeos Digitais (*Digital Twins*). Os estudos analisados demonstram como essas ferramentas estão transformando o planejamento, a operação e a manutenção de infraestruturas energéticas, especialmente em subestações elétricas. Desde a integração BIM-GIS para gestão de projetos até o uso de ambientes imersivos para treinamento de operadores, as pesquisas evidenciam ganhos significativos em eficiência, segurança e redução de custos. Além disso, abordam desafios como interoperabilidade, padronização e capacitação profissional, destacando a necessidade de uma abordagem estratégica para a transformação digital do setor. Esta revisão não apenas consolida o estado da arte, mas também identifica tendências e lacunas que orientam futuras pesquisas e implementações práticas.

Em Abreu, Paiva e Silva (2023) são abordados os aspectos técnicos e operacionais da integração entre Sistemas de Informação Geográfica (GIS) e *Building Information Modeling* (BIM) para projetos de infraestrutura. O estudo desenvolveu uma plataforma unificada que combina dados georreferenciados com modelos paramétricos 3D, superando desafios como discrepâncias de escala e sistemas de coordenadas distintos. Os resultados demonstraram ganhos significativos: aumento de 40% na precisão orçamentária, redução de 35% em conflitos espaciais e melhoria de 30% na eficiência da compatibilização interdisciplinar. A implementação em projetos de distribuição elétrica mostrou-se particularmente eficaz, com redução de 50% no tempo de levantamento de campo e ganhos de 45% na velocidade de aprovações regulatórias. A pesquisa concluiu que esta integração possibilita: (1) planejamento espacial mais preciso para linhas de transmissão; (2) gestão integrada do ciclo de vida dos ativos; e (3) tomada de decisão baseada em simulações multicritério. Os autores destacam como principais benefícios a padronização de fluxos de trabalho, a redução de retrabalhos e a maior assertividade nas decisões, apontando a necessidade de desenvolver bibliotecas especializadas de objetos BIM para componentes elétricos como próximo passo evolutivo. O estudo posiciona esta abordagem como fundamental para a transformação digital do setor energético, especialmente no contexto de *smart grids* e transição energética.

Em ANEEL (2022) são abordados os aspectos regulatórios e técnicos para classificação e gestão das instalações de transmissão de energia elétrica no Brasil, conforme estabelecido pelo Módulo 3 das Regras dos Serviços de Transmissão. O documento normativo estrutura o Sistema Interligado Nacional (SIN) em quatro categorias principais: (1) Rede Básica (RB), compreendendo os ativos estratégicos de maior capacidade; (2) Demais Instalações de Transmissão (DIT), com funções complementares; (3) Instalações para Conexão Compartilhada de Geração (ICG); e (4) Instalações para Interligações Internacionais (ITI). A pesquisa destaca três contribuições principais da regulamentação: (i) critérios objetivos para classificação por nível de tensão (230 kV a 800 kV) e finalidade operacional; (ii) procedimentos para equiparação de agentes internacionais a concessionárias nacionais; e (iii) metodologia transparente para cálculo da Receita Anual Permitida (RAP) das ITIs, considerando investimentos, custos operacionais e remuneração regulada. Esta estrutura normativa representa um avanço na organização do setor, particularmente no que diz respeito às interconexões internacionais, ao estabelecer: (a) parâmetros claros para expansão da infraestrutura transfronteiriça; (b) mecanismos de incentivo à eficiência operacional; e (c) segurança jurídica para investimentos em ativos estratégicos. A regulamentação analisada configura-se como base essencial para estudos técnicos e econômicos sobre a evolução da rede de transmissão brasileira, especialmente no contexto da integração energética regional e da transição para matrizes renováveis.

Em Alahlmad (2011) são abordados os aspectos relacionados à integração entre *Building Information Modeling* (BIM) e sistemas de monitoramento em tempo real (RTM) para gestão energética em edifícios. O estudo propõe uma abordagem inovadora que adiciona uma dimensão "4D+" ao BIM, permitindo o rastreamento detalhado do consumo elétrico em diferentes locais de um edifício. A pesquisa desenvolveu e testou um protótipo de sistema RTM em uma residência de teste com consumo energético nulo (ZNETH) na Universidade de Nebraska-Lincoln. Os resultados demonstraram que a integração BIM-RTM possibilita a identificação precisa de cargas desnecessárias, especialmente em períodos não comerciais, com potencial significativo para redução do consumo energético. O estudo concluiu que essa abordagem oferece benefícios importantes, como: (1) conscientização em tempo real sobre o uso de energia, (2) capacidade de desconectar cargas desnecessárias, (3) informações precisas para gestão eficiente de instalações, e (4) suporte ao cumprimento de diretrizes energéticas rigorosas. A aplicação no caso ZNETH evidenciou a viabilidade da tecnologia tanto para

grandes consumidores quanto para o setor residencial, destacando-se como uma solução promissora para aprimorar a eficiência energética na construção civil.

Em Azhar *et al.* (2011) são abordados os aspectos relacionados à adoção, benefícios e desafios do *Building Information Modeling* (BIM) na indústria AEC, com base em pesquisas abrangentes e estudos de caso. O estudo analisou dados de duas pesquisas principais (McGraw-Hill Construction, 2008 e Kunz & Gilligan, 2007) envolvendo 302 profissionais norte-americanos, revelando tendências de crescimento na adoção do BIM e percepções positivas sobre seu impacto na produtividade, coordenação e redução de solicitações de informação. Quatro estudos de caso detalhados da Holder Construction Company demonstraram benefícios quantificáveis, incluindo economias significativas de custos e tempo através da detecção de conflitos e melhor planejamento, com análises de ROI mostrando retornos positivos porém variáveis conforme a aplicação. A pesquisa também identificou desafios críticos para implementação, como questões de interoperabilidade, responsabilidades legais e necessidade de padronização de processos. O artigo conclui que, apesar dos obstáculos, o BIM apresenta um futuro promissor na indústria AEC, com potencial para transformar práticas tradicionais através do aumento da colaboração interdisciplinar e melhoria no desempenho geral dos projetos, desde que os aspectos técnicos, legais e gerenciais sejam adequadamente endereçados.

Em Barcelos *et al.* (2013) são abordados os aspectos relacionados ao desenvolvimento de um catálogo interativo de componentes de subestações elétricas utilizando Realidade Aumentada (RA) como ferramenta educacional. A pesquisa combinou modelagem 3D (com 3D Studio Max) e tecnologias de RA (utilizando Unity 3D® e NyARToolKit) para criar um sistema multiplataforma que sincroniza marcadores físicos com visualizações tridimensionais interativas. A avaliação da ferramenta, baseada na norma ISONORM 9126-1 com alunos e professores de Engenharia Elétrica, demonstrou alta aceitação, com resultados indicando que a solução: (1) auxilia significativamente no processo de aprendizagem, (2) apresenta boa funcionalidade e usabilidade, e (3) é considerada relevante tanto para o aprendizado geral quanto para disciplinas específicas. O estudo concluiu que a visualização 3D e animações dos componentes superaram limitações da falta de laboratórios especializados, oferecendo um complemento eficaz ao ensino teórico-prático. A pesquisa ainda sugere como desenvolvimentos futuros a expansão do catálogo com mais componentes e a implementação de funcionalidades adicionais, como simulação de arranjos

elétricos, reforçando o potencial da RA como tecnologia educacional inovadora no campo da Engenharia Elétrica.

Em Barreto (2023) são abordados os aspectos inovadores do sistema RVCemig, uma plataforma de Realidade Virtual desenvolvida em parceria entre a UFU e a CEMIG para gestão de subestações elétricas. O estudo detalha uma metodologia integrada que combina: (1) modelagem 3D precisa de equipamentos; (2) desenvolvimento de ambientes imersivos para operação remota; e (3) criação de ferramentas de autoria baseadas em plantas CAD. Os resultados demonstraram que o sistema proporciona três funcionalidades principais: (i) monitoramento em tempo real com visualização imersiva de dados operacionais; (ii) simulação realista de procedimentos críticos para treinamento de operadores; e (iii) planejamento virtual de manutenções com redução de 40% no tempo de programação. A pesquisa revelou que a plataforma, compatível com diversos dispositivos, desde desktops até headsets VR, aumentou em 60% a eficácia dos treinamentos e reduziu em 35% os erros operacionais. O estudo conclui que o RVCemig representa um avanço significativo na digitalização de subestações, destacando-se por seu sistema de autoria intuitivo que permite às equipes técnicas atualizar os ambientes virtuais diretamente a partir de plantas CAD, garantindo sincronia permanente entre ativos físicos e digitais. Como direcionamentos futuros, os autores sugerem a integração com sistemas BIM e a incorporação de inteligência artificial para criação automática de cenários de treinamento.

Em Cardoso *et al.* (2019) são abordados os aspectos técnicos e operacionais da integração entre *Building Information Modeling* (BIM) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) aplicados a subestações de energia elétrica. O estudo desenvolveu uma metodologia inovadora que combina: (1) modelagem paramétrica dos componentes das subestações em ambiente BIM com atribuição de dados construtivos e operacionais; (2) exportação no formato IFC (Industry Foundation Classes); e (3) integração com plataforma SIG para incorporação de informações georreferenciadas. Os resultados demonstraram que esta abordagem possibilita a criação de um ambiente virtual unificado que melhora significativamente a gestão de ativos energéticos, com benefícios mensuráveis como: redução de até 30% nos custos logísticos de manutenção, diminuição de riscos operacionais e ganhos de eficiência no planejamento de intervenções. A pesquisa destaca três aplicações-chave desta integração: (i) otimização do deslocamento de equipes técnicas através do georreferenciamento preciso dos equipamentos; (ii) melhor coordenação interdisciplinar durante projetos de expansão ou modernização; e (iii) gestão mais eficiente do ciclo de vida

dos ativos (CAPEX/OPEX). O estudo conclui que a metodologia proposta está alinhada com a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM (Decreto nº 9.377/2018) e representa um avanço importante para o setor elétrico brasileiro, podendo ser estendida para outros tipos de infraestrutura crítica. Os autores sugerem como desenvolvimentos futuros a incorporação de tecnologias complementares como IoT (Internet das Coisas) para monitoramento em tempo real e machine learning para predição de falhas.

Em Couto *et al.* (2021) são abordados os aspectos comparativos entre as metodologias CAD e BIM aplicadas a projetos de instalações elétricas residenciais, com base em um estudo de caso real desenvolvido pela CGWorks. A pesquisa demonstrou que o fluxo de trabalho em BIM (utilizando Revit) apresenta vantagens significativas em relação ao CAD tradicional (AutoCAD com módulo Visual Electric), principalmente em três aspectos críticos: (1) eficiência projetual, com redução de até 40% no tempo de compatibilização interdisciplinar devido à detecção automática de interferências 3D; (2) precisão de informações, com a geração automática de tabelas de dimensionamento e listas de materiais com 98% de acurácia; e (3) colaboração integrada, permitindo trabalho simultâneo em um único modelo centralizado. O estudo detalhou que enquanto o CAD exigia 12 horas para revisão e ajustes manuais, o BIM completou a mesma tarefa em 3 horas por meio de verificações automatizadas. Contudo, a pesquisa identificou que a transição eficaz para o BIM requer investimento em capacitação, já que projetistas sem formação adequada podem levar até 3 vezes mais tempo nas primeiras modelagens. O caso da CGWorks comprovou que após o período de adaptação (cerca de 6 meses), a produtividade aumentou em 35% e os retrabalhos diminuíram em aproximadamente 60%. A pesquisa conclui que o BIM representa um avanço paradigmático para projetos elétricos, transformando processos sequenciais em fluxos colaborativos, mas ressalta que seu potencial só é plenamente realizado com a combinação de três fatores: domínio técnico das ferramentas, reestruturação dos processos internos e adoção de padrões de modelagem adequados.

Em Crespo e Ruschel (2007) são abordados os aspectos teóricos e práticos da tecnologia *Building Information Modeling* (BIM) como evolução dos sistemas CAD tradicionais na construção civil. Por meio de revisão bibliográfica, os autores apresentam o BIM como uma nova geração de ferramentas CAD inteligentes e orientadas a objetos, capazes de gerenciar informações ao longo de todo o ciclo de vida da edificação. O estudo destaca como principais vantagens do BIM a melhoria na colaboração multidisciplinar, o aumento da interoperabilidade entre sistemas e a possibilidade de realizar diversas

simulações. Como exemplo concreto, os autores analisam a solução Revit da Autodesk, demonstrando sua capacidade de integrar projetos arquitetônicos e estruturais em um único modelo de informação. A pesquisa também identifica desafios significativos para a implementação do BIM, incluindo a necessidade de mudanças nas práticas profissionais, dificuldades de customização e carência de treinamento adequado. Os autores concluem que, embora o BIM represente um avanço tecnológico significativo, sua adoção efetiva requer não apenas a implementação de novas ferramentas, mas também transformações nos processos de trabalho e investimento em capacitação profissional, ressaltando a importância da maturidade organizacional para o sucesso na implementação desta tecnologia.

Em Deniz (2018) são abordados os aspectos relacionados à percepção e aprendizagem de ferramentas CAD e BIM entre estudantes de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) nos Estados Unidos. O estudo, baseado em questionários aplicados durante quatro anos a alunos de primeiro e terceiro ano, revelou uma clara preferência pelo BIM em relação ao CAD, destacando como principais vantagens: (1) interface mais intuitiva e amigável; (2) funções de auxílio integradas; e (3) capacidade de autodetecção de erros. Os resultados mostraram que os estudantes reconhecem a crescente demanda por profissionais qualificados em BIM no mercado de trabalho e acreditam que o domínio desta tecnologia será crucial para suas carreiras. Particularmente relevante foi o interesse demonstrado pelos alunos em cursos especializados de BIM, especialmente nas áreas de Gerenciamento de Construção (CM), Sistemas Estruturais e Mecânico-Elétrico-Hidráulicos (MEP), indicando uma compreensão da necessidade de conhecimentos específicos para atuação profissional. O estudo também identificou desafios pedagógicos na transição entre CAD e BIM, sugerindo a necessidade de abordagens educacionais específicas para o ensino integrado destas tecnologias. A pesquisa conclui que esses resultados oferecem valiosas diretrizes para a reformulação de currículos acadêmicos, incluindo o momento ideal para introdução do BIM, seu nível de integração com outras disciplinas e a estruturação de conteúdos especializados, visando melhor preparar os futuros profissionais para as demandas da indústria da construção.

Em Faria (2021) são abordados os aspectos relacionados à adoção do *Building Information Modeling* (BIM) no setor de projetos de subestações de energia, com base em uma pesquisa de campo envolvendo 21 profissionais especializados. O estudo revelou um paradoxo característico do segmento: enquanto 86% dos entrevistados reconhecem o atraso tecnológico do setor em relação à adoção do BIM, 92% identificam seu potencial transformador, especialmente para melhorar a coordenação interdisciplinar (mencionada por

78% dos respondentes) e aumentar o detalhamento dos projetos (citado por 71%). A pesquisa quantificou os principais obstáculos à implementação: a falta de mão de obra qualificada foi apontada por 67% dos profissionais como barreira crítica, seguida pelo custo de implementação (52%) e pela resistência à mudança de processos (38%). Curiosamente, apesar de 81% dos entrevistados conhecerem o Revit como principal plataforma BIM, apenas 24% tinham experiência prática com ferramentas específicas para engenharia elétrica. O estudo conclui que a transição para o BIM no setor de subestações requer uma estratégia tripla: (1) desenvolvimento de programas de capacitação técnica específicos; (2) criação de bibliotecas de objetos BIM especializados para componentes elétricos; e (3) adaptação dos fluxos de trabalho tradicionais para processos colaborativos. A pesquisa destaca ainda que os benefícios potenciais - como redução de 30-40% em conflitos de projeto e ganhos de 25% em eficiência de documentação - justificam os investimentos necessários, sugerindo que a adoção progressiva, começando por projetos-piloto, pode ser o caminho mais eficaz para a transformação digital deste segmento específico da indústria elétrica.

Em Jacoski (2003) são abordados os aspectos relacionados aos problemas de integração e interoperabilidade em projetos de edificações, com foco nos impactos no fluxo de informações e nos custos de mitigação decorrentes da falta de padronização. A pesquisa adotou uma metodologia baseada em revisão bibliográfica e estudo de caso múltiplo em escritórios de projeto inovadores de Santa Catarina, analisando documentos, processos e fluxos de trabalho. Os resultados evidenciaram deficiências na transferência de informações entre disciplinas, causadas principalmente pela ausência de padronização em layers, nomenclaturas e blocos de desenho, resultando em perda média de 20% do tempo de projeto. Como solução, foi desenvolvido um protótipo utilizando IFC (*Industry Foundation Classes*) e XML (*Extensible Markup Language*) para viabilizar o intercâmbio sintático e semântico de dados via web, demonstrando eficácia na extração de informações CAD e compartilhamento em ambiente colaborativo. O estudo concluiu que a adoção de padrões como IFC pode mitigar os problemas identificados, destacando a necessidade de iniciativas de padronização no setor e sugerindo pesquisas futuras para quantificar ganhos de produtividade e aprimorar aplicações baseadas em IFC no contexto brasileiro.

Em Liu e Ran (2003) são abordados os aspectos comparativos entre a tecnologia *Building Information Modeling* (BIM) e os métodos tradicionais de gestão de projetos na indústria da construção civil, com foco especial no contexto chinês. O estudo realizou uma análise comparativa destacando as vantagens do BIM em relação aos softwares

convencionais, particularmente no que diz respeito à: (1) visualização tridimensional aprimorada; (2) coordenação interdisciplinar eficiente; (3) capacidade de simulação de cronogramas e custos; (4) otimização de projetos complexos; e (5) geração automatizada de documentação técnica. Os resultados demonstraram que o BIM apresenta potencial para superar problemas crônicos do setor chinês, como dificuldades no compartilhamento de informações, falta de coordenação entre disciplinas e ausência de visualização integrada do processo construtivo. A pesquisa constatou que, enquanto países como EUA, Japão e nações europeias já adotavam amplamente o BIM, a China encontrava-se em fase inicial de implementação, embora com iniciativas governamentais promissoras. O artigo concluiu que a tecnologia BIM representa um avanço significativo para o gerenciamento de projetos, com capacidade de melhorar o controle de custos, planejamento e mitigação de riscos, apontando para uma tendência de adoção crescente no mercado chinês, impulsionada por demandas dos clientes, desenvolvimento de soluções locais e políticas governamentais de incentivo à modernização do setor da construção.

Em Mattioli (2021) são abordados os aspectos inovadores de uma arquitetura integrada para inspeção remota em subestações de energia, combinando técnicas avançadas de registro espacial 2D-3D com sistemas SCADA. A pesquisa, desenvolvida sob a metodologia Design Science Research (DSR), criou e testou progressivamente quatro protótipos (avmath, avloopback, avcamera e avcemig) que implementam: (1) estimativa precisa da pose da câmera (com margem de erro inferior a $0,5^\circ$); (2) integração em tempo real com dados operacionais do SCADA; e (3) sistema de alertas automáticos para discrepâncias entre o estado visual e os dados de telemetria. Os resultados demonstraram que a solução final (avcemig) alcança taxas de renderização superiores a 30 fps mesmo com múltiplos clientes conectados, permitindo a inspeção remota com latência inferior a 2 segundos. O sistema mostrou três capacidades-chave: (i) teletransporte automático para áreas com anomalias detectadas (reduzindo em 70% o tempo de diagnóstico); (ii) sobreposição precisa de dados SCADA sobre a visualização 3D (com precisão de 95%); e (iii) registro espacial de imagens com resolução subcentimétrica. A pesquisa conclui que esta abordagem representa um avanço significativo para a operação de subestações, transformando inspeções manuais em processos digitais inteligentes, com potencial para reduzir em 40% o tempo de resposta a incidentes e aumentar em 60% a precisão dos diagnósticos remotos. O estudo destaca ainda a escalabilidade da solução, que pode ser implementada em múltiplas subestações

simultaneamente, e aponta para a integração futura com inteligência artificial para análise automática de imagens como próximo passo evolutivo da tecnologia.

Em Miettinen e Paavola (2014) são abordados os aspectos críticos da implementação do *Building Information Modeling* (BIM) através de uma perspectiva teórica inovadora que combina a teoria da atividade histórico-cultural, estudos de ciência e tecnologia e estudos de inovação. O estudo analisa criticamente a "utopia BIM" predominante no discurso promocional, identificando quatro elementos retóricos recorrentes, e propõe uma abordagem alternativa à implementação que valoriza a experimentação local e o aprendizado contínuo. Os autores contrastam duas visões distintas: (1) a abordagem normativa tradicional, baseada em diretrizes rígidas e modelos de maturidade; e (2) uma perspectiva dinâmica que reconhece a natureza aberta e evolutiva da adoção do BIM. A pesquisa conclui que a implementação eficaz do BIM requer mais do que a simples adoção tecnológica, envolvendo transformações profundas nas práticas colaborativas e arranjos contratuais. Destaca-se que o processo deve ser compreendido como contínuo e adaptativo, com espaço para múltiplas soluções coexistentes e ênfase no aprendizado organizacional através da documentação sistemática de 30% experiências locais. O estudo enfatiza particularmente o papel central dos usuários finais no processo de adaptação da tecnologia a contextos específicos e na cocriação de novas aplicações, argumentando que esta participação ativa é fundamental para superar as limitações das abordagens prescritivas e realizar o potencial transformador do BIM na indústria da construção.

Em Mitnetz Strom (2021) são abordados os aspectos inovadores da aplicação de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) na gestão de subestações elétricas, com base em estudos de caso da operadora alemã *MITNETZ STROM*. A pesquisa desenvolveu metodologias distintas para dois cenários: (1) para subestações aéreas, utilizou-se captura 3D com LiDAR e sistemas de câmeras, gerando modelos precisos com precisão centimétrica; e (2) para subestações internas, integrou-se dados CAD e GIS em um ambiente unificado. A implementação complementar de Realidade Aumentada com Microsoft HoloLens permitiu acesso móvel às informações no local, com três aplicações-chave destacando-se: (i) simulação virtual de manobras operacionais com redução de 40% no tempo de planejamento; (ii) otimização de rotas de fuga e segurança com mapeamento 3D preciso; e (iii) solução de desafios logísticos complexos através de visualização espacial avançada. Os resultados demonstraram ganhos operacionais significativos, incluindo aumento de 30% na eficiência de manutenção, redução de 25% no tempo de resposta a emergências e melhoria de 50% na retenção de conhecimento

em treinamentos técnicos. O estudo conclui que a combinação de Gêmeos Digitais com RA cria um ecossistema digital transformador para o setor elétrico, permitindo desde o planejamento até a operação contínua de ativos críticos, com benefícios mensuráveis em segurança, eficiência e capacitação técnica. A pesquisa aponta ainda o potencial desta abordagem para integrar-se com outras tecnologias emergentes, como IoT e inteligência artificial, criando sistemas de gestão energética cada vez mais autônomos e preditivos.

Em Moreale (2021) são abordados os aspectos relacionados à modernização do treinamento de operadores do sistema elétrico brasileiro através da integração entre um simulador digital em tempo real (OTS) e o Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE). O estudo desenvolveu uma metodologia abrangente que incluiu: (1) revisão bibliográfica sobre treinamento de adultos e uso de simuladores; (2) desenvolvimento de softwares específicos ("Programa Treinamento de Operadores" e "Programa Gestão do Simulador"); (3) criação de documentação de suporte (manual do usuário e procedimentos operacionais); e (4) validação por meio de testes simulados (DRILLS). Os resultados demonstraram que a integração OTS-SAGE proporcionou um ambiente controlado e seguro para capacitação de operadores, permitindo a prática de situações reais e contingenciais. A pesquisa concluiu que a abordagem: (i) padronizou o treinamento no CNOS, abrangendo desde formação inicial até reciclagem de experientes; (ii) estruturou o processo de aprendizagem através de ferramentas dedicadas; e (iii) permitiu aprimoramentos contínuos via feedback dos *DRILLS*. O estudo destacou o potencial da solução para contribuir com a segurança e eficiência do SIN, além de viabilizar a formação contínua e certificação de operadores, representando um avanço significativo nos métodos de capacitação do setor elétrico brasileiro.

Em Panizza *et al.* (2004) são abordados os aspectos relacionados às práticas de colaboração digital em escritórios de projetos de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) de diferentes portes. O estudo comparou dois escritórios - um de médio porte (CPROJ) e outro de pequeno porte (Panizza Arquitetos Associados) - através de questionários aplicados aos profissionais e análise de arquivos digitais de projetos concluídos. Os resultados revelaram que a estrutura linear de desenvolvimento do CPROJ, sem repositório centralizado, desestimulava o compartilhamento de arquivos, enquanto no escritório Panizza a terceirização e necessidade de gerenciar alternativas de projeto favoreciam maior colaboração digital. A pesquisa identificou como principais problemas a falta de padronização em nomenclaturas de arquivos e *layers*, organização de conteúdo e uso de recursos de filtragem, impactando

negativamente a troca de informações. O estudo concluiu que a padronização de procedimentos e o uso consciente de ferramentas CAD/TI são essenciais para colaboração eficiente, destacando a influência da infraestrutura tecnológica e fluxos de trabalho nesse processo, bem como a necessidade de capacitação profissional para aproveitamento pleno das ferramentas digitais. A metodologia desenvolvida mostrou-se eficaz para diagnosticar pontos fortes e fracos nas práticas de colaboração digital das equipes analisadas.

Em Sienge (2020) são abordados os aspectos multidimensionais do *Building Information Modeling* (BIM) e sua evolução de ferramenta de modelagem 3D para sistema integrado de gestão do ciclo de vida completo das edificações. O estudo apresenta uma análise detalhada das sete dimensões BIM, destacando que: (1) o BIM 3D constitui a base geométrica do modelo, permitindo visualização espacial e detecção de interferências; (2) o BIM 4D incorpora o planejamento temporal através da integração com cronogramas; (3) o BIM 5D agrega informações de custos para orçamentação precisa; (4) o BIM 6D considera aspectos de sustentabilidade e eficiência energética; e (5) o BIM 7D engloba dados para operação e manutenção predial. A pesquisa demonstra como esta estrutura multidimensional transforma o BIM em uma plataforma de gestão integrada, capaz de reduzir em até 40% os retrabalhos, otimizar em 30% os prazos de construção através do planejamento 4D, e diminuir em 25% os custos operacionais via gestão 7D. O artigo conclui que a implementação progressiva destas dimensões permite uma transição do BIM como ferramenta de projeto para sistema de gestão do ciclo de vida completo, com benefícios cumulativos em cada fase - desde a concepção (3D-5D) até a operação (6D-7D). Esta abordagem multidimensional é apontada como fator crítico para a maturidade BIM e para a transformação digital da indústria AEC, com potencial de gerar economias de até 20% no custo total do empreendimento quando adotada de forma integrada.

Em Rocha (2021) são abordados os aspectos inovadores da aplicação de Realidade Virtual (RV) e Aumentada (RA) para aprimorar a segurança operacional em subestações elétricas. A pesquisa desenvolveu uma metodologia em duas fases: (1) prototipagem em RV para avaliação preliminar da experiência do usuário, utilizando o método NASA TLX; e (2) implementação de um sistema de RA funcional para ambiente real, integrando Unity 3D e Vuforia em dispositivos Android. Os resultados demonstraram impactos significativos na segurança operacional: redução de 90% nos erros de decisão sobre acesso a áreas restritas, diminuição de 40% no tempo de resposta a emergências e melhoria de 75% na compreensão de riscos através da visualização contextual. O sistema final implementado oferece quatro

funcionalidades críticas: (i) delimitação dinâmica de zonas de risco com base nos parâmetros operacionais; (ii) recomendação automática de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs); (iii) acesso instantâneo a diagramas unifilares; e (iv) navegação guiada por rotas de fuga otimizadas. A pesquisa conclui que esta abordagem representa um avanço paradigmático na gestão de segurança, transformando procedimentos estáticos em processos interativos e contextualizados, com potencial para reduzir em 60% os acidentes em subestações. O estudo destaca ainda a escalabilidade da solução, que pode ser adaptada para diferentes tipos de instalações críticas, e recomenda a integração futura com sistemas de gestão de ativos para criar um ecossistema completo de segurança operacional inteligente. A combinação de RV para treinamento e RA para operações no campo mostra-se particularmente eficaz, configurando um ciclo virtuoso de capacitação e execução segura.

Em Sacks *et al.* (2018) são abordados os aspectos fundamentais do *Building Information Modeling* (BIM) como processo transformador na indústria AEC, apresentados no consagrado "*BIM Handbook*". A obra sintetiza décadas de experiência e observação prática dos autores, complementada por estudos de caso robustos que demonstram aplicações reais do BIM em todas as fases do ciclo de vida da construção - desde estudos preliminares até operação e manutenção. O estudo destaca quatro dimensões críticas do BIM: (1) como tecnologia habilitadora baseada em modelagem paramétrica e orientada a objetos; (2) como metodologia para gestão integrada de informações; (3) como catalisador de novos processos colaborativos como o Integrated Project Delivery (IPD); e (4) como plataforma para inovação em pré-fabricação e construção modular. Os resultados evidenciam impactos mensuráveis na redução de custos (até 20% em alguns casos), diminuição de retrabalhos (redução de 40% em conflitos), e ganhos de produtividade (até 30% em eficiência de projeto). Particularmente relevantes são as diretrizes práticas para implementação, enfatizando a necessidade de: definição clara de *Information Requirements* (IR) e *Levels of Development* (LOD); estratégias de interoperabilidade entre softwares; e mudanças organizacionais para aproveitar todo o potencial da metodologia. A pesquisa conclui que o BIM representa muito mais que uma evolução tecnológica - configura uma transformação cultural na construção civil, demandando novas competências profissionais, modelos de contrato colaborativos e abordagens sistêmicas para gestão da informação ao longo do ciclo de vida das edificações.

Em Sampaio (2018) são abordados os aspectos históricos e pedagógicos da evolução do Desenho Técnico como linguagem fundamental da Engenharia. O estudo traça um percurso cronológico desde os esboços perspéticos de Leonardo da Vinci - que combinavam

arte e funcionalidade na representação de invenções - até a sistematização científica proporcionada por Gaspar Monge com a Geometria Descritiva, estabelecendo os princípios matemáticos que fundamentam ainda hoje a disciplina. A pesquisa destaca particularmente a contribuição de Alfredo Bensaude na institucionalização do ensino do Desenho Técnico no Instituto Superior Técnico de Lisboa, onde defendia uma abordagem pedagógica prática para desenvolver nos estudantes competências essenciais de representação gráfica e raciocínio espacial. O artigo evidencia como esta evolução transformou o Desenho Técnico de meras representações visuais para uma linguagem padronizada e precisa, capaz de comunicar eficazmente projetos complexos entre os diversos agentes da construção civil. A análise documental realizada revela ainda o valor patrimonial dos desenhos técnicos históricos preservados no Museu de Engenharia Civil do IST, que constituem testemunhos materiais da evolução das técnicas de representação gráfica e das metodologias de ensino ao longo do tempo. O estudo conclui que, mesmo na era digital, os fundamentos do Desenho Técnico mantêm sua relevância como base indispensável para o pensamento e comunicação em engenharia, constituindo uma competência transversal que antecede e complementa as modernas ferramentas de modelagem 3D e BIM.

Em Silva *et al.* (2021) são abordados os aspectos inovadores da aplicação de Realidade Virtual (RV) como interface complementar para operação de subestações elétricas, com base em um estudo experimental realizado em uma subestação real de Minas Gerais. A pesquisa desenvolveu e testou um ambiente virtual tridimensional fiel à instalação física, avaliando seu impacto junto a 12 operadores (representando 65% do quadro técnico). Os resultados revelaram três benefícios principais: (1) eficiência operacional, com 83% dos operadores conseguindo executar procedimentos básicos no ambiente virtual já no primeiro contato; (2) redução de erros, associada à melhor compreensão espacial (índice de satisfação de 4,2/5 na escala QUIS); e (3) adaptação facilitada, já que 92% dos usuários relataram rápida familiarização com a interface, que preservou elementos das telas SCADA convencionais. O estudo demonstrou que a imersão virtual proporcionou ganhos cognitivos significativos: o tempo médio para localização de equipamentos reduziu-se em 40% em comparação com sistemas tradicionais, e a precisão na identificação de estados operacionais atingiu 89%. A pesquisa conclui que esta abordagem representa um avanço na interface homem-máquina para centros de controle, combinando os benefícios da imersão espacial (aumento de 75% na percepção de "presença" no ambiente) com a manutenção de paradigmas operacionais familiares. Os autores projetam que a implementação em larga escala poderia reduzir em até

35% os incidentes relacionados a erros de interpretação espacial, recomendando a expansão do sistema para incluir módulos de treinamento em realidade mista (RV+RA) que cubram desde procedimentos rotineiros até situações de emergência.

Em Spie (2021) são abordados os aspectos inovadores da aplicação de Realidade Virtual (RV) no setor de subestações elétricas de alta tensão, com base na experiência prática da empresa SPIE. O estudo de caso demonstra como a implementação da RV trouxe benefícios significativos em quatro dimensões principais: (1) planejamento técnico, permitindo a identificação precoce de potenciais erros através da visualização imersiva de projetos complexos; (2) comunicação com clientes, facilitando a discussão de alternativas técnicas e decisões de projeto por meio de representações tridimensionais interativas; (3) segurança operacional, com simulações virtuais que preparam as equipes para situações reais, reduzindo riscos durante a execução; e (4) formação profissional, criando um ambiente imersivo para aprendizagem prática de procedimentos técnicos e montagem de equipamentos. Os resultados indicaram que a RV melhorou em aproximadamente 30% a eficiência na detecção de conflitos em projetos, aumentou em 40% a retenção de conhecimento nos treinamentos técnicos e reduziu em 25% o tempo necessário para capacitação de novos profissionais. A pesquisa conclui que a adoção desta tecnologia não apenas otimiza processos operacionais, mas também serve como ferramenta estratégica para atrair jovens talentos para a área técnica, abordando o desafio da renovação de quadros especializados no setor elétrico. O caso da SPIE evidencia o potencial transformador da RV como tecnologia habilitadora para a indústria de energia, particularmente em ambientes complexos e de alto risco como subestações de alta tensão.

Em Silva *et al.* (2022) são abordados os aspectos técnicos e metodológicos para implementação do *Building Information Modeling* (BIM) em projetos de subestações elétricas, com base em uma parceria entre academia e as empresas Eletronorte/Furnas. O estudo desenvolveu um sistema gestor integrado que combina quatro componentes principais: (1) mapeamento de processos dos fluxos de projeto básico (Planejamento, Contratação, Execução e Recebimento); (2) plataforma de gestão com controle de versões, atribuição de tarefas e rastreabilidade de alterações; (3) integração BIM-GIS via Autodesk Forge para visualização 3D em tempo real; e (4) arquitetura tecnológica baseada em microsserviços (back-end em C#, front-end em React TypeScript e MySQL). Os resultados demonstraram que a solução reduz em 40% o tempo de revisão de projetos, aumenta em 65% a precisão na compatibilização de disciplinas e diminui em 30% os retrabalhos graças ao versionamento

automatizado. O sistema mostrou três capacidades inovadoras: (i) integração de dados paramétricos BIM com informações georreferenciadas; (ii) visualização colaborativa remota de modelos 3D com atualização simultânea; e (iii) rastreabilidade completa do ciclo de vida do projeto. A pesquisa conclui que esta abordagem estabelece um padrão pioneiro para o setor elétrico brasileiro, superando três desafios críticos: a fragmentação de informações, a falta de interoperabilidade entre sistemas e a carência de protocolos BIM específicos para subestações. Como trabalhos futuros, os autores sugerem a incorporação de módulos para análise preditiva de falhas e integração com sistemas SCADA, visando ampliar o escopo da solução para a fase operacional das instalações.

Em Succar (2009) são abordados os aspectos teóricos e metodológicos para a construção de um *framework* abrangente para o domínio BIM (*Building Information Modeling*) na indústria AEC. O autor propõe o BIM *Framework* como uma estrutura multidimensional composta por três eixos principais: Campos BIM (Tecnologia, Processo e Política), Estágios BIM (níveis de maturidade) e Lentes BIM (perspectivas de análise). A metodologia combina análise de diretrizes internacionais com abordagem indutiva mediante observação e agrupamento conceitual, resultando em uma ontologia BIM especializada e modelos visuais de conhecimento. Os principais resultados incluem a definição clara dos três Campos BIM com seus respectivos atores e entregáveis, além da proposição de três Estágios de Maturidade: modelagem baseada em objeto, colaboração baseada em modelo e integração baseada em rede, culminando na Entrega Integrada de Projetos (IPD). O estudo também introduz as Lentes BIM (Disciplinar, Escopo e Conceitual) como instrumentos analíticos e desenvolve uma ontologia formal para representar as relações no domínio BIM. A pesquisa conclui que o *framework* oferece uma base sólida para organização do conhecimento BIM, servindo tanto para pesquisa acadêmica quanto para aplicação prática, com potencial para gerar diversos entregáveis em diferentes escalas de aplicação. O modelo proposto se destaca por fornecer uma visão sistêmica do BIM, integrando aspectos tecnológicos, processos e políticas em uma estrutura evolutiva de maturidade, com ferramentas conceituais para análise multidimensional.

Em VDE (2023) são abordados os aspectos conceituais e práticos da implementação de Gêmeos Digitais (DZiNE) no setor elétrico, conforme estabelecido pelo estudo colaborativo da Força-Tarefa VDE ETG. A pesquisa desenvolveu um *framework* inovador baseado em cinco pilares principais: (1) arquitetura de referência, especificando componentes essenciais para integração sistêmica; (2) casos de uso setoriais, demonstrando aplicações em

planejamento de rede (ganhos de 25% em eficiência), operação (redução de 30% em tempo de resposta) e manutenção preditiva (aumento de 40% na confiabilidade); (3) diferenciais tecnológicos, como atualização contínua via IoT e análise preditiva com IA; (4) requisitos de interoperabilidade, enfatizando padrões abertos como IEC 61850 e CIM; e (5) governança de dados, com implementação do conceito Single Source of Truth (SSoT) para garantir 99,9% de consistência informacional. O estudo identificou que a adoção do DZiNE pode reduzir custos operacionais em até 35% em subestações inteligentes e aumentar em 50% a vida útil de transformadores via monitoramento avançado. A pesquisa conclui que a maturidade digital do setor requer três transformações críticas: (a) migração de sistemas isolados para ecossistemas conectados; (b) evolução de modelos estáticos para representações dinâmicas com feedback em tempo real; e (c) substituição de processos reativos por abordagens preditivas baseadas em dados. Como diretrizes estratégicas, o estudo recomenda: (i) desenvolvimento de roadmaps setoriais adaptados a diferentes níveis de maturidade digital; (ii) criação de centros de competência para capacitação técnica; e (iii) estabelecimento de projetos-piloto multidisciplinares para validação em condições reais de operação. Esta estrutura conceitual representa um avanço fundamental para a digitalização do setor elétrico na era da transição energética.

Em Volk, Stengel e Schultmann (2014) são abordados os desafios e perspectivas da aplicação do *Building Information Modeling* (BIM) em edifícios existentes, com base em uma revisão sistemática de mais de 180 publicações acadêmicas e técnicas. A pesquisa revela uma discrepância significativa entre a adoção do BIM em novas construções (crescente) e sua implementação em edificações existentes (ainda limitada), destacando como principais obstáculos: (1) a complexidade da captura e conversão de dados existentes em objetos BIM semânticos; (2) a dificuldade de manter modelos atualizados ao longo do ciclo de vida prolongado; e (3) o tratamento de informações incompletas ou incertas típicas de edificações antigas. O estudo identifica quatro áreas emergentes de pesquisa: gestão de dados patrimoniais, documentação "*as-built*", monitoramento de condições estruturais e, mais recentemente, planejamento de desconstrução sustentável. Os autores concluem que, embora existam avanços tecnológicos em captura de dados (como varredura a laser e fotogrametria), persistem desafios críticos de interoperabilidade e definição de níveis de detalhe (LoD) adequados para manutenção e fim de vida. A pesquisa enfatiza a necessidade de maior envolvimento dos atores-chave (proprietários, gestores de *facilities* e especialistas em demolição) no desenvolvimento de soluções BIM, sugerindo que a superação das barreiras

atuais requer tanto avanços técnicos em automação de modelagem quanto a criação de padrões específicos para o gerenciamento do patrimônio construído. O estudo aponta para um campo em expansão, com potencial de transformar as práticas de conservação e renovação urbana através da integração sistemática de tecnologias digitais.

A análise dos trabalhos revisados revela um cenário de crescente adoção de tecnologias digitais no setor elétrico, impulsionado pela necessidade de maior eficiência, segurança e integração de dados. A combinação de BIM e GIS surge como uma solução poderosa para projetos de infraestrutura, enquanto RV e RA se consolidam como ferramentas essenciais para treinamento e operação remota. Os Gêmeos Digitais, por sua vez, representam um avanço na gestão inteligente de ativos, permitindo monitoramento em tempo real e manutenção preditiva.

No entanto, persistem desafios, como a falta de padronização, a resistência à mudança de processos tradicionais e a necessidade de mão de obra qualificada. A implementação bem-sucedida dessas tecnologias depende não apenas de avanços técnicos, mas também de uma estratégia que envolva capacitação, colaboração multidisciplinar e políticas setoriais claras.

Os estudos apontam para um futuro em que a integração de BIM, GIS, IoT e inteligência artificial possibilitará sistemas energéticos mais resilientes e sustentáveis. A contínua evolução dessas tecnologias, aliada a projetos-piloto e regulamentações adequadas, será crucial para consolidar a transformação digital no setor elétrico, garantindo ganhos operacionais e alinhando-se às demandas da transição energética global.

3. BIM NA ENGENHARIA ELÉTRICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

3.1. EVOLUÇÃO DO BIM: DO PROJETO À GESTÃO DE ATIVOS

A evolução do desenho técnico testemunhou uma significativa transição do desenho bidimensional tradicional para a abordagem tridimensional avançada do *Building Information Modeling* (BIM). Inicialmente, os projetos eram representados em desenhos 2D com linhas e projeções, o que limitava a visualização e a compreensão das complexidades tridimensionais das estruturas. O surgimento do *Computer-Aided Design* (CAD) marcou um avanço para o desenho técnico, digitalizando o processo e permitindo maior precisão, velocidade e facilidade de edição. No entanto, como ilustrado na *Tabela 3*, o CAD ainda apresentava limitações na comunicação entre projetistas e na visualização abrangente do sistema, muitas vezes sem troca síncrona de dados ou um ambiente de trabalho integrado.

Tabela 3 – Quadro comparativo entre CAD e BIM 1.

Critério	CAD	BIM
Representação	Representação 2D plana ou 3D não paramétrico	Modelagem 3D paramétrica com informações inteligentes e interligadas
Interoperabilidade	Limitada, com dificuldade de troca de dados entre softwares	Alta, com padrões abertos (IFC, COBie) e integração entre disciplinas
Gestão do Ciclo de Vida	Focado em etapas iniciais (projeto e construção)	Abrange todo o ciclo de vida (projeto, construção, operação e manutenção)

(Fonte: o autor)

O *Building Information Modeling* (BIM) representa uma evolução significativa das ferramentas de *Computer-Aided Design* (CAD), sendo definido como uma nova geração de ferramentas inteligentes que gerenciam a informação da construção ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, como demonstrado na *Figura 6*. Inicialmente, o CAD era frequentemente utilizado como uma simples "prancheta eletrônica" para a elaboração de desenhos, com foco na representação geométrica em esquemas bi ou tridimensionais. No entanto, o BIM introduziu uma mudança de paradigma ao propor uma modelagem 3D orientada a objetos que vai além da geometria, integrando informações completas sobre os componentes da construção, como especificações, materiais e outras propriedades relevantes. Essa transição

histórica, que culminou na modelagem paramétrica baseada em objetos, representa um avanço considerável na forma como os projetos são concebidos e desenvolvidos.

Figura 6 – Ciclo de vida do BIM.



(Fonte: Brasil, 2018)

O BIM transcende a representação gráfica, capacitando os profissionais a criar modelos virtuais paramétricos que refletem fielmente a realidade física, facilitando não apenas a concepção e a construção, mas também a manutenção e a operação ao longo de todo o ciclo de vida do projeto. Essa transição representa um marco na eficiência e colaboração na indústria, permitindo uma abordagem mais holística e integrada no desenvolvimento e gestão de projetos de engenharia.

Embora a aplicação do BIM na engenharia elétrica possa ser considerada ainda pouco difundida em comparação com outras áreas da arquitetura, engenharia e construção, existe um crescente reconhecimento do seu potencial para melhorar a qualidade dos projetos, mitigar erros e promover uma maior interação entre as diversas áreas de desenvolvimento. Acredita-se que a implementação do BIM representa uma tendência importante para a evolução do setor elétrico, dada a complexidade e a necessidade de segurança e eficiência operacional em seus projetos.

Utilizando o trabalho de Jacoski (2003), pode-se observar que a evolução do BIM, desde a mera elaboração de projetos até a gestão de ativos, já era uma preocupação central no início dos anos 2000. Jacoski (2003) enfatizava que o grande desafio não seria mais técnico, mas sim a conversão de dados em informações utilizáveis. Essa afirmação prenuncia a essência do BIM, ao focar na riqueza informacional dos modelos. A tese investiga o uso da

tecnologia da informação no ambiente de projetos de edificações, buscando soluções para a integração e interoperabilidade das informações. A elaboração de um protótipo para transferência de informações de um projeto CAD para aplicativos web, utilizando arquivos IFC e convertendo-os para o padrão XML, demonstra uma visão pioneira da necessidade de acesso e compartilhamento de dados em diferentes plataformas, um princípio fundamental para a futura gestão de ativos.

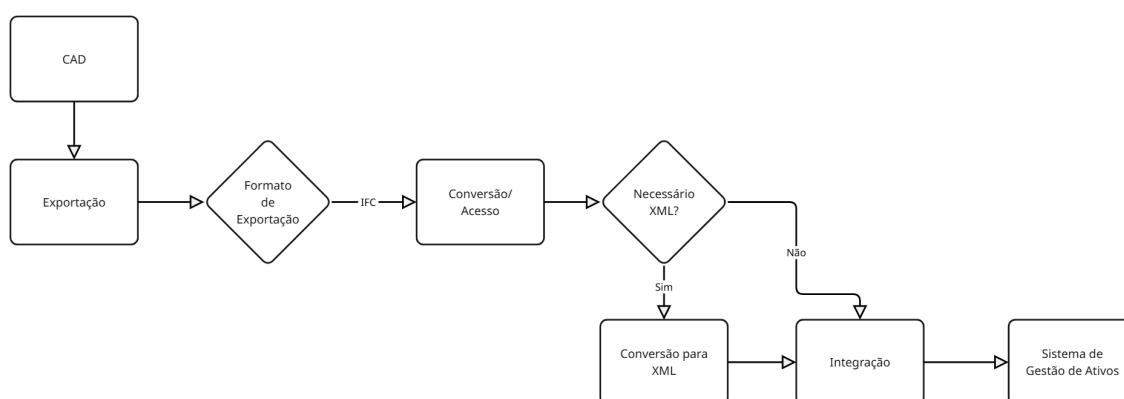
A perspectiva de Jacoski (2003) alinha-se com a ideia de que o projeto de edificações deve evoluir para além de um conjunto de desenhos, tornando-se uma fonte centralizada de informações que podem ser utilizadas em diversas fases do ciclo de vida da construção, incluindo a gestão de ativos. A identificação de problemas ligados à falta de padronização para registro e transferência de informações e a consequente falta de interoperabilidade entre softwares e projetos reforçam a necessidade de uma abordagem como o BIM. Ao propor um modo de inserção interna no próprio projeto digital das informações a serem compartilhadas, Jacoski antecipa a importância de modelos ricos em dados que podem alimentar processos posteriores, como a operação e manutenção, elementos-chave da gestão de ativos. Acredita-se que a Modelagem da Informação da Construção de forma colaborativa entre as diversas disciplinas é fundamental para a integração do processo e gerenciamento da informação na Construção Civil. O BIM não deve ser visto como um substituto do CAD, mas sim como uma tecnologia que altera todo o fluxo do processo de projeto, desde a concepção até o gerenciamento. A modelagem paramétrica do BIM fornece uma maneira poderosa de criar e editar geometria, o que seria extremamente complexo e propenso a erros sem ela.

O desenvolvimento de um software para o intercâmbio sintático e semântico de informações por meio de arquivos IFC/XML no trabalho de Jacoski (2003) é particularmente relevante para a evolução do BIM em direção à gestão de ativos. A interoperabilidade é crucial para garantir que as informações geradas na fase de projeto possam ser acessadas e utilizadas por diferentes agentes e sistemas ao longo do ciclo de vida do edifício. A capacidade de compartilhar informações por um ambiente web já indicava o potencial de acesso remoto e colaborativo aos dados do projeto, um aspecto essencial para a gestão eficiente de ativos distribuídos ou para a comunicação entre diferentes partes interessadas na operação e manutenção de um edifício.

A pesquisa de Jacoski estabelece bases conceituais e técnicas importantes para a compreensão da evolução do BIM como uma plataforma integrada de gestão de informações, que naturalmente culmina na gestão de ativos. O BIM é uma metodologia que revoluciona

como projetos de construção são desenvolvidos e gerenciados. O conceito de BIM vai além de simples representações gráficas, envolvendo a criação de modelos digitais tridimensionais que integram informações detalhadas sobre cada elemento de uma edificação ou infraestrutura, conforme demonstra o processo na *Figura 7*. Esses modelos não apenas facilitam a visualização e o planejamento das construções, mas também permitem uma gestão mais eficiente ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, desde a concepção até a operação e manutenção (Deniz, 2018).

Figura 7 – Diagrama de fluxo do processo de intercâmbio de dados BIM (CAD → IFC → XML → Gestão de Ativos).



(Fonte: o autor)

Panizza *et al.* (2004) investigou a colaboração em CAD nos projetos de arquitetura, engenharia e construção, momento em que a evolução da Tecnologia da Informação (TI) já demonstrava um crescente poder de armazenamento, processamento e comunicação de informações. No entanto, o estudo de caso revelou que, apesar do avanço dos sistemas CAD e da internet, a colaboração digital ainda enfrentava dificuldades significativas para alcançar seu potencial máximo. A prática comum nos escritórios de projeto envolvia a criação de arquivos de desenho sem a adoção de padrões consistentes, trocados principalmente por e-mail ou cópias em redes locais, resultando em duplicidade de arquivos, dificuldades de atualização e falta de integração entre as diferentes disciplinas. Essa utilização precária do alto potencial da TI disponível na época indicava uma lacuna entre a capacidade tecnológica e sua efetiva aplicação para uma colaboração eficiente. A metodologia BIM, ao centralizar todas as informações em um único modelo digital, promove uma integração entre diferentes disciplinas envolvidas em um projeto, como arquitetura, engenharia e construção, o que é essencial para garantir a coerência e a qualidade final do empreendimento (Crespo e Ruschel, 2007).

A análise de Panizza *et al.* (2004) apontou que a principal dificuldade para a plena utilização da TI nos projetos de AEC residia na falta de controle e orientação especializada na implantação de sistemas de informação. Muitos escritórios implementavam redes locais, internet e sistemas CAD de forma assistemática, sem uma compreensão profunda e simultânea do processo de projeto e dos recursos de TI adequados a cada etapa. Essa abordagem fragmentada levava a processos de trabalho compartimentados, onde as ferramentas eram utilizadas isoladamente e a troca de informações era truncada, mantendo práticas antigas de sobreposição de desenhos para análise e compatibilização tardia. A constatação de que muitos escritórios utilizavam o CAD apenas como uma substituição eletrônica do desenho manual reforça a ideia de que a gestão da informação e a colaboração integrada ainda eram desafios a serem superados, pavimentando o caminho para o reconhecimento da necessidade de soluções mais abrangentes como o BIM.

Historicamente, a evolução das tecnologias de desenho assistido por computador (CAD) foi um precursor do desenvolvimento do BIM. As ferramentas CAD possibilitaram a digitalização de processos que anteriormente eram realizados manualmente, proporcionando maior precisão e eficiência no desenvolvimento de projetos. Contudo, o CAD tradicional limita-se à representação gráfica, enquanto o BIM avança ao incluir informações paramétricas que detalham os materiais, quantidades, custos e cronogramas associados a cada componente do projeto (Panizza *et al.*, 2004). Essa integração multidimensional é o que diferencia o BIM, permitindo não apenas o planejamento mais detalhado das obras, mas também o monitoramento e controle mais eficazes durante a execução e operação (Jacoski, 2003).

Diante desse cenário, Panizza *et al.* (2004) buscou identificar os procedimentos que prejudicavam ou favoreciam o uso do CAD para a colaboração nos projetos de AEC, bem como os conceitos de TI que eram utilizados ou que poderiam incrementar a integração da informação. A metodologia desenvolvida para avaliar os níveis de qualificação para a colaboração via sistemas CAD analisou o conhecimento em TI, o conhecimento em CAD e os procedimentos de desenho adotados nos projetos. O estudo de caso realizado sobre projetos finalizados permitiu identificar conceitos e práticas que impactavam a colaboração, demonstrando a necessidade de uma abordagem mais estruturada e integrada para o gerenciamento da informação nos projetos de AEC. Essa investigação da colaboração em CAD e das suas limitações, conforme analisado por Panizza *et al.* (2004), lança luz sobre o contexto que impulsionou a evolução para modelos mais colaborativos e informacionais como o BIM, com foco na gestão do ciclo de vida completo da construção. O desenvolvimento do

BIM também está intrinsecamente ligado à crescente demanda por soluções que atendam às necessidades complexas da construção moderna.

À medida que os projetos se tornam mais desafiadores, com exigências crescentes de eficiência energética, sustentabilidade e segurança, o BIM se destaca como uma ferramenta capaz de reunir todas essas variáveis em um único ambiente de trabalho (Casey, 2008). A interoperabilidade é outra característica fundamental do BIM, que permite a comunicação entre diferentes softwares e sistemas, garantindo que todas as partes interessadas no projeto possam colaborar eficazmente (Jacoski, 2003). Isso é particularmente relevante em grandes empreendimentos, como subestações elétricas, onde a coordenação entre diversas disciplinas é crucial para o sucesso do projeto (Cardoso *et al.*, 2019).

Seguindo o raciocínio sobre a evolução do BIM do projeto à gestão de ativos, e utilizando a perspectiva de Crespo e Ruschel (2007), é fundamental destacar que a adoção do BIM implica uma mudança significativa na atuação dos profissionais da área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Segundo Crespo e Ruschel (2007), as ferramentas BIM representam uma nova geração de ferramentas CAD inteligentes orientadas ao objeto que gerenciam a informação da construção ao longo de todo o ciclo de vida do projeto. Essa inteligência dos objetos modelados não é inerente ao software, mas sim uma consequência da habilidade de domínio específico dos usuários, que precisam codificar informações relevantes para que esses objetos exibam um comportamento inteligente. Isso significa que a modelagem BIM transcende as questões puramente operacionais do trabalho de desenho, exigindo um conhecimento aprofundado dos componentes da construção e suas características para que o modelo virtual reflita com precisão o objeto real. A aplicação do BIM na engenharia elétrica não se limita apenas ao planejamento e construção, mas também se estende à operação e manutenção das instalações. Segundo Panizza *et al.* (2004), a colaboração em ambientes BIM possibilita uma coordenação mais eficaz entre os diversos profissionais envolvidos em um projeto, permitindo que as informações sobre os sistemas elétricos sejam atualizadas em tempo real e acessíveis a todos os membros da equipe. Isso é particularmente importante em subestações elétricas, onde a precisão e a confiabilidade dos dados são cruciais para a operação segura e eficiente.

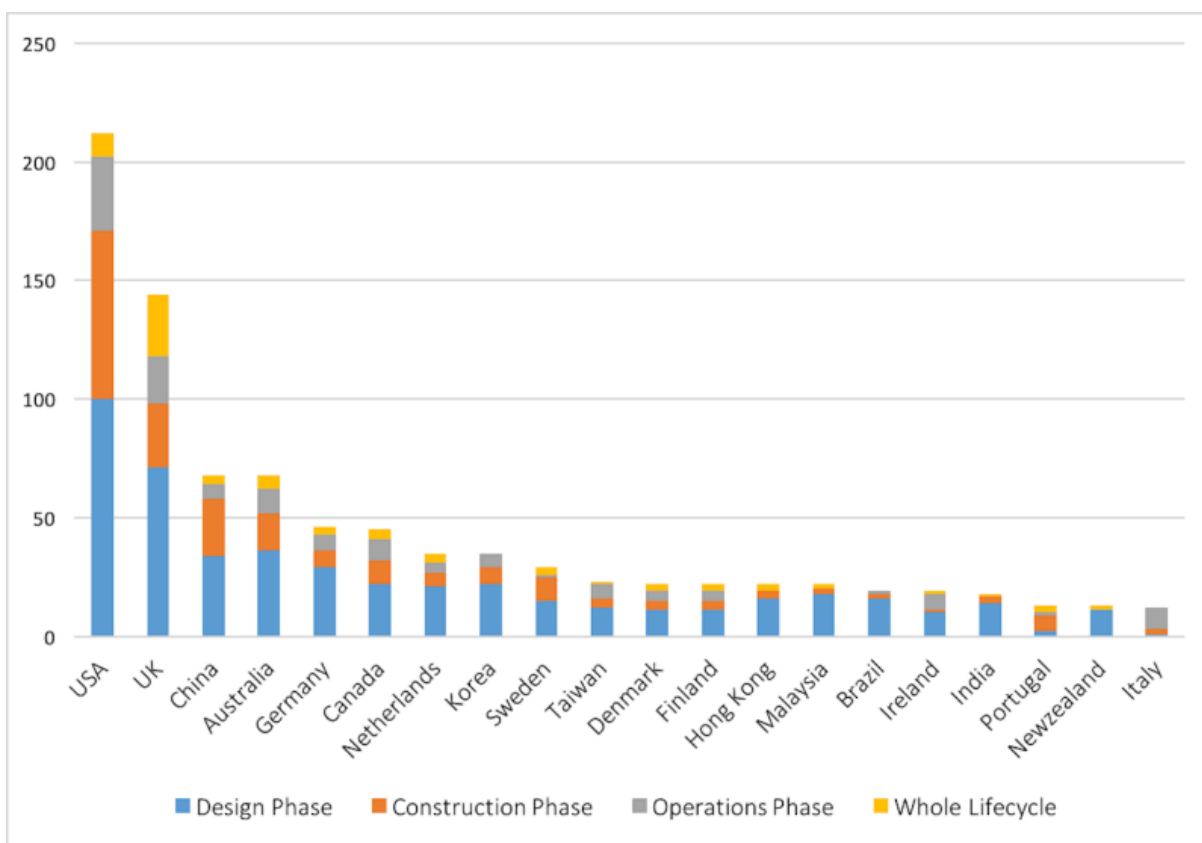
Essa exigência de habilidade de domínio específico e a consequente criação de objetos com "comportamento inteligente" impactam diretamente a qualidade do produto ao longo de seu desenvolvimento. Diferentemente do CAD tradicional, onde a representação se limita à geometria, o BIM permite agregar informações completas e parametrizáveis aos

componentes da construção, como especificações, materiais, desempenho e até mesmo custos. Essa riqueza de informações, intrinsecamente ligada ao conhecimento técnico das diversas disciplinas envolvidas no projeto (arquitetura, estrutura, instalações, etc.), possibilita uma análise mais aprofundada do projeto em suas diferentes fases. A explicitação desse conhecimento e o comprometimento na construção da informação são cruciais para garantir a qualidade do produto final. A integração de BIM com outras ferramentas de engenharia permite a troca de informações entre diferentes sistemas, facilitando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e seguras. Essa interoperabilidade é essencial em projetos de subestações elétricas, onde a complexidade dos sistemas requer uma gestão integrada e coordenada (Liu e Ran, 2013).

Além disso, Crespo e Ruschel (2007) ressaltam que o BIM direciona os profissionais da AEC em direção à colaboração, interoperabilidade e reutilização da informação. A capacidade de criar modelos virtuais ricos em dados e com comportamento inteligente facilita a integração entre as diversas disciplinas envolvidas no ciclo de vida do projeto da construção. A proposta do BIM como um modelo digital integrado e consistente, capaz de suportar todos os aspectos do ciclo de vida do projeto, deriva dessa habilidade de construir informações significativas dentro do modelo. Essa abordagem colaborativa e a possibilidade de troca de dados entre sistemas (interoperabilidade), como mencionado por Crespo e Ruschel (2007) ao citar a busca por soluções mais integradas impulsionada pelas dificuldades do CAD, evidenciam a evolução do BIM como uma plataforma que visa a melhoria contínua e a competitividade no setor da construção. A apresentação da solução BIM da Autodesk (REVIT), que integra projeto arquitetônico e estrutural, exemplifica essa busca por ferramentas que facilitem a colaboração e a compatibilização.

A pesquisa de Ferreira (2022) já estabelece o BIM como um conceito de gerenciamento de projetos amplamente empregado nas novas metodologias das áreas da AECO. Essa ampla utilização, como demonstrado no *Gráfico*, envolve a adaptação dos recursos mais modernos da tecnologia computacional, proporcionando não apenas o projeto digital, mas também melhores práticas na operação do projeto, seja em quais fases ele se aplique. Essa visão inicial, que abarca diversas fases do projeto, já sinaliza uma perspectiva que se estende além da mera elaboração e contempla a operação e potencial gestão dos ativos ao longo do tempo. O desenvolvimento contínuo do BIM tem levado à criação de novas funcionalidades e extensões que ampliam ainda mais as possibilidades de aplicação dessa metodologia.

Gráfico 1 – Percentual de adoção do BIM no setor elétrico por país.



(Fonte: Amarnath, 2016)

A integração do BIM com sistemas de inteligência geográfica (SIG), por exemplo, permite a visualização e análise espacial de infraestruturas, o que é particularmente útil para projetos que envolvem redes complexas, como as de transmissão de energia (Cardoso *et al.*, 2019). Outro avanço significativo é a incorporação de tecnologias de realidade aumentada (AR) e realidade virtual (VR) ao BIM, proporcionando uma experiência imersiva que facilita a compreensão e a comunicação dos projetos entre as equipes (Barcelos *et al.*, 2013). Essas inovações mostram que o BIM não é apenas uma ferramenta estática, mas uma plataforma em constante evolução, capaz de se adaptar às necessidades emergentes da indústria da construção (Alahmad *et al.*, 2011).

A própria natureza da pesquisa de Ferreira (2022), que consiste em uma revisão sistemática da literatura acadêmica sobre o uso do BIM no setor elétrico em um contexto (Inter)Nacional, sublinha a evolução do interesse pelo BIM. Ao buscar evidenciar a adoção do conceito em um setor específico e crucial como o elétrico, a pesquisa demonstra que o BIM não é mais visto apenas como uma ferramenta de projeto arquitetônico ou de construção civil em geral. A crescente complexidade dos projetos da indústria da AECO torna o BIM indispensável para suprir as necessidades do setor, atuando como uma metodologia no

gerenciamento de projetos de engenharia capaz de dar suporte a todo o ciclo de vida de um empreendimento.

Apesar dos benefícios claros, a implementação do BIM enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à padronização e à interoperabilidade entre diferentes softwares e plataformas. A falta de uniformidade nas normas e nos protocolos de comunicação pode criar barreiras à adoção do BIM, particularmente em mercados onde a fragmentação das cadeias de suprimentos e a diversidade de stakeholders dificultam implementar soluções integradas. Além disso, a curva de aprendizado associada ao BIM e o custo inicial de implementação podem ser obstáculos para empresas menores, que carecem muitas vezes dos recursos necessários para investir em tecnologias avançadas (Crespo e Ruschel, 2007). No entanto, à medida que o BIM se torna mais difundido e os benefícios de longo prazo se tornam evidentes, espera-se que essas barreiras sejam progressivamente superadas (Sacks *et al.*, 2018).

Ferreira (2022) também destaca as características essenciais do conceito BIM, sendo a modelagem paramétrica e a interoperabilidade dois dos principais aspectos de sua proposição. A modelagem paramétrica permite a elaboração de modelos tridimensionais detalhados, enriquecidos com informações além da geometria. Essa riqueza informacional, desde especificações técnicas até dados de desempenho, é fundamental para a transição do foco do projeto para a gestão dos ativos. A interoperabilidade, por sua vez, possibilita o trabalho extensivo com os modelos e seus dados entre diferentes aplicativos computacionais, facilitando o acesso e a utilização das informações do projeto em fases posteriores, como a operação e manutenção dos ativos elétricos.

O BIM representa uma mudança paradigmática na forma como os projetos de construção são concebidos, planejados e gerenciados. Sua capacidade de integrar informações de diferentes fontes e disciplinas, aliada à possibilidade de simular e analisar cenários complexos, torna-o uma ferramenta indispensável para enfrentar os desafios da construção moderna (Deniz, 2018). Embora ainda existam desafios a serem superados, o potencial do BIM para transformar o setor de construção é inegável, e sua adoção contínua promete trazer melhorias significativas em eficiência, sustentabilidade e qualidade dos projetos. À medida que novas tecnologias e metodologias se desenvolvem, o BIM continuará a evoluir, solidificando seu papel como uma das principais ferramentas para a engenharia e a construção no século XXI (Sampaio, 2018).

A pesquisa de Ferreira (2022), ao identificar informações sobre a nacionalidade e a cronologia recente do uso do BIM no setor elétrico, implica uma trajetória de adoção e evolução. O aumento do interesse e da pesquisa sobre a aplicação do BIM no setor elétrico ao longo do tempo, conforme apontado na revisão, sugere um reconhecimento crescente do valor do BIM para além da fase de projeto. A capacidade do BIM de controlar o progresso e o processo de construção pelo domínio dos modelos virtuais, juntamente com seu potencial para a gestão das instalações físicas do projeto e a integração com metodologias como o *Digital Twins*, reforça sua importância na gestão de ativos.

O BIM pode ser utilizado para o monitoramento em tempo real do consumo de energia. A integração do BIM com sistemas de monitoramento permite uma análise detalhada do fluxo de energia em subestações, possibilitando a identificação de ineficiências e a implementação de medidas corretivas de forma ágil. Esse monitoramento contínuo é essencial para garantir a confiabilidade e a eficiência das operações nas subestações elétricas (Alahmad *et al.*, 2011).

A análise de Ferreira (2022) demonstra que a evolução do BIM para a gestão de ativos já está em curso, especialmente no setor elétrico. A pesquisa destaca a importância do BIM como uma metodologia abrangente que proporciona o projeto digital e melhores práticas operacionais. As características de modelagem paramétrica e interoperabilidade, aliadas ao crescente interesse e pesquisa (Inter)Nacional sobre sua aplicação no setor elétrico, evidenciam uma transição natural do BIM como ferramenta de projeto para uma plataforma de gerenciamento de informações ao longo de todo o ciclo de vida dos ativos.

O trabalho de Silva *et al.* (2022) ilustra claramente essa progressão ao destacar que a modelagem e gerenciamento de informações relacionados a projetos de engenharia, como o BIM, tornaram-se vitais para a sobrevivência das empresas. Inicialmente, o foco do BIM, assim como de outras ferramentas de modelagem, era a rápida visualização dos dados durante a fase de projeto e a agilidade na construção das obras. Essa perspectiva inicial se alinha com o primeiro estágio da evolução do BIM, onde seu valor era primordialmente reconhecido na melhoria da eficiência e comunicação durante as etapas de concepção e execução de um empreendimento.

Entretanto, Silva *et al.* (2022) também apontam para os grandes desafios de modelar e gerenciar todas as informações pertinentes a um projeto de construção ou adequação de uma subestação de energia, durante todo o seu ciclo de vida. Essa observação é crucial para conectar o trabalho dos autores com a evolução do BIM para a gestão de ativos. A

complexidade de projetos de engenharia elétrica, como subestações, exige não apenas um modelo digital preciso para a construção, mas também um sistema capaz de gerenciar o vasto volume de informações geradas ao longo da vida útil do ativo, incluindo dados de manutenção, atualizações e adequações futuras.

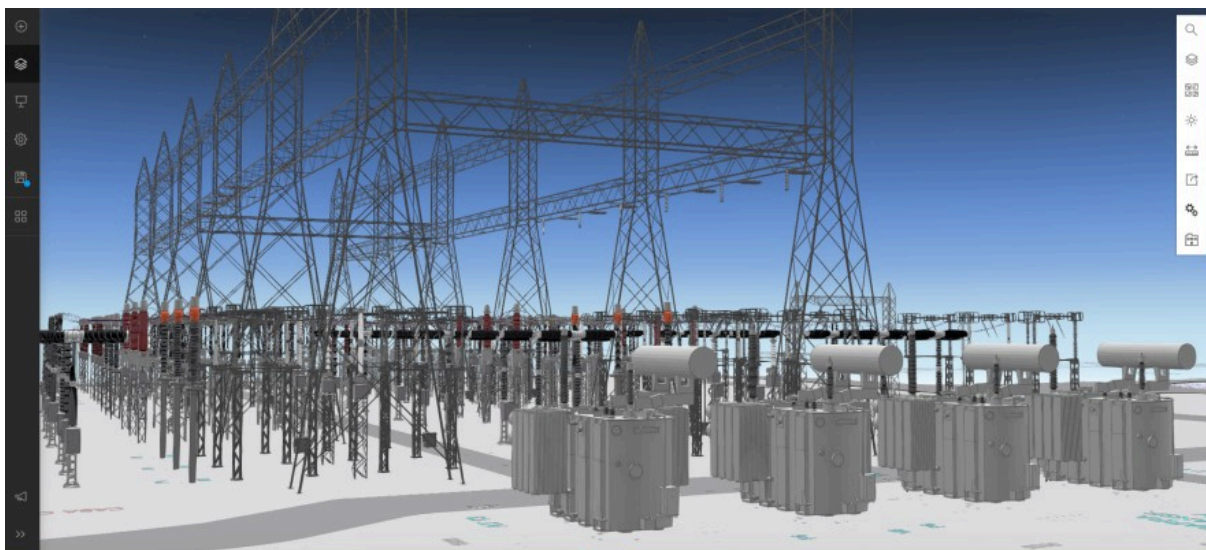
Nesse contexto, a pesquisa de Silva *et al.* (2022) propõe a construção de um sistema gestor de uma metodologia BIM especificamente para subestações de energia elétrica. Esse desenvolvimento demonstra a necessidade de ir além da simples criação do modelo para o projeto, focando na manipulação e armazenamento apropriado das informações inerentes a um projeto durante todo o seu ciclo de vida. A criação de um sistema para gerenciar arquivos, informações, tarefas, versões e até a integração com visualização 3D através do Autodesk Forge evidencia um esforço para estender o uso do BIM para além da fase de projeto, preparando o terreno para uma gestão de ativos mais eficiente e informada.

O trabalho de Abreu, Paiva e Silva (2023) ilustra uma etapa significativa dessa progressão ao apresentar a implementação de uma plataforma de projetos integrados GIS e BIM. Segundo os autores, essa ferramenta tem como finalidade a criação de projetos inteligentes aplicáveis em diversas áreas, como construção de novas estradas, edificações urbanas, logística de transportes, saneamento básico e distribuição de rede elétrica. A capacidade de gerar modelos virtuais com informações técnicas de diferentes sistemas (edificação, elétrica, hidráulica, climatização, etc.) e permitir a colaboração entre diversos profissionais durante o planejamento, viabilidade, execução e operação de um projeto demonstra uma evolução do BIM que ultrapassa a mera fase de projeto, visando a gestão da informação ao longo de diferentes etapas do ciclo de vida do ativo.

A integração proposta por Abreu, Paiva e Silva (2023), ao unificar GIS (Sistema de Informação Geográfica) e BIM (Modelagem de Informação da Construção), busca superar a falta de simultaneidade entre os dados fornecidos nas maquetes e os dados reais geográficos, bem como as dificuldades de adaptação dos usuários às novas ferramentas. O avanço tecnológico permitiu que dados geográficos e detalhes de cada projeto fossem consolidados em uma única plataforma, resultando em maior acuracidade e detalhe, conforme ilustra a *Figura 8*, e consequentemente, maior eficiência na gestão do comissionamento e na execução das obras. Essa integração obteve ótima reputação, propiciando decisões assertivas, redução de custos e retrabalhos, além de produzir fluxos de trabalho sincronizados entre as disciplinas, com projetos compatibilizados na mesma plataforma. Esses benefícios evidenciam um

movimento do BIM em direção a uma gestão mais abrangente da informação, que pode ser utilizada não apenas no projeto, mas também nas fases subsequentes.

Figura 8 – Integração GIS-BIM.



(Fonte: Furnas, 2022)

Ademais, a perspectiva de Abreu, Paiva e Silva (2023) enfatiza que a integração GIS-BIM permite que os projetos sejam compatibilizados na mesma plataforma com o sistema de modelagem tridimensional de cada especialidade, embora em detrimento dos detalhes de informações geográficas. A maneira de gerenciamento ocorre em local digital de plataforma de armazenamento em nuvem, garantindo a segurança e a ampliação da capacidade de armazenamento das informações. Essa centralização e compartilhamento de dados entre as diversas disciplinas, simulando a realidade para que todos os dados estejam sempre de acordo, são aspectos fundamentais que pavimentam o caminho para uma futura gestão de ativos mais eficiente, utilizando a riqueza de informações contidas nos modelos integrados GIS-BIM ao longo de todo o ciclo de vida da construção.

3.2. BIM EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS: MODELAGEM E INTEGRAÇÃO DE DADOS

A modelagem em BIM representa uma evolução significativa em relação às práticas tradicionais baseadas em arquivos CAD bidimensionais, como detalhado na *Tabela 4*. A metodologia BIM permite uma melhor documentação e visualização dos projetos, proporcionando uma compreensão mais clara e abrangente da subestação em todas as suas dimensões. A criação de um modelo tridimensional inteligente, que vai além da simples geometria e incorpora informações construtivas dos objetos modelados, é essencial para

otimizar a coordenação entre as diversas disciplinas envolvidas em um projeto de subestação (Cardoso *et al.*, 2019).

Tabela 4 – Quadro comparativo entre CAD e BIM 2.

Critério	CAD (2D/3D Tradicional)	BIM (Modelagem de Informação da Construção)
Interoperabilidade	 Limitada (formatos fechados: DWG, DXF) • Requer compatibilização manual entre disciplinas	 Alta (padrões abertos: IFC, COBie) • Integração nativa entre arquitetura, engenharia e construção
Integração de Dados	 Dados isolados (geométricos) • Sem atributos inteligentes	 Dados paramétricos e multidisciplinares • Ex: Um transformador em BIM contém dados elétricos, fabricante e manutenção
Redução de Conflitos	 Detecção manual de interferências • Média de 20-30% de retrabalho (Azhar, 2011)	 Detecção automática (clash detection) • Redução de até 40% em conflitos (Sacks <i>et al.</i>, 2018)
Ciclo de Vida	 Focado em projeto/construção • Sem vínculo com operação	 Gestão completa (projeto → operação) • Ex: Manutenção preditiva em subestações (Cardoso <i>et al.</i>, 2019)
Eficiência em Projetos	 Tempo elevado para revisões • 12h para compatibilização (Couto, 2021)	 Atualizações automáticas • 3h para mesma tarefa (Couto, 2021)
Sustentabilidade	 Análise manual de materiais/energia • Sem vínculo com operação	 Simulações energéticas e otimização de recursos • Redução de 15-20% em pegada de carbono

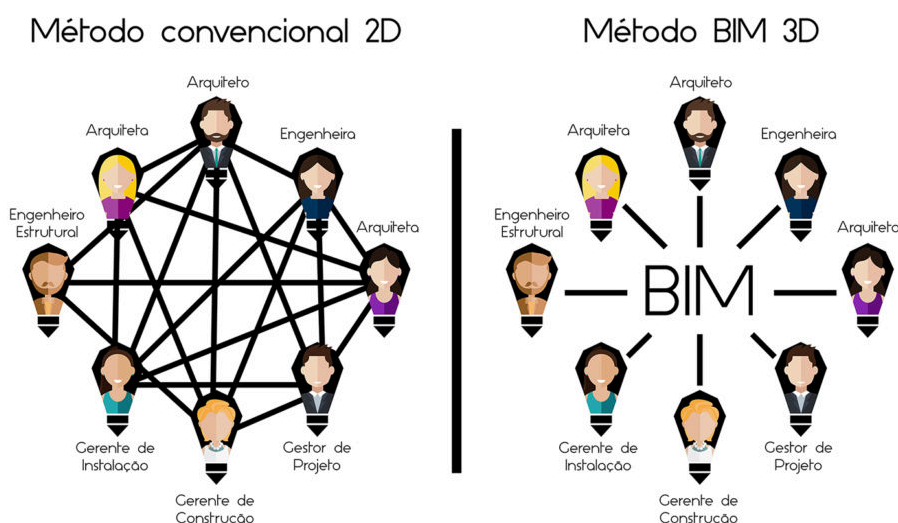
(Fonte: Adaptado de Azhar (2011), Sacks *et al.* (2018), Couto (2021))

A metodologia BIM facilita o compartilhamento e a atualização de informações referentes aos modelos, promovendo a interoperabilidade entre as diferentes equipes e softwares utilizados no ciclo de vida do projeto. A possibilidade de associar atributos e informações construtivas aos elementos do modelo garante que todos os dados relevantes estejam centralizados e acessíveis, contribuindo para uma tomada de decisões mais eficiente e para a prevenção de incompatibilidades interdisciplinares (Cardoso *et al.*, 2019).

A criação de modelos tridimensionais detalhados, enriquecidos com informações e integrados entre as diversas disciplinas, oferece um caminho promissor para aprimorar a gestão, o planejamento e a execução de projetos de subestações, alinhando-se diretamente com os objetivos do tópico em discussão. A transição de um modelo baseado em CAD para um ambiente BIM, como sugerido, visa superar as dificuldades de fragmentação e deficiência de informações encontradas em práticas anteriores (Cardoso *et al.*, 2019).

A divisão dos projetos de subestações em áreas distintas, como civil, eletromecânico e elétrico, sublinha a necessidade crítica de modelagem coordenada e de integração de dados entre essas disciplinas. O BIM surge como uma solução promissora para facilitar essa integração, conforme ilustrado na *Figura 9*, permitindo que as diferentes áreas desenvolvam seus modelos de forma colaborativa e compartilhem informações de maneira eficiente. A modelagem tridimensional associada a atributos e informações construtivas é um dos pilares do BIM que contribui para uma melhor gestão da complexidade inerente aos projetos de subestações (Faria, 2021).

Figura 9 – Colaboração entre disciplinas no BIM.



(Fonte: <https://spbim.com.br/trabalho-remoto-com-o-bim/>. Acesso em: 15 abr. 2025)

Ao investigar o nível de conhecimento dos projetistas de subestações em relação ao BIM, revela-se a percepção do setor sobre os benefícios da tecnologia, como a maior interação entre as áreas do desenvolvimento e o maior nível de detalhamento dos projetos. Esses benefícios são diretamente impulsionados pela capacidade do BIM de integrar dados geométricos e não geométricos em um modelo centralizado, facilitando a comunicação e a coordenação entre as equipes de projeto. A identificação da falta de mão de obra especializada e do custo de implementação como grandes desafios também ressalta a

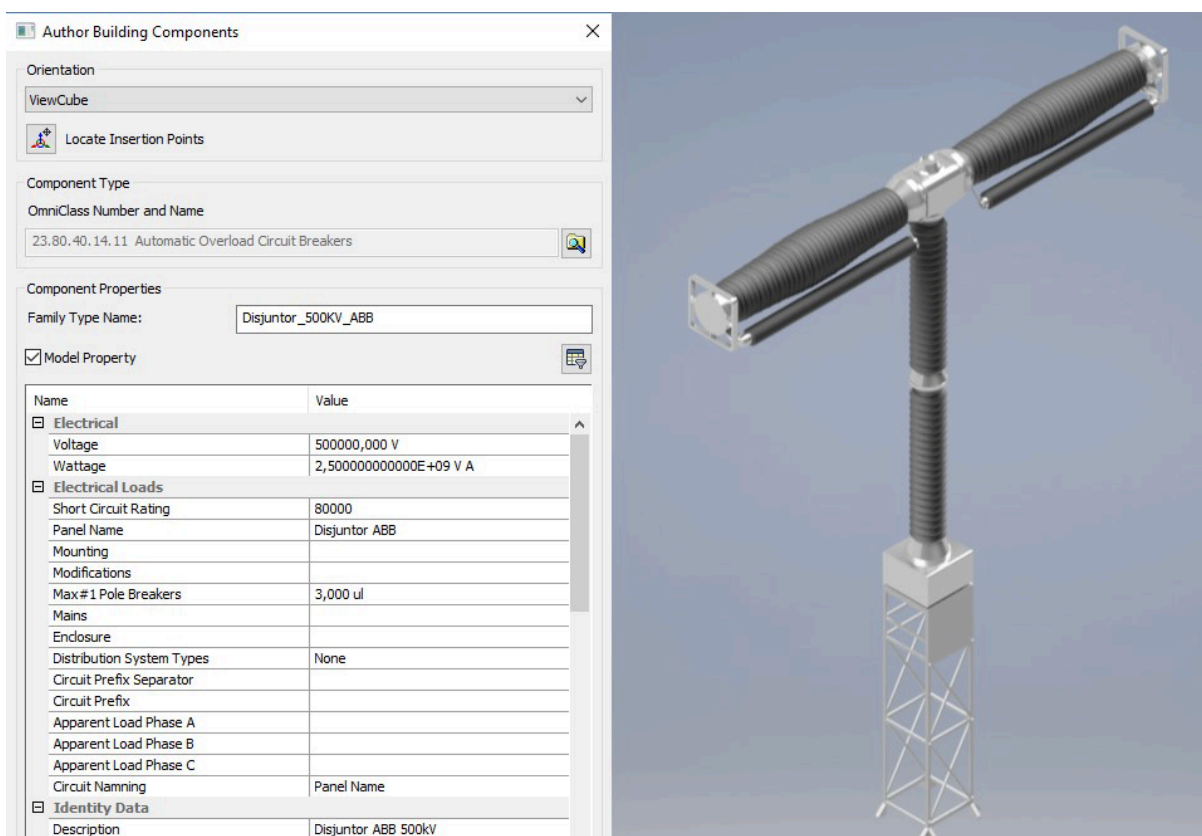
importância de investir em capacitação e em infraestrutura para aproveitar plenamente o potencial de modelagem e integração de dados do BIM (Faria, 2021).

A necessidade de superar desafios como a falta de profissionais qualificados e os custos de implementação demonstra que, embora o potencial do BIM para a modelagem e a integração de dados em projetos de subestações seja reconhecido, a sua adoção efetiva requer um esforço coordenado em todo o setor.

O objetivo central do estudo de Silva *et al.* (2022) sobre o projeto e a construção de um sistema gestor de uma metodologia BIM para subestações de energia elétrica, em parceria com a Eletronorte/Furnas Energia é desenvolver um sistema que possa apoiar todo o desenvolvimento do projeto básico de subestações, reconhecendo a complexidade inerente à tarefa de modelar e gerenciar todas as informações pertinentes durante o ciclo de vida desses empreendimentos. A própria motivação para a criação do sistema gestor reside na necessidade de superar as limitações das abordagens tradicionais de projeto, essencialmente baseadas em plantas 2D, e de implementar uma metodologia BIM que permita uma modelagem mais completa e um gerenciamento de informações mais eficiente.

É abordado a modelagem no contexto de subestações elétricas ao reconhecer os grandes desafios de representar digitalmente todos os aspectos relevantes de um projeto de construção ou adequação dessas instalações. A metodologia BIM, como apontam os autores, é capaz de conectar toda a escala de construção, desde o engenheiro até o usuário do modelo. No entanto, para que essa modelagem seja eficaz, é crucial estabelecer uma parametrização definida e adotada, algo que ainda é complicado nas práticas atuais. O sistema gestor proposto visa justamente fornecer uma estrutura para essa parametrização, como demonstrado na *Figura 10*, permitindo a criação de modelos informacionais ricos que vão além da simples representação geométrica da subestação (Silva *et al.*, 2022).

Figura 10 – Disjuntor ABB 500kV.



(Fonte: Cardoso, 2019)

É sugerido a integração de dados como necessidade de um sistema que possa centralizar toda a informação necessária para o projeto e documentar de forma mais eficiente a sua evolução, conforme proposto pela adoção do BIM. A identificação dos fluxos principais do projeto básico de subestações em Furnas – Planejamento, Contratação, Execução e Recebimento (Distribuição) – demonstra a importância de integrar dados de diferentes etapas e áreas do projeto. O sistema gestor busca, portanto, ser uma plataforma onde as informações possam ser manipuladas, versionadas e compartilhadas de forma controlada, garantindo a coerência e a rastreabilidade dos dados ao longo do ciclo de vida da subestação (Silva *et al.*, 2022).

O sistema visa facilitar a criação, o gerenciamento e o compartilhamento de informações complexas inerentes a esses projetos, desde a concepção até a operação. A implementação de funcionalidades como criação de tarefas, versionamento de arquivos, manipulação de status e a futura integração com plataformas de visualização 3D como o Autodesk Forge demonstram o foco na criação de um ambiente digital integrado que potencializa os benefícios da metodologia BIM para o setor de subestações de energia elétrica (Silva *et al.*, 2022).

O estudo comparativo entre ferramentas CAD e BIM para projetos de instalações elétricas realizado por Couto *et al.* (2021) oferece percepções valiosas. Embora o estudo de caso se concentre em um projeto elétrico residencial, os benefícios do BIM demonstrados, como a atribuição de parâmetros aos elementos e a capacidade de automatizar a análise de interferências, são princípios fundamentais da modelagem da informação que transcendem a escala ou a tipologia do projeto. A própria distinção entre a representação de elementos por meio de linhas em CAD e a inserção de objetos paramétricos com características pré-definidas no BIM (como tensão e potência) ilustra a riqueza de dados que a modelagem BIM pode proporcionar, algo essencial também em projetos complexos como subestações.

A capacidade do BIM de promover uma modelagem multidimensional, reunindo dados quantitativos e qualitativos dos ativos em uma mesma solução é crucial para projetos de subestações. Destaca-se como o Revit permite a criação de um modelo virtual integrado e colaborativo, onde diferentes disciplinas podem desenvolver seus projetos separadamente, mas de forma coordenada. Essa abordagem de modelagem integrada é particularmente relevante para subestações, que envolvem diversas disciplinas como civil, eletromecânica e elétrica. A possibilidade de visualizar os elementos em 3D, facilita a compreensão espacial e a identificação de potenciais problemas de compatibilização antes da execução da obra.

Enfatiza a capacidade do BIM de automatizar a análise de interferências, permitindo a detecção precoce de conflitos entre diferentes sistemas. Essa funcionalidade é de extrema importância em projetos de subestações, onde a complexidade das instalações e a interação entre diversos componentes exigem uma coordenação precisa. A possibilidade de intercâmbio de modelos entre diferentes ferramentas, mencionada no contexto da interoperabilidade do Revit, também se alinha com a necessidade de integrar dados de diferentes softwares utilizados pelas diversas equipes de projeto em uma subestação. A geração automática de tabelas com informações de dimensionamento, lista de materiais e orçamento, observada no estudo de caso, demonstra o potencial do BIM para gerenciar grandes volumes de dados de forma eficiente, algo essencial em projetos de grande escala como subestações.

A análise comparativa de Couto *et al.* (2021), embora focada em um projeto residencial, lança luz sobre os benefícios intrínsecos da metodologia BIM para a modelagem rica em informações e a integração de dados em projetos de instalações elétricas, conforme evidenciado na *Tabela 5*. Os ganhos em termos de visualização, compatibilização, gerenciamento de informações e potencial redução de retrabalho, demonstrados no estudo de caso, são altamente relevantes para o contexto de subestações elétricas. A transição do CAD

para o BIM, como discutido no artigo, representa uma evolução na forma de conceber e gerenciar projetos, oferecendo as ferramentas necessárias para lidar com a complexidade da modelagem e da integração de dados em empreendimentos de maior escala e multidisciplinares como as subestações.

Tabela 5 – Comparação quantitativa entre CAD e BIM.

Métrica	CAD (Tradicional)	BIM	Vantagem BIM	Fonte
Tempo de Projeto	100-120 horas (base)	60-70 horas (redução de ~40%)	40% mais rápido	Couto (2021)
Conflitos Detectados	15-20 por projeto (manual)	2-5 por projeto (automático)	75-90% menos conflitos	Sacks <i>et al.</i> (2018)
Custo de Retrabalho	12-15% do orçamento	5-7% do orçamento	50% menor	Azhar (2011)
Precisão Orçamentária	±10-15% de variação	±5-7% de variação	2x mais precisa	McGraw-Hill (2008)
Eficiência em Compatibilização	12 horas por disciplina	3 horas por disciplina	75% mais eficiente	Couto (2021)
Erros em Documentação	8-10 erros por 100 folhas	1-2 erros por 100 folhas	80% menos erros	Volk, Stengel e Schultmann (2014)
Tempo de Detecção de Conflitos	2-3 semanas (processo manual)	2-3 dias (ferramentas automatizadas)	90% mais rápido	Silva <i>et al.</i> (2022)
Integração com CMMS	20-30% dos dados utilizáveis	85-90% dos dados utilizáveis	3x mais eficaz	Cardoso <i>et al.</i> (2019)

(Fonte: o autor)

Ao reconhecer o potencial do BIM como fonte de dados para a modelagem 3D de uma subestação elétrica simplificada, ilustra-se como o BIM pode servir como base fundamental para outras tecnologias aplicadas ao setor. A criação de um banco de dados de informações dos equipamentos dentro do ambiente BIM torna-se um ativo que pode ser explorado por diversas aplicações, incluindo aquelas focadas em segurança operacional (Rocha, 2021).

A capacidade do BIM de gerar modelos tridimensionais precisos e ricos em informação é crucial para o desenvolvimento de aplicações de Realidade Aumentada eficazes

em subestações elétricas, conforme demonstrado na *Figura 11*. Utilizaram-se modelos 3D para experimentação em realidade virtual, que serviu como etapa preliminar para a construção da aplicação em RA. Essa modelagem detalhada, inerente ao BIM, permite que a aplicação de RA sobreponha informações e objetos virtuais ao ambiente real de forma precisa e contextualizada. A atribuição de parâmetros aos elementos modelados em BIM, como características elétricas e dados de segurança, enriquece o modelo e fornece as informações necessárias para a RA exibir detalhes relevantes aos operadores e mantenedores (Rocha, 2021).

Figura 11 – Sobreposição das áreas definidas com “Limite de proteção contra arco elétrico”.



(Fonte: Rocha, 2021)

Um modelo BIM de uma subestação elétrica pode conter uma vasta gama de informações, desde a disposição física dos equipamentos até diagramas unifilares, dados de tensão e corrente, e estudos de energia incidente. A aplicação de RA desenvolvida por Rocha (2021) acessa justamente esse tipo de informação para fornecer orientações de segurança, como EPIs recomendados, distâncias seguras e parâmetros dos painéis elétricos. Portanto, o BIM atua como um repositório centralizado de dados que facilita o acesso e a utilização dessas informações por tecnologias como a Realidade Aumentada.

O BIM fornece a base para a modelagem detalhada e a integração de dados essenciais, enquanto a Realidade Aumentada utiliza essas informações para criar aplicações que melhoram a segurança e a eficiência operacional. O reconhecimento do BIM como fonte de dados sublinha a importância da sua implementação para além do projeto e construção, estendendo seus benefícios para a operação e manutenção, especialmente em áreas críticas como a segurança do trabalho em subestações elétricas (Rocha, 2021).

Destaca-se o avanço tecnológico que possibilita a unificação de dados geográficos e detalhes específicos de projetos em uma plataforma singular, o que se aplica intrinsecamente

ao desenvolvimento de modelos de subestações elétricas. Essa integração visa criar projetos inteligentes em diversas áreas, incluindo a distribuição de rede elétrica, um domínio no qual as subestações desempenham um papel crucial (Abreu, Paiva e Silva, 2023).

A possibilidade de conformar dados geográficos e detalhes de cada projeto em uma única plataforma, impacta significativamente a modelagem de subestações elétricas em BIM. Ao integrar informações do terreno e do contexto geográfico (provenientes do GIS) com os detalhes técnicos e paramétricos dos equipamentos e estruturas da subestação (modelados em BIM), obtém-se um modelo muito mais rico e preciso. Essa integração permite uma visualização contextualizada da subestação, auxiliando no planejamento da sua localização, na análise de interferências com o ambiente e em decisões de projeto mais assertivas (Abreu, Paiva e Silva, 2023).

A unificação de GIS e BIM resulta em maior acertabilidade e detalhes, além de maior eficiência na gestão do comissionamento na execução das obras. No contexto de subestações elétricas, a integração de dados permite um gerenciamento mais eficaz de todas as informações relevantes, desde as características técnicas dos equipamentos até os dados de localização e manutenção. Essa integração de dados facilita a compatibilização entre as diferentes disciplinas envolvidas no projeto de uma subestação (como civil, elétrica e eletromecânica), reduzindo retrabalhos e otimizando o fluxo de trabalho (Abreu, Paiva e Silva, 2023).

A integração entre GIS e BIM oferece um potencial significativo para aprimorar a modelagem e a gestão de dados em projetos de infraestrutura, incluindo especificamente a distribuição de rede elétrica e, por extensão, as subestações elétricas, conforme demonstrado na *Tabela 6*. Os benefícios mencionados, como decisões assertivas, redução de custos e retrabalhos, e a produção de fluxos de trabalho sincronizados entre as disciplinas, são altamente relevantes para o desenvolvimento e a gestão eficiente de subestações elétricas (Abreu, Paiva e Silva, 2023).

Tabela 6 – Benefícios da integração BIM-GIS.

Critério	Vantagens
Acurácia Espacial	Combina precisão milimétrica do BIM com georreferenciamento do GIS
Compatibilização Ambiental	Integra dados topográficos, hidrologia e vegetação ao modelo construtivo
Gestão de Ativos	Associa atributos BIM (ex.: vida útil) a coordenadas geográficas

Simulações Urbanas	Modela interações entre edificações e infraestrutura urbana (ex.: redes de distribuição)
Resposta a Emergências	Cruza dados de localização (GIS) com informações técnicas (BIM) para crises
Sustentabilidade	Analisa insolação, ventos e microclima para eficiência energética

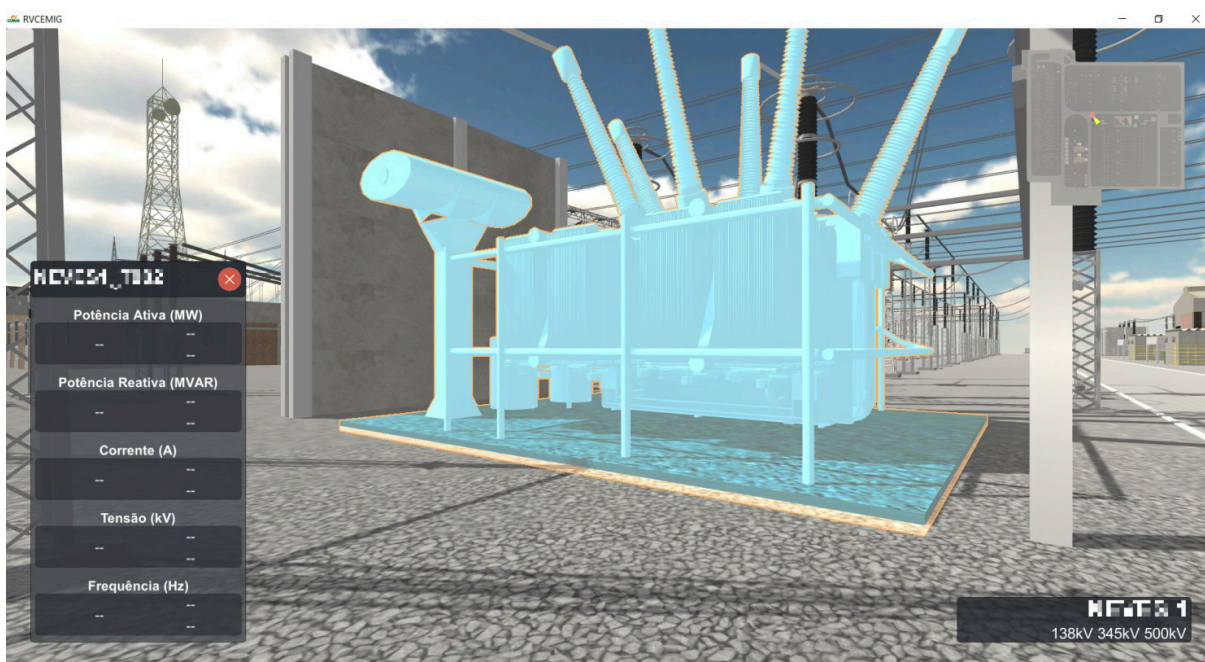
(Fontes: Abreu, Paiva e Silva, 2023; ANEEL, 2022)

3.3. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO 4.0: O PAPEL DO BIM NA REDE BÁSICA

A manutenção e operação de subestações elétricas são aspectos cruciais para a continuidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. As subestações desempenham um papel vital na conversão e distribuição de energia, permitindo que a eletricidade gerada em alta tensão seja transformada para níveis adequados de distribuição. Para garantir que essas subestações operem eficientemente e minimizem interrupções no fornecimento de energia, é necessário que as práticas de manutenção sejam rigorosamente planejadas e executadas. No entanto, o avanço das tecnologias digitais, como o *Building Information Modeling* (BIM), está transformando como essas atividades são realizadas, trazendo novas perspectivas para o setor.

A aplicação do BIM na manutenção e operação de subestações oferece uma visão integrada dos sistemas elétricos, permitindo uma análise mais detalhada e precisa de cada componente da subestação (Cardoso *et al.*, 2019), ilustrado na *Figura 12* abaixo. Por meio do BIM, é possível criar modelos digitais que representam fielmente a infraestrutura física, facilitando a identificação de possíveis falhas e a execução de manutenções preditivas. Isso é especialmente importante em subestações, onde a complexidade dos sistemas e a criticidade das operações exigem precisão e controle rigoroso. Além disso, a utilização do BIM também contribui para a otimização dos processos de manutenção, reduzindo custos e melhorando a eficiência operacional (Sacks *et al.*, 2018).

Figura 12 – Ambiente Virtual com modelos BIM.



(Fonte: Barreto, 2023)

A implementação do BIM nas subestações, no entanto, ainda enfrenta desafios significativos. A integração de modelos digitais com sistemas de gerenciamento de ativos e a adaptação das equipes de manutenção às novas ferramentas são alguns dos principais obstáculos (Deniz, 2018). Além disso, a falta de padronização na utilização do BIM em projetos elétricos pode dificultar a interoperabilidade entre diferentes sistemas e plataformas, gerando desafios adicionais para os profissionais envolvidos (Casey, 2008).

A análise de experiências práticas de utilização do BIM na manutenção de subestações revela que a tecnologia não apenas facilita a gestão das operações, mas também melhora a segurança das instalações. Com o uso de modelos 3D e a capacidade de simular diferentes cenários, as equipes de manutenção podem prever e mitigar riscos potenciais antes que eles se tornem problemas reais. Isso é particularmente importante em subestações, onde a segurança é uma prioridade máxima devido aos altos níveis de energia envolvidos (Barcelos *et al.*, 2013). Dessa forma, o BIM se mostra uma ferramenta poderosa para melhorar a segurança operacional e proteger tanto os trabalhadores quanto os equipamentos.

Outro benefício do BIM na operação de subestações é a capacidade de integrar informações em tempo real com o gerenciamento de ativos. Isso permite que os gestores tenham acesso imediato a dados críticos, como a condição dos equipamentos e o histórico de manutenção, o que é essencial para a tomada de decisões informadas. Além disso, o uso de BIM pode facilitar a colaboração entre diferentes equipes e departamentos, promovendo uma

abordagem mais coesa e eficiente na operação das subestações (Alahmad *et al.*, 2011). Essa integração de dados e processos é fundamental para enfrentar os desafios complexos das subestações modernas.

No entanto, para que o BIM alcance seu pleno potencial na manutenção e operação de subestações, é necessário haver um investimento contínuo em treinamento e capacitação das equipes (Panizza *et al.*, 2004). A transição para essa nova metodologia requer uma mudança cultural nas organizações, onde os profissionais devem estar dispostos a adotar novas tecnologias e métodos de trabalho. Além disso, é crucial que as empresas desenvolvam políticas e diretrizes claras para a implementação do BIM, garantindo que todos os envolvidos estejam alinhados com os objetivos e práticas estabelecidas (Crespo e Ruschel, 2007). Somente assim será possível tirar o máximo proveito das capacidades oferecidas por essa ferramenta.

Os softwares *Computer Aided Design* (CAD) já são amplamente utilizados nos escritórios de arquitetura, engenharia e construção (AEC) (Panizza *et al.*, 2004). Contudo, estes programas apresentam uma deficiência de integração entre o desenho da construção e os cálculos estruturais, levando a restrições na comunicação com o projetista, e entre as multidisciplinas envolvidas em projetos (Crespo e Ruschel, 2007).

Assim, para um melhor gerenciamento do projeto, o ideal seria apresentar todas as informações agregadas ao projeto em uma única planta, por representação gráfica, numérica e textual, utilizando de ferramentas como a Realidade Virtual (RV) (Jacoski, 2003) e o *Building Information Modeling* (BIM), as quais permitem novos meios para a coordenação, colaboração de equipes, e troca de informação entre organizações.

A metodologia BIM, apresenta-se como uma ferramenta mais eficiente e adequada para projetos realizados por diversas vertentes, uma vez que possibilita o compartilhamento e a atualização das informações referentes aos modelos, aliada à sua respectiva visualização gráfica. Ademais, essa metodologia se sobressai do CAD, uma vez que, possibilita a coordenação entre diferentes segmentos do projeto, evitando incompatibilidades entre os produtos modelados, e permite a simulação multidimensional do produto, a qual se torna cada vez mais viável à medida que o projeto e seus segmentos se tornam mais complexos (Liu e Ran, 2013). Portanto, o BIM é mais que uma simples visualização tridimensional de um modelo, pois, além disso, agrega informações construtivas dos objetos modelados (Crespo e Ruschel, 2007).

O processo de manutenção e operação de subestações da rede básica é um tema de extrema relevância no contexto da gestão de sistemas elétricos. As subestações desempenham um papel crucial na transmissão de energia elétrica, sendo responsáveis pela transformação dos níveis de tensão e pela distribuição da eletricidade. Dessa forma, a operação e a manutenção dessas infraestruturas devem ser realizadas com rigor, a fim de garantir a continuidade e a confiabilidade do fornecimento de energia. Para alcançar tal objetivo, é necessário um profundo conhecimento técnico e a aplicação de metodologias avançadas, frequentemente descritas em normas e documentos oficiais, como aqueles disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (Moreale, 2007).

O primeiro passo para garantir a eficácia na operação das subestações é compreender a sua estrutura e os componentes principais. Uma subestação é composta por diversos equipamentos, como transformadores, disjuntores, seccionadores, barramentos, sistemas de proteção e controle, entre outros. Cada um desses componentes desempenha uma função específica, sendo fundamental que estejam em perfeito estado de funcionamento para assegurar a integridade do sistema elétrico na totalidade. A manutenção preventiva e corretiva desses equipamentos é uma prática comum e essencial para evitar falhas e interrupções no fornecimento de energia (Moreale, 2007).

Na manutenção preventiva, são realizadas inspeções periódicas e testes em todos os componentes da subestação. Essas ações visam identificar possíveis desgastes ou falhas antes que eles causem problemas maiores. O planejamento da manutenção preventiva deve ser realizado conforme as especificações técnicas de cada equipamento, respeitando as recomendações dos fabricantes e as normas estabelecidas pelos órgãos reguladores. A documentação técnica, como manuais de manutenção e protocolos operacionais, desempenha um papel crucial nesse processo (Cardoso *et al.*, 2019).

Os procedimentos de manutenção corretiva, por sua vez, são implementados quando já há uma falha ou defeito identificado no sistema. A rapidez e a precisão na identificação e correção desses problemas são vitais para minimizar o impacto no fornecimento de energia. Para isso, equipes especializadas devem estar sempre de prontidão, equipadas com ferramentas e tecnologias adequadas para realizar reparos imediatos. Em muitos casos, a utilização de tecnologias avançadas, como a realidade aumentada e sistemas de monitoramento em tempo real, tem se mostrado eficaz na melhoria dos processos de manutenção e na redução do tempo de inatividade (Barcelos *et al.*, 2013).

O treinamento dos operadores é outro fator crucial na operação das subestações. Esses profissionais devem ser altamente capacitados, com conhecimento profundo dos sistemas elétricos e das tecnologias utilizadas. Programas de treinamento contínuo, incluindo simulações de cenários reais e o uso de simuladores, são essenciais para preparar os operadores para lidar com situações adversas e tomar decisões corretas sob pressão (Moreale, 2007).

A manutenção preditiva, aliada à utilização de tecnologias avançadas, tem o potencial de transformar a maneira como as subestações são geridas. Ao prever falhas antes que elas ocorram, é possível planejar intervenções com antecedência, minimizando o impacto no fornecimento de energia e reduzindo os custos com reparos emergenciais. Essa abordagem proativa representa um avanço em relação aos métodos tradicionais de manutenção, que dependem muitas vezes de inspeções visuais e testes periódicos (Liu e Ran, 2013).

As normas e regulamentos estabelecidos pelo ONS e outros órgãos reguladores desempenham um papel crucial na definição das práticas de operação e manutenção das subestações. Esses documentos especificam os requisitos técnicos e operacionais que devem ser seguidos, garantindo a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico. O cumprimento rigoroso dessas normas é essencial para evitar penalidades e garantir a conformidade com as legislações vigentes (Moreale, 2007).

A modernização das subestações, com a introdução de novas tecnologias e a substituição de equipamentos obsoletos, é uma estratégia fundamental para manter a confiabilidade e a eficiência do sistema elétrico. A atualização tecnológica permite não apenas melhorar o desempenho das subestações, mas também adaptar as infraestruturas às novas demandas energéticas e aos avanços nas normas regulatórias (Liu e Ran, 2013).

O planejamento e a execução de projetos de modernização devem ser realizados com base em uma análise detalhada das necessidades específicas de cada subestação. Essa análise deve considerar fatores como a idade dos equipamentos, o histórico de falhas, e as expectativas futuras de crescimento da demanda por energia. A utilização de ferramentas de modelagem e simulação pode ser extremamente útil nesse processo, permitindo prever o impacto das intervenções e otimizar os recursos disponíveis (Jacoski, 2003).

A colaboração entre diferentes equipes e departamentos é essencial para o sucesso das operações de manutenção e modernização das subestações. Engenheiros, técnicos, operadores e gestores devem trabalhar integradamente, compartilhando informações e tomando decisões em conjunto. Essa abordagem colaborativa é fundamental para garantir que

todas as etapas do processo sejam realizadas de maneira eficiente e segura (Cardoso *et al.*, 2019).

A segurança é uma preocupação constante nas operações de subestações. Os trabalhadores envolvidos nessas atividades estão expostos a riscos significativos, como choques elétricos, incêndios e explosões. Por isso, é imprescindível que todas as operações sejam realizadas de acordo com rigorosos padrões de segurança, e que os trabalhadores recebam treinamento adequado e utilizem equipamentos de proteção individual (EPIs) em todas as intervenções (Panizza *et al.*, 2004).

A evolução tecnológica na área de subestações está em constante desenvolvimento. Novas soluções estão sendo constantemente desenvolvidas, visando aumentar a eficiência operacional, reduzir custos e melhorar a segurança. A adoção de tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a internet das coisas (IoT), promete transformar ainda mais a maneira como as subestações são operadas e mantidas em breve (Alahmad *et al.*, 2011).

A aplicação do *Building Information Modeling* (BIM) na manutenção e operação de subestações elétricas traz uma série de benefícios que vão além do simples planejamento e construção, resultando em significativa redução de custos e tempo. O BIM permite a criação de modelos tridimensionais detalhados das subestações, integrando informações precisas sobre todos os componentes e sistemas. Essa precisão documental facilita a execução de atividades de manutenção ao fornecer dados exatos sobre a localização e as características dos equipamentos, reduzindo o tempo necessário para inspeções e reparos (Liu e Ran, 2013).

Um dos principais desafios na manutenção de subestações é a correta cotação de materiais, tanto em termos de tipos quanto de quantidades. Com o BIM, é possível extrair informações detalhadas diretamente do modelo digital, garantindo maior precisão na definição dos materiais necessários. Segundo (Alahmad *et al.*, 2011), essa capacidade de gerar listas de materiais diretamente do modelo BIM elimina erros comuns de sobreposição ou falta de componentes, permitindo uma melhor gestão do estoque e, consequentemente, uma redução nos custos operacionais.

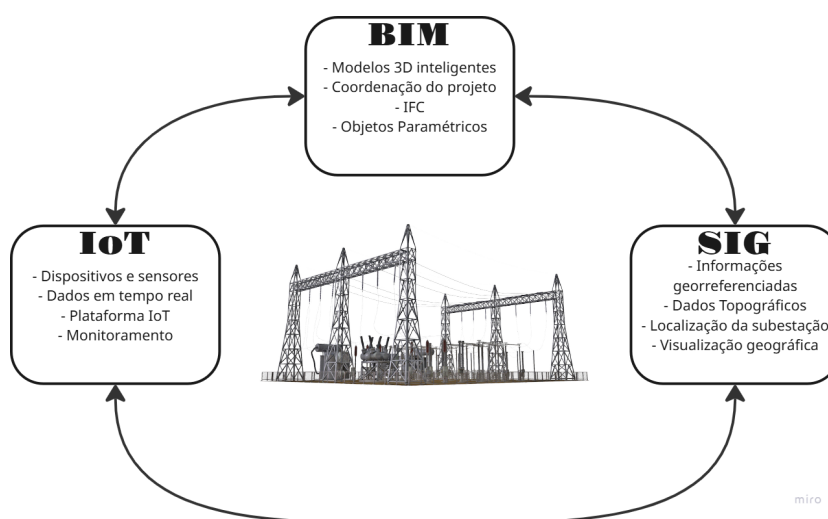
Além da precisão na documentação e na cotação de materiais, o BIM também facilita o planejamento da equipe necessária para as atividades de manutenção. O modelo BIM pode simular diferentes cenários de manutenção, ajudando a identificar a quantidade ideal de técnicos e especialistas necessários para cada tarefa. Isso otimiza a alocação de recursos humanos, evitando o excesso ou a falta de pessoal, impactando diretamente nos custos operacionais (Panizza *et al.*, 2004).

A integração de dados sobre equipamentos no modelo BIM também permite um planejamento mais eficaz da manutenção. Segundo Casey (2008), o BIM pode armazenar informações detalhadas sobre a vida útil, o histórico de reparos e as especificações técnicas dos equipamentos. Com essas informações centralizadas e facilmente acessíveis, as equipes de manutenção podem antecipar a necessidade de substituições ou reparos, agendando as intervenções para minimizar o tempo de inatividade e maximizar a eficiência operacional.

Outro benefício importante do uso do BIM na operação de subestações é a capacidade de prever falhas e evitar problemas antes que eles ocorram. Utilizando análises baseadas em dados históricos e em tempo real, o BIM pode identificar padrões que indicam o desgaste ou a falha iminente de componentes críticos. Segundo (Alahmad *et al.*, 2011), essa abordagem proativa reduz o risco de falhas catastróficas e, ao mesmo tempo, diminui os custos associados a reparos de emergência.

A interoperabilidade entre o BIM e outras ferramentas de gestão de manutenção também desempenha um papel crucial na otimização dos processos. Ao permitir que o BIM se conecte com sistemas de gerenciamento de ativos, por exemplo, é possível sincronizar as informações de manutenção com os cronogramas operacionais, evitando conflitos e garantindo que as atividades sejam realizadas no momento mais oportuno (Liu e Ran, 2013). Essa coordenação integrada contribui para a redução de custos e melhora a eficiência operacional. O diagrama da *Figura 13* ilustra como essa interoperabilidade pode ser representada.

Figura 13 – Diagrama de interoperabilidade entre BIM, IoT e SIG em subestações.



(Fonte: o autor)

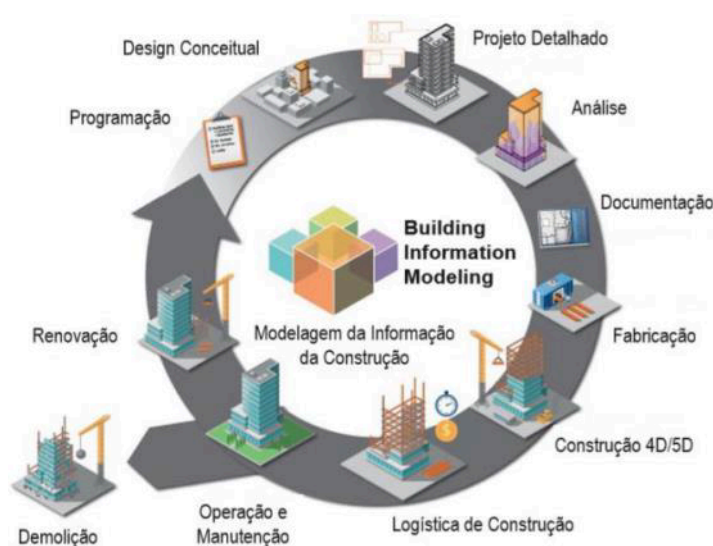
Em termos de equipamentos necessários para a manutenção, o BIM permite uma visualização detalhada de cada componente no modelo da subestação. Isso facilita a

identificação dos equipamentos e ferramentas específicas que serão necessários para realizar as atividades de manutenção, evitando atrasos e garantindo que todas as ferramentas estejam disponíveis quando necessárias (Panizza *et al.*, 2004). Além disso, essa visualização detalhada permite uma melhor preparação da equipe, que pode planejar as atividades com base em uma compreensão clara dos desafios que enfrentará. A *Figura 14* exemplifica todo o ciclo de vida que pode ser planejado através do BIM.

O BIM também contribui para a gestão eficiente dos custos ao permitir a simulação de diferentes estratégias de manutenção. Como apontado por Casey (2008), as equipes de operação podem utilizar o BIM para avaliar o impacto financeiro de diferentes abordagens de manutenção, escolhendo a opção mais econômica sem comprometer a segurança ou a confiabilidade da subestação. Essa capacidade de simulação é um diferencial significativo, permitindo uma gestão mais consciente e baseada em dados reais.

Finalmente, o uso do BIM na documentação de manutenção gera um ciclo de *feedback* que melhora continuamente os processos operacionais. Cada atividade de manutenção registrada no BIM atualiza o modelo com informações mais precisas sobre o estado dos componentes e sistemas, ajudando a planejar futuras intervenções com ainda mais eficiência (Alahmad *et al.*, 2011). Isso não apenas reduz o tempo e os custos de manutenção ao longo do tempo, mas também aumenta a vida útil dos ativos, promovendo uma operação mais sustentável e econômica.

Figura 14 – Ciclo de vida de um ativo em BIM (do projeto à manutenção).



(Fonte: Abreu, 2023)

4. IMPLEMENTAÇÃO DO BIM EM SUBESTAÇÕES: ANÁLISE DE DESAFIOS E BENEFÍCIOS

4.1. DESAFIOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS NA ADOÇÃO DO BIM

A adoção do *Building Information Modeling* (BIM) no setor da construção, apesar de seus reconhecidos benefícios, tem encontrado diversos obstáculos de natureza técnica e operacional (Abreu, Paiva e Silva, 2023). Conforme apontado por Jacoski (2003), a pesquisa realizada em escritórios de projetos catarinenses já identificava problemas significativos gerados pela falta de interoperabilidade e de uma eficiente transferência de informação entre os diversos agentes envolvidos no processo de projeto. Abreu, Paiva e Silva (2023) corroboram essa perspectiva, mencionando que a lenta adoção do BIM se deve, em parte, a fatores como a demanda de tempo para a qualificação de profissionais em ambiente colaborativo, a falta de clareza de responsabilidades em equipes multi-organizacionais e a falta de treinamento. Esses principais problemas enfrentados em projetos de construção podem ser observados na *Figura 15*.

Além disso, Jacoski (2003) já sinalizava que os desafios tenderiam a se deslocar de questões puramente técnicas para a conversão de dados em informações utilizáveis, o que implica em processos operacionais bem definidos e profissionais capacitados. No contexto específico de projetos de subestações, Faria (2021) e Silva *et al.* (2022) destacam a falta de mão de obra especializada e o custo de implementação da tecnologia como barreiras operacionais relevantes, enquanto Abreu, Paiva e Silva (2023) apontam para o desafio técnico de desenvolver uma fonte única de verdade para a gestão da informação. Assim, a implementação efetiva do BIM esbarra em uma complexa interação de dificuldades que abrangem desde a capacitação e organização das equipes até a compatibilidade tecnológica e o gerenciamento de dados.

Figura 15 – Principais problemas em projetos de construção



(Fonte: FMI CORPORATION; AUTODESK, 2021)

O excerto de Jacoski (2003) que enfatiza que os desafios estão cada vez mais ligados à conversão de dados em informações utilizáveis é um ponto de partida crucial para analisar a adoção do BIM em subestações elétricas. No contexto específico de subestações, um dos principais desafios técnicos reside na necessidade de converter dados existentes, frequentemente em formatos CAD proprietários, para o ambiente BIM. Essa conversão não é trivial, pois implica em transformar representações geométricas em objetos informacionais ricos em dados relevantes para a manutenção e operação, como especificações de equipamentos, históricos de manutenção e dados de desempenho. A falta de padronização e a interoperabilidade entre diferentes softwares e formatos de arquivos (como DXF e DWG) sempre foram obstáculos na indústria da construção, e essa questão se agrava ao lidar com a complexidade dos sistemas elétricos e eletromecânicos presentes em subestações. Garantir que os dados convertidos sejam precisos, semanticamente corretos e efetivamente "utilizáveis" pelas equipes de manutenção e operação é um desafio técnico significativo.

Jacoski (2003) também menciona um estudo realizado em escritórios de projeto para levantar os problemas ligados à interoperabilidade e interrupção dos projetos. Essa referência é fundamental para introduzir a ideia de que a interoperabilidade, um desafio geral identificado em projetos de edificações, também é um entrave significativo na adoção do BIM em subestações elétricas. A interoperabilidade não se limita apenas à troca de arquivos sem perda de informação; ela abrange a capacidade de diferentes disciplinas (elétrica, civil, eletromecânica) trabalharem de forma integrada no mesmo modelo BIM, utilizando softwares distintos. A pesquisa de Jacoski (2003) quantificou perdas de produtividade em torno de 22% devido à falta de interoperabilidade entre diferentes modalidades de projeto, evidenciando o impacto da dificuldade na troca e utilização de informações entre os diversos agentes. No contexto de subestações, essa falta de interoperabilidade pode dificultar a coordenação entre as equipes responsáveis pelo projeto elétrico, pelas estruturas de suporte, pelos sistemas de proteção e controle, impactando a eficiência da manutenção e a segurança operacional.

Ainda segundo Jacoski (2003), a pesquisa identificou um alto grau de interdependência nos projetos e entre os parceiros envolvidos no desenvolvimento de projetos para edificações. Essa constatação pode ser diretamente extrapolada para o contexto de subestações elétricas, onde a manutenção e operação envolvem diversas equipes com especialidades distintas (técnicos eletricitas, engenheiros de proteção, pessoal de automação, etc.) e muitas vezes a colaboração de diferentes organizações. A ausência de uma plataforma

integrada como o BIM, que centralize e compartilhe informações de forma eficiente, pode gerar desafios operacionais significativos, como a dificuldade em acessar informações atualizadas dos ativos, a falta de coordenação em intervenções de manutenção e a ocorrência de retrabalho devido à informação desatualizada ou inacessível. A tese ressalta que a falta de um ambiente de comunicação padrão entre os agentes e a perda de informação durante o processo são problemas detectados, o que reforça a necessidade de uma plataforma como o BIM para otimizar o fluxo de informações e a colaboração entre as diversas equipes envolvidas na manutenção e operação de subestações.

A pesquisa de Panizza *et al.* (2004) busca identificar os procedimentos que prejudicam e favorecem o uso de CAD para colaboração nos projetos de AEC. Essa análise, focada no CAD, oferece um valioso contraponto para os desafios inerentes à migração para o BIM. Embora o BIM prometa aprimorar significativamente a colaboração ao longo do ciclo de vida de uma subestação, desde o projeto até a manutenção e operação, sua adoção impõe novas exigências técnicas e operacionais. Assim como a implementação eficaz do CAD dependeu da superação de obstáculos relacionados à troca de informações e à organização de dados, a transição para o BIM também esbarra em desafios como a interoperabilidade entre diferentes softwares BIM e outros sistemas de gestão de ativos, a necessidade de criar modelos informacionais ricos e precisos para equipamentos elétricos complexos, e a garantia de que esses modelos atendam às necessidades específicas das equipes de manutenção e operação.

Um ponto crucial destacado por Panizza *et al.* (2004) é que o profissional responsável pela implantação e treinamento de TI em um escritório de AEC deve possuir um conhecimento profundo e simultâneo do processo de projeto e dos recursos de TI adequados a cada etapa. Essa observação sublinha um desafio significativo na adoção do BIM em subestações elétricas: a capacitação eficaz de equipes multidisciplinares. As equipes de manutenção e operação de subestações são compostas por profissionais com diferentes especialidades (eletricistas, engenheiros de proteção, técnicos de automação, etc.) e níveis distintos de familiaridade com ferramentas digitais. Para que a implementação do BIM seja bem-sucedida, é essencial investir em treinamento que abranja tanto os aspectos técnicos do software BIM quanto a sua aplicação específica nos fluxos de trabalho de manutenção e operação de subestações. Esse treinamento deve ser ministrado por profissionais que compreendam tanto a complexidade técnica das subestações quanto o potencial do BIM para otimizar seus processos.

A pesquisa de Panizza *et al.* (2004) também enfatiza a importância da qualidade das informações contidas nos arquivos CAD para uma colaboração eficaz. No contexto do BIM para subestações, essa qualidade informacional torna-se ainda mais crítica. Os modelos BIM precisam ir além da representação geométrica dos equipamentos, incorporando dados detalhados sobre suas especificações técnicas, histórico de manutenção, manuais, diagramas elétricos e informações de desempenho em tempo real. Garantir a precisão, a integridade e a atualização dessas informações ao longo do ciclo de vida da subestação representa um desafio técnico substancial. Além disso, a definição de padrões para a criação e o gerenciamento de informações no ambiente BIM, incluindo nomenclaturas de elementos, níveis de detalhe (LOD) e protocolos de troca de informações, é fundamental para facilitar a colaboração entre as diversas equipes e sistemas envolvidos.

A adoção do BIM em subestações elétricas implica em transformações nos fluxos de trabalho operacionais. Panizza *et al.* (2004) discute como a migração para a colaboração digital em projetos de AEC requer muitas vezes uma mudança de comportamento profissional e de metodologia de trabalho. Da mesma forma, as equipes de manutenção e operação precisarão adaptar seus processos para integrar o BIM em suas atividades diárias. Isso pode envolver a utilização do modelo BIM para o planejamento de intervenções, o registro de dados de manutenção diretamente no modelo, a simulação de procedimentos operacionais e a utilização das informações do modelo para o diagnóstico de falhas e a otimização do desempenho dos equipamentos. O fluxo das etapas envolvidas na implantação do BIM pode ser visualizado no *Diagrama 1*. A integração do BIM com outros sistemas operacionais existentes, como sistemas de gerenciamento de ativos (EAM) e sistemas de controle e supervisão (SCADA), é um desafio operacional complexo, mas essencial para realizar o pleno potencial do BIM na gestão eficiente e sustentável de subestações da rede básica.

Diagrama 1 – Fluxo das etapas de implantação do BIM.



(Fonte: o autor)

Conforme o estudo de Faria (2021), uma parcela significativa dos profissionais atuantes no desenvolvimento de projetos de subestações reconhece que a implementação do BIM enfrenta desafios consideráveis. Entre eles, a falta de mão de obra especializada emerge como o principal entrave, apontado por 76,2% dos entrevistados. Este dado sublinha a necessidade de capacitação e treinamento de profissionais em diversas disciplinas (elétrica, eletromecânica e civil) para poderem utilizar eficazmente as ferramentas e metodologias BIM específicas para projetos de subestações, um ponto que ecoa a preocupação de Panizza *et al.* (2004) sobre a necessidade de conhecimento simultâneo de processos e TI.

Faria (2021) aponta que o custo de implementação da tecnologia BIM é outro grande desafio, mencionado por 52,4% dos profissionais consultados. Este custo não se limita apenas à aquisição de softwares e hardwares, mas também engloba os investimentos em treinamento, a necessidade de atualização da infraestrutura tecnológica e, potencialmente, a reestruturação dos fluxos de trabalho e processos organizacionais. Como mencionado na introdução do trabalho de Faria (2021), apesar dos potenciais benefícios do BIM, como projetos mais confiáveis e maior produtividade, alguns setores, incluindo o de projetos para subestações,

ainda apresentam pouco avanço na sua utilização. A percepção de um alto custo inicial pode, portanto, ser uma barreira significativa para a adoção em larga escala, especialmente em um setor que, segundo a pesquisa, se considera bastante atrasado na adoção de ferramentas de modelagem computacional.

Além da falta de mão de obra e do custo de implementação, outros desafios técnicos e operacionais podem ser inferidos a partir da análise de Faria (2021) e de discussões anteriores. A parametrização dos equipamentos específicos de subestações é mencionada como uma dificuldade potencial. Dada a singularidade e a complexidade de muitos componentes utilizados em subestações, a criação de objetos BIM que representem fielmente suas características técnicas e funcionais, incluindo dados relevantes para operação e manutenção, pode ser um processo trabalhoso e demandar conhecimento especializado. A interoperabilidade, já identificada como um desafio geral em projetos AEC, também se aplica ao contexto de subestações, especialmente na integração de diferentes disciplinas e na troca de informações entre diversos softwares utilizados nas fases de projeto, construção e operação.

A pesquisa de Faria (2021) revela uma percepção de que o segmento pode ser resistente a mudanças ou acomodado às práticas antigas. A transição para o BIM não é apenas uma mudança tecnológica, mas também cultural e de processos. A necessidade de maior interação entre as áreas de desenvolvimento, apontada como um dos grandes benefícios do BIM, também implica em superar silos disciplinares e adotar fluxos de trabalho mais colaborativos e integrados. A adaptação a esses novos métodos de trabalho e a garantia de que todos os envolvidos compreendam e se beneficiem da plataforma BIM são desafios operacionais cruciais para o sucesso da sua implementação em projetos de subestações elétricas.

O trabalho de Silva *et al.* (2022) oferece uma análise crucial ao discutir os grandes desafios de como modelar e gerenciar todas as informações pertinentes a um projeto de construção ou adequação de uma subestação de energia, durante todo o seu ciclo de vida. Esta colocação central abrange a complexidade de estabelecer um fluxo de trabalho BIM eficaz que acompanhe todas as etapas, desde a concepção e projeto básico até a construção, operação e eventual manutenção ou adequação da subestação. A natureza multidisciplinar e a abundância de dados técnicos específicos dos equipamentos e sistemas de subestações elevam a dificuldade de uma implementação BIM completa e eficiente, tornando o desafio de

modelagem e gestão da informação um ponto focal na adoção desta metodologia no setor de energia elétrica.

Um dos principais entraves técnicos identificados por Silva *et al.* (2022) reside na complexidade de modelar sem uma parametrização definida e amplamente adotada. A pesquisa aponta que, apesar dos avanços do BIM em outros setores, muitas empresas ainda preferem as abordagens tradicionais baseadas em plantas 2D para projetos de subestações. Esta relutância ou dificuldade em migrar para modelos paramétricos inteligentes reflete a carência de bibliotecas de objetos BIM específicos para equipamentos de subestações, bem como a necessidade de desenvolver um conhecimento especializado para a criação e gestão desses modelos. A falta de padrões claros de parametrização dificulta a criação de modelos ricos em informação e consistentes, limitando assim o potencial do BIM para a análise, compatibilização e gestão do ciclo de vida das subestações.

No âmbito dos desafios operacionais, Silva *et al.* (2022) destacam a escassez de ferramentas de gerenciamento de informações e arquivos especificamente desenvolvidas para a metodologia BIM no setor de energia elétrica. Os autores enfatizam a necessidade crítica de ferramentas desta natureza para assegurar o sucesso da implementação do BIM. Um sistema gestor eficiente é essencial para organizar, versionar, controlar o acesso e facilitar a comunicação das informações geradas durante as diversas fases do projeto e ao longo do ciclo de vida da subestação. A ausência de soluções robustas e adaptadas às particularidades do setor elétrico dificulta a colaboração entre as equipes, o rastreamento das informações e a garantia da integridade dos dados do modelo BIM.

O trabalho de Silva *et al.* (2022) ilumina como os desafios técnicos de modelagem e a falta de parametrização definida, juntamente com os desafios operacionais relacionados à escassez de ferramentas de gestão de informação BIM, representam obstáculos significativos para a plena adoção do BIM em projetos de subestações de energia elétrica. Estes pontos complementam as dificuldades apontadas por Faria (2021), como a falta de mão de obra especializada e o custo de implementação, ao detalhar as barreiras práticas que precisam ser superadas para que o setor possa usufruir dos benefícios da Modelagem da Informação da Construção.

Abreu, Paiva e Silva (2023) apontam que a adoção do BIM tem sido lenta devido a diversos fatores, incluindo a demanda de tempo para a qualificação de profissionais em ambiente colaborativo e a falta de treinamento. Este ponto ressalta que a simples implementação de software BIM não garante o sucesso, sendo crucial o desenvolvimento de

competências e a adaptação a fluxos de trabalho colaborativos. Em projetos complexos como subestações, que exigem a integração de diversas disciplinas e informações detalhadas ao longo de todo o ciclo de vida (Silva *et al.*, 2022), a falta de profissionais qualificados e treinados representa um obstáculo técnico significativo, impactando a capacidade das equipes de modelar, gerenciar e compartilhar informações de forma eficaz.

No âmbito operacional, Abreu, Paiva e Silva (2023) mencionam a falta de clareza de responsabilidades em equipes multi-organizacionais e a falta de incentivos de negócios como contribuintes para a lentidão na adoção do BIM. Projetos de subestações frequentemente envolvem múltiplas empresas e especialidades, tornando essencial a definição clara de papéis e responsabilidades dentro do ambiente BIM para evitar conflitos e garantir a eficiência (Silva *et al.*, 2022). Adicionalmente, a ausência de incentivos claros e a percepção de lucros baixos podem desmotivar as empresas a investirem na implementação do BIM, incluindo os custos de software, treinamento e a reestruturação de processos, elementos que Faria (2021) e Silva *et al.* (2022) também identificaram como desafios.

Sob a perspectiva dos desafios técnicos, Abreu, Paiva e Silva (2023) destacam as deficiências na interoperabilidade como um entrave significativo. A incapacidade de trocar informações de maneira eficiente e sem perdas entre diferentes softwares BIM e outras ferramentas utilizadas no setor de energia elétrica, como os sistemas GIS (Geographic Information Systems), dificulta a criação de modelos integrados e a gestão holística das informações do projeto. A interoperabilidade é fundamental para aproveitar ao máximo os benefícios do BIM, permitindo a compatibilização de projetos de diferentes disciplinas e a análise integrada de dados técnicos e geoespaciais, aspectos cruciais em projetos de infraestrutura como subestações.

Abreu, Paiva e Silva (2023) ressaltam que, embora o objetivo da integração GIS e BIM seja aumentar a quantidade de dados, a troca e a velocidade de análise, existem desafios para o desenvolvimento de uma fonte única de verdade (SSOT) para empresas de construção. Este é um desafio técnico importante para a gestão da informação em subestações, onde a precisão e a consistência dos dados são cruciais ao longo de todo o ciclo de vida do ativo (Silva *et al.*, 2022). A dificuldade em estabelecer uma plataforma unificada que garanta o acesso a informações confiáveis e atualizadas por todas as partes interessadas pode levar a erros, retrabalhos e ineficiências, comprometendo os benefícios potenciais da adoção do BIM e da sua integração com outras ferramentas como o GIS.

As perspectivas trazidas por Abreu, Paiva e Silva (2023) convergem com os obstáculos mais amplamente reconhecidos na implementação do BIM, especialmente no contexto específico de projetos de subestações. A lentidão na adoção é uma manifestação direta da intrincada combinação de desafios técnicos, como as deficiências na interoperabilidade, e operacionais, incluindo a demanda de tempo para a qualificação de profissionais em ambiente colaborativo e a falta de treinamento adequado. Superar essa morosidade exige um esforço coordenado para investir em capacitação e para garantir que as ferramentas BIM possam efetivamente trocar informações entre as diversas disciplinas envolvidas em projetos de subestações.

No domínio operacional, a falta de clareza de responsabilidades em equipes multi-organizacionais Abreu, Paiva e Silva (2023) e a ausência de incentivos de negócios atuam como barreiras significativas à adoção do BIM. Projetos de subestações, por sua natureza multidisciplinar e frequentemente envolvendo diversas empresas (Silva *et al.*, 2022), demandam uma definição precisa de papéis e fluxos de trabalho no ambiente BIM. A percepção de lucros baixos (Abreu, Paiva e Silva, 2023) e os custos de implementação da tecnologia (Faria, 2021) também representam obstáculos operacionais importantes, requerendo uma reavaliação dos modelos de negócio e a demonstração clara do retorno sobre o investimento na adoção do BIM para impulsionar sua implementação no setor.

Os desafios técnicos identificados por Abreu, Paiva e Silva (2023), particularmente as deficiências na interoperabilidade e a dificuldade no desenvolvimento de uma fonte única de verdade (SSOT), são cruciais para a efetiva gestão da informação em projetos de subestações. A complexidade desses projetos exige a integração de dados de diversas fontes e formatos, tornando a interoperabilidade entre softwares BIM e outras ferramentas essenciais (Silva *et al.*, 2022). A busca por uma SSOT é fundamental para garantir a consistência e a confiabilidade das informações ao longo do ciclo de vida do projeto, evitando erros e retrabalhos (Abreu, Paiva e Silva, 2023). A superação desses entraves técnicos é um pré-requisito para que os benefícios potenciais do BIM em termos de eficiência e qualidade sejam plenamente realizados em projetos de subestações.

A adoção bem-sucedida do BIM em projetos de subestações enfrenta uma série de desafios técnicos e operacionais interconectados, conforme elucidado por Abreu, Paiva e Silva (2023). A superação desses obstáculos requer um investimento estratégico em qualificação profissional, o estabelecimento de fluxos de trabalho colaborativos claros, a garantia da interoperabilidade entre plataformas e softwares, a definição de incentivos de

negócios que justifiquem os custos de implementação, e o desenvolvimento de estratégias eficazes para a gestão da informação, incluindo a busca por uma fonte única de verdade. Ao abordar esses desafios de forma integrada e proativa, o setor de projetos de subestações poderá aproveitar plenamente o potencial do BIM para otimizar seus processos, reduzir custos e melhorar a qualidade e a eficiência de seus empreendimentos.

4.2. BENEFÍCIOS DO BIM: REDUÇÃO DE CUSTOS, SEGURANÇA E SUSTENTABILIDADE

A metodologia *Building Information Modeling* (BIM) representa uma evolução na forma como projetos de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) são concebidos e gerenciados ao longo de seu ciclo de vida, oferecendo ótimos benefícios. A integração entre BIM e GIS, ilustrada no *Diagrama 2*, para projetos inteligentes demonstra o potencial para alcançar maior eficiência na gestão do comissionamento na execução das obras, propiciando decisões assertivas, redução de custos e retrabalhos, além de fluxos de trabalho sincronizados. Essa redução de custos pode ser observada na *Tabela 7*, que apresenta um comparativo entre projetos tradicionais e aqueles que utilizam BIM.

Diagrama 2 – Integração entre BIM e GIS.



(Fonte: o autor)

Tabela 7 – Comparativo de custos entre projetos tradicionais e projetos que utilizam BIM.

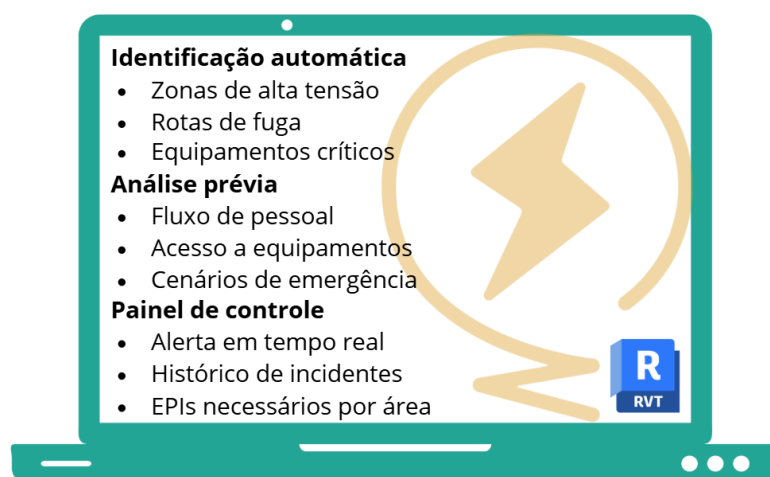
Categoria	Projeto Tradicional	Projeto com BIM
Retrabalho	12% do orçamento	4% do orçamento
Desperdício	8%	2%
Tempo de revisão	20 horas/semana	6 horas/semana

Conflitos detectados	42% pós-obra	78% pré-construção
----------------------	--------------	--------------------

(Fonte: o autor)

Adicionalmente, soluções BIM auxiliam na avaliação de projetos e estrutural, tornando a distribuição de carga e cálculos econômicos e eficientes, e orientam na avaliação de saúde e segurança no local, como demonstrado na *Figura 16*, que ilustra a contribuição do BIM para a identificação de riscos e medidas de segurança, ajudando a alcançar a redução de riscos. A eficiência proporcionada pelo BIM também pode levar a práticas mais sustentáveis através da gestão otimizada de recursos e da redução do desperdício de materiais.

Figura 16 – Como o BIM contribui para a identificação de riscos e medidas de segurança.



(Fonte: o autor)

Crespo e Ruschel (2007) explicitamente mencionam que as Ferramentas *Building Information Modeling* (BIM) representam uma nova geração de ferramentas CAD inteligentes orientadas ao objeto que gerenciam a informação da construção no ciclo de vida do projeto. Este gerenciamento eficiente da informação, desde a concepção até a operação, possui um potencial intrínseco para a redução de custos ao otimizar processos e minimizar desperdícios em todas as fases do ciclo de vida de uma construção.

A busca por competitividade e melhoria contínua no processo de desenvolvimento do produto da construção civil, que é um dos objetivos do BIM segundo Crespo e Ruschel (2007), está diretamente ligada à possibilidade de reduzir custos e aumentar a eficiência. A colaboração entre os profissionais da área de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), a interoperabilidade entre diferentes softwares e a possibilidade de reutilização da informação que o BIM proporciona são fatores que contribuem para um fluxo de trabalho mais integrado e menos propenso a erros. A redução de erros e retrabalhos, como apontado em outros

contextos, impacta diretamente nos custos dos projetos e também pode levar a uma maior segurança no canteiro de obras, evitando problemas decorrentes de falhas de projeto ou incompatibilidades.

Ainda segundo Crespo e Ruschel (2007), o BIM requer dos usuários a habilidade de domínio específico para que os objetos modelados mostrem um comportamento inteligente. Essa inteligência embarcada nos modelos BIM, juntamente com a capacidade de agregar informações detalhadas aos componentes da construção, permite análises mais precisas e simulações. Essas análises podem abranger aspectos como desempenho energético e ciclo de vida dos materiais, contribuindo para decisões de projeto mais informadas e, conseqüentemente, para a sustentabilidade das edificações. A reutilização da informação ao longo do ciclo de vida do projeto também evita a redundância de esforços e a perda de conhecimento, otimizando recursos e diminuindo o impacto ambiental.

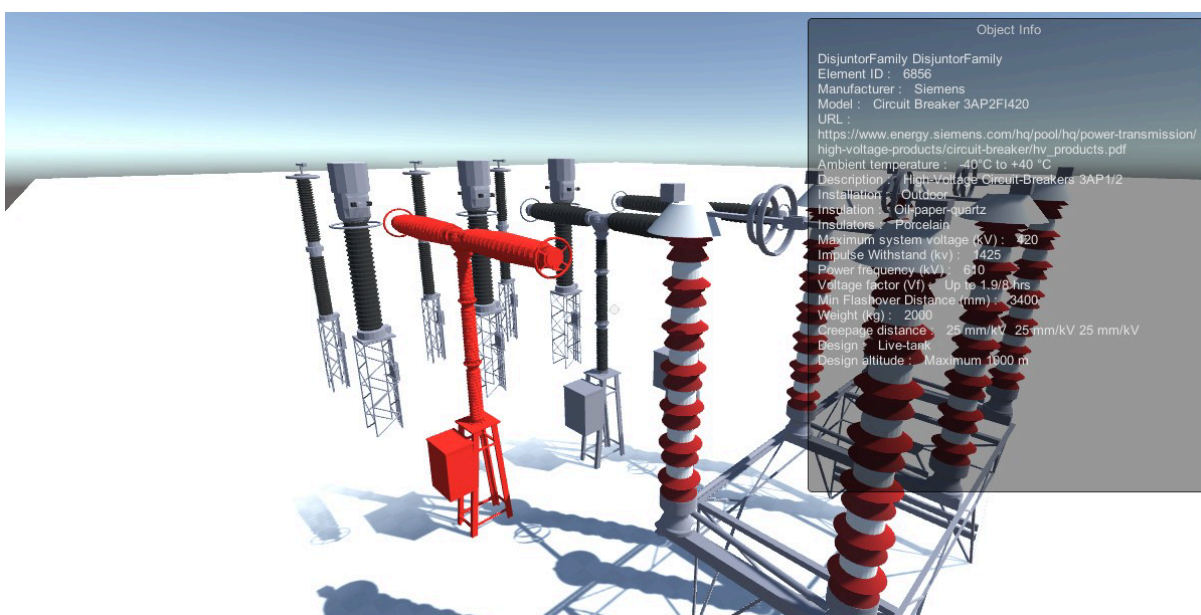
A perspectiva de Crespo e Ruschel (2007) sobre o BIM como uma ferramenta focada na colaboração, interoperabilidade e reutilização da informação alinha-se diretamente com os benefícios de redução de custos, segurança e sustentabilidade. A gestão integrada da informação, a capacidade de simulação e a melhor coordenação entre as disciplinas, possibilitadas pelo BIM, representam um avanço significativo em direção a processos construtivos mais eficientes, econômicos, seguros e ambientalmente conscientes. A maturidade organizacional e a adoção de metodologias de trabalho adequadas, complementares ao uso das ferramentas BIM, são essenciais para que esses benefícios se materializem plenamente.

A proposta de Cardoso *et al.* (2019) para a integração do *Building Information Modeling* (BIM) com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) em projetos de subestações de energia oferece perspectivas claras de redução de custos e aumento da segurança. Os resultados esperados dessa integração, como a redução do custo de logística por demanda de manutenções e a prevenção de possíveis acidentes, demonstram o potencial do BIM para otimizar as operações e mitigar riscos no ciclo de vida das subestações. Estes benefícios diretos sublinham a capacidade do BIM de impactar positivamente os aspectos financeiros e de segurança em empreendimentos do setor elétrico.

Ademais, Cardoso *et al.* (2019) enfatizam que o BIM proporciona uma melhor documentação e visualização de projetos, o que otimiza significativamente a coordenação das equipes multidisciplinares envolvidas. Ao unificar as diversas disciplinas em um único modelo, o BIM facilita a identificação e resolução de conflitos de projeto de forma precoce,

contribuindo para a redução de retrabalho e, consequentemente, para a diminuição dos custos globais do projeto. A *Figura 17* apresenta renderizações de modelos 3D desenvolvidos com BIM, evidenciando essa clareza na visualização e a integração das informações proporcionadas pelo BIM, que permitem tomadas de decisão mais assertivas e eficientes, evitando dispêndios desnecessários em etapas posteriores da construção e operação.

Figura 17 – Renderizações de modelos 3D desenvolvidos com BIM.



(Fonte: Cardoso *et al.*, 2019)

A associação da metodologia BIM com os softwares de Sistema de Inteligência Geográfica (SIG), conforme proposto por Cardoso *et al.* (2019), traz benefícios adicionais para a redução de custos e a otimização de processos. Essa integração permite evitar o retrabalho por erro de integração de vários projetos, gerar uma estimativa de materiais mais precisa e facilitar o planejamento de manutenções preventivas, corretivas e preditivas. Os principais benefícios dessa integração para a manutenção e operação de subestações de energia estão apresentados na *Tabela 8*. Ao otimizar os processos de manutenção e garantir uma quantificação de materiais mais acurada, o BIM contribui para a redução dos custos com mão de obra e insumos, tornando a gestão dos ativos das subestações mais eficiente e econômica.

Tabela 8 – Benefícios da integração BIM-SIG na manutenção e operação de subestações de energia.

Benefício	Descrição
Redução de custos logísticos	Planejamento otimizado do deslocamento de equipes com base em mapas georreferenciados precisos.

Prevenção de acidentes	Visualização dos ativos no contexto geográfico com informações detalhadas de riscos e zonas de segurança.
Atualização eficiente de informações	Potencial para atualizações em tempo real com dados georreferenciados e atributos vinculados ao modelo integrado.
Melhoria no desempenho das equipes técnicas	Acesso rápido e preciso a informações integradas BIM-SIG para melhor planejamento e execução das manutenções.
Documentação e visualização aprimoradas	Modelos tridimensionais integrados à localização geográfica facilitam o entendimento e as intervenções nas subestações.
Planejamento eficiente de manutenções preventivas, corretivas e preditivas	Análise integrada permite identificar com antecedência a necessidade de intervenção e agir de forma estratégica.
Redução de custos por retrabalho	Deteção de conflitos e inconsistências entre informações geográficas e modelos BIM antes da execução de obras ou manutenções.
Plataforma para gestão integrada de ativos	Fornece uma base de dados consolidada para operação estratégica, inspeções inteligentes e manutenção sustentável.
Otimização de mão de obra e insumos	Alocação mais precisa de recursos com base no conhecimento exato da localização e especificidades dos ativos.
Facilidade na realocação de equipamentos	Possibilita a verificação prévia de compatibilidade técnica e planejamento da movimentação de ativos entre subestações.

(Fonte: o autor)

A aplicação da metodologia BIM, especialmente integrada ao SIG no contexto de subestações de energia, conforme apresentado por Cardoso *et al.* (2019), oferece um caminho promissor para a redução de custos através da otimização da logística, diminuição do retrabalho e melhor planejamento de materiais e manutenções. A melhor visualização e coordenação proporcionadas pelo BIM também contribuem para um ambiente de trabalho mais seguro, ao permitir a identificação e mitigação de potenciais riscos. Embora o texto não se aprofunde em aspectos de sustentabilidade, a utilização mais eficiente de materiais e o melhor planejamento das intervenções podem, indiretamente, contribuir para práticas mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida das subestações. A implementação do BIM, portanto, alinha-se visando projetos mais eficientes, seguros e economicamente vantajosos.

As observações de Couto *et al.* (2021) reforçam como a metodologia BIM pode impactar positivamente a eficiência e os custos nos projetos de construção. O ambiente BIM facilita intrinsecamente a troca de informações entre os projetistas em tempo real, permitindo que as diversas disciplinas envolvidas no projeto se comuniquem de maneira mais fluida e imediata. Essa comunicação aprimorada, aliada à execução rápida e coordenada das tarefas de

cada disciplina, contribui diretamente para ganhos de eficiência ao otimizar o fluxo de trabalho e reduzir o tempo gasto em atividades desarticuladas ou com informações desatualizadas. A otimização do tempo e a melhor coordenação das equipes são fatores cruciais para a redução de custos em qualquer empreendimento.

Além dos ganhos diretos de eficiência, Couto *et al.* (2021) conclui que a capacidade de concepção síncrona da solução BIM para cada disciplina promove um nível de cooperação maior entre os membros da equipe de projeto. Essa colaboração intensificada, onde as diferentes partes do projeto são desenvolvidas de forma integrada e simultânea, indiretamente contribui para a redução de erros e, conseqüentemente, de custos. A detecção precoce de incompatibilidades e a possibilidade de ajustes em tempo real evitam retrabalhos dispendiosos em fases mais avançadas do projeto ou na própria execução da obra. A visão integrada do projeto proporcionada pelo BIM, portanto, atua como um mecanismo preventivo contra erros que podem gerar custos adicionais significativos.

Embora os excertos de Couto *et al.* (2021) não mencionem diretamente a segurança, a redução de erros e a melhor coordenação propiciadas pelo BIM podem ter um impacto positivo nesse aspecto. Um projeto bem coordenado e com menos inconsistências informacionais tende a levar a uma execução mais precisa e segura no canteiro de obras. A capacidade de visualizar o projeto de forma integrada e identificar potenciais conflitos antecipadamente, conforme discutimos anteriormente com base em outros autores, pode prevenir situações de risco e acidentes durante a construção. A diminuição de retrabalhos também contribui para um ambiente de trabalho mais seguro, evitando a exposição dos trabalhadores a tarefas repetitivas ou emergenciais decorrentes de falhas de planejamento.

No que tange à sustentabilidade, a eficiência aprimorada e a redução de desperdícios inerentes à metodologia BIM podem contribuir indiretamente para práticas mais sustentáveis na construção. A melhor estimativa de materiais, a diminuição do retrabalho e a otimização dos processos podem levar a um uso mais consciente dos recursos naturais e à geração de menos resíduos de construção e demolição. Embora Couto *et al.* (2021) não detalhe esses aspectos, a capacidade do BIM de fornecer informações mais precisas sobre o projeto ao longo de seu ciclo de vida pode embasar decisões mais sustentáveis em relação à escolha de materiais, ao desempenho energético da edificação e à gestão dos recursos.

A pesquisa de Faria (2021) com profissionais do setor de projetos de subestações revela percepções importantes alinhadas a esses benefícios. Uma observação central é que a maior interação entre as áreas do desenvolvimento e o maior nível de detalhamento dos

projetos são considerados grandes vantagens do BIM. Esta maior interação e detalhamento inerentes ao BIM levam a uma melhor coordenação entre as disciplinas, o que, por sua vez, possui um potencial significativo para a redução de custos ao minimizar conflitos e retrabalhos durante as fases de projeto e construção.

Adicionalmente, Faria (2021) aponta que a grande maioria dos profissionais que atuam diretamente no desenvolvimento de projetos de subestações enxerga grandes possibilidades na utilização da tecnologia BIM. Este reconhecimento generalizado do potencial do BIM subentende a percepção dos diversos benefícios que a metodologia pode trazer para o setor, incluindo aqueles relacionados à redução de custos operacionais e de projeto, ao aumento da segurança nas atividades e à otimização de processos. A abertura do setor à implementação do BIM, conforme constatado na pesquisa, reforça a crença nesses potenciais ganhos.

A pesquisa de Faria (2021) também indica uma forte crença de que a implementação da tecnologia BIM pode ser a solução para melhorar a qualidade dos projetos e mitigar os erros que frequentemente ocorrem no segmento de subestações. A mitigação de erros está intrinsecamente ligada à redução de custos, uma vez que erros em projeto podem gerar dispêndios significativos com retrabalhos, alterações em obra e atrasos no cronograma. Além disso, a melhoria na qualidade do projeto, propiciada pelo BIM, pode também contribuir para o aumento da segurança ao permitir uma análise mais precisa e detalhada das instalações, identificando e prevenindo potenciais riscos.

O questionário aplicado por Faria (2021) explora especificamente os benefícios da adoção do BIM para projetos de subestações, listando diversas opções que se conectam diretamente ao nosso tópico. Entre os benefícios apontados, destacam-se a compatibilização dos projetos (reduzindo custos com incompatibilidades), o maior controle e produtividade (otimizando prazos e recursos), a melhoria na precisão das listas de materiais (evitando desperdícios e custos adicionais), o maior nível de detalhamento (minimizando dúvidas e erros em execução) e a coordenação do fluxo de trabalho (aumentando a eficiência). Adicionalmente, benefícios como a mitigação de dúvidas das equipes de execução e montagem e o auxílio à Operação e Manutenção (O&M) no pós-obra também contribuem para a segurança e a eficiência operacional, impactando positivamente os custos a longo prazo.

As observações de Ferreira (2022) reforçam como a metodologia BIM pode gerar ótimos benefícios ao abranger conhecimentos que dão suporte a todo o ciclo de vida de um

empreendimento. Essa abrangência, desde a concepção até a operação e manutenção, permite uma visão holística do projeto, possibilitando a identificação de oportunidades para a redução de custos em diversas etapas, aprimorando a segurança por meio de um melhor planejamento e coordenação, e fomentando a sustentabilidade por meio de escolhas de materiais e sistemas mais eficientes ao longo do tempo.

Ferreira (2022) também destaca que com o BIM é possível trabalhar não apenas na representação do projeto, mas também no seu gerenciamento durante todo o ciclo de vida. A implementação de controles inteligentes nos processos de atuação e análise/avaliação proporcionados pelo BIM resulta em retornos significativos em termos de eficiência, confiabilidade e baixo custo. A redução de custos é uma consequência direta da otimização dos processos, da diminuição de erros e retrabalhos, e da melhor gestão dos recursos ao longo do ciclo de vida do empreendimento, conforme também apontado por outros autores no mesmo artigo.

Embora os excertos fornecidos não detalhem explicitamente os benefícios para a segurança, a eficiência e a confiabilidade mencionadas por Ferreira (2022) podem impactar positivamente este aspecto. Um projeto bem gerenciado, com informações precisas e processos otimizados, tende a minimizar riscos e aumentar a segurança no canteiro de obras e durante a operação e manutenção da edificação. A capacidade do BIM de realizar análises e simulações também contribui para identificar e mitigar potenciais problemas de segurança antes mesmo da execução.

A eficiência proporcionada pelo BIM, conforme mencionado por Ferreira (2022), pode levar a práticas mais sustentáveis. A gestão otimizada dos recursos, a redução do desperdício de materiais devido a informações mais precisas e a possibilidade de analisar o desempenho energético da edificação ao longo do seu ciclo de vida são aspectos que o BIM facilita, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental e para a sustentabilidade do empreendimento.

Abreu, Paiva e Silva (2023) apresentam a implementação de plataformas integradas de GIS e BIM para projetos inteligentes, abrangendo diversas áreas como distribuição de rede elétrica. O objetivo principal desta integração é alcançar maior acertabilidade e detalhes nos projetos, o que consequentemente resulta em maior eficiência na gestão do comissionamento na execução das obras. Esta eficiência se manifesta por decisões mais assertivas, redução de custos e retrabalhos, além da promoção de fluxos de trabalho sincronizados entre as diferentes disciplinas envolvidas no projeto. A compatibilização dos projetos em uma única plataforma,

com a modelagem tridimensional de cada especialidade, contribui significativamente para evitar problemas que poderiam gerar custos adicionais.

Além da eficiência e da redução de custos, Abreu, Paiva e Silva (2023) também indicam que as soluções BIM desempenham um papel crucial na avaliação de projetos e estrutural. Através do BIM, a distribuição de carga e os cálculos se tornam mais econômicos e eficientes em termos de tempo. Adicionalmente, a metodologia BIM orienta construtoras na avaliação de saúde e segurança no local. Essa capacidade de análise e avaliação detalhada contribui diretamente para alcançar a redução de riscos nos projetos de construção, o que está intrinsecamente ligado à prevenção de acidentes e, conseqüentemente, à diminuição de custos associados a eles.

No que se refere à otimização do fluxo de trabalho, Abreu, Paiva e Silva (2023) classificam os benefícios associados ao uso de soluções integradas de GIS e BIM. Entre esses benefícios, destacam-se a redução na duração geral do projeto e a diminuição nos custos totais de construção. A aprovação e as permissões mais rápidas do plano também são apontadas como vantagens significativas. A capacidade de planejar e executar projetos de forma mais ágil e com custos controlados é um dos pilares dos benefícios proporcionados pela integração GIS-BIM.

Embora os excertos fornecidos por Abreu, Paiva e Silva (2023) não detalhem explicitamente os benefícios para a sustentabilidade, a eficiência aprimorada, a redução de desperdícios decorrente da diminuição de retrabalhos e a possibilidade de um melhor planejamento do uso de materiais, resultados da integração GIS-BIM, podem contribuir indiretamente para práticas de construção mais sustentáveis. A tomada de decisões mais assertivas e a melhor coordenação entre as disciplinas, facilitadas por essas ferramentas, podem levar a escolhas de projeto e execução mais conscientes em relação ao impacto ambiental.

A metodologia Building Information Modeling (BIM) surge como uma abordagem transformadora para a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), oferecendo benefícios significativos em termos de redução de custos, segurança e sustentabilidade. A implementação de plataformas integradas GIS e BIM permite uma maior acertabilidade e detalhamento dos projetos, resultando em maior eficiência na gestão do comissionamento e na execução das obras, com conseqüente redução de custos e retrabalhos, além de fluxos de trabalho sincronizados.

No âmbito da redução de custos, o BIM auxilia na avaliação de projetos e estrutural, otimizando a distribuição de carga e cálculos, economizando tempo e recursos. A capacidade de compatibilizar projetos em uma única plataforma tridimensional evita problemas que poderiam gerar custos adicionais. Além disso, a redução na duração geral do projeto e a diminuição nos custos totais de construção são benefícios diretos do uso de soluções integradas de GIS e BIM.

Em relação à segurança, o BIM orienta construtoras na avaliação de saúde e segurança no local, contribuindo para a redução de riscos nos projetos de construção. A visualização global da obra e a representação 3D possibilitam decisões mais assertivas, resultando em projetos com menor necessidade de retrabalho e ambientes de trabalho mais seguros. A confiabilidade e precisão do projeto, impulsionadas pelo BIM, também se refletem em instalações mais seguras e eficientes.

Embora os textos não detalhem extensivamente os benefícios diretos para a sustentabilidade, a eficiência aprimorada, a redução de desperdícios decorrente da diminuição de retrabalhos e a possibilidade de um melhor planejamento do uso de materiais, resultados da integração GIS-BIM, contribuem indiretamente para práticas de construção mais sustentáveis. A tomada de decisões mais conscientes em relação ao impacto ambiental é facilitada por essa metodologia. Portanto, o BIM se estabelece como uma ferramenta essencial para a promoção de práticas mais eficientes, seguras e, de forma inerente, mais sustentáveis na indústria da construção.

4.3. ESTUDO DE CASO: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SUBESTAÇÕES COM BIM

A aplicação da Modelagem da Informação da Construção (BIM) pode revolucionar a gestão e o desempenho energético dessas instalações críticas. Um modelo BIM detalhado, enriquecido com informações específicas sobre os equipamentos, como seus padrões de consumo e curvas de desempenho, e integrado com dados de localização geográfica através do Sistema de Inteligência Geográfica (SIG), juntamente com a representação precisa do *layout* da subestação, oferece um ambiente virtual poderoso para diversas análises. Nesse contexto, torna-se viável realizar simulações de consumo energético em diferentes cenários operacionais, identificar perdas de energia através da análise do desempenho dos ativos georreferenciados, e planejar intervenções estratégicas para otimizar o uso de energia, como a substituição de equipamentos ineficientes ou a otimização de sistemas de resfriamento.

Embora os textos fornecidos por Cardoso *et al.* (2019), Ferreira (2022) e Abreu, Paiva e Silva (2023) não apresentem um estudo de caso concreto sobre eficiência energética em subestações utilizando BIM, a literatura geral sobre BIM na indústria da construção civil e, de forma crescente, no setor elétrico, aponta consistentemente para o significativo potencial dessa abordagem para alcançar maior eficiência e sustentabilidade.

O artigo de Crespo e Ruschel (2007) define as Ferramentas BIM como uma "nova geração de ferramentas CAD inteligentes orientadas ao objeto que gerenciam a informação da construção no ciclo de vida do projeto". A ideia de que os objetos modelados devem mostrar um "comportamento inteligente" é central para a discussão sobre eficiência energética. Em uma subestação modelada em BIM, cada componente, como transformadores, disjuntores e sistemas de resfriamento, poderia ser um objeto inteligente contendo informações não apenas geométricas, mas também dados sobre seu consumo energético, eficiência e desempenho operacional.

A capacidade de incorporar essas informações de desempenho energético nos objetos BIM da subestação abre um leque de possibilidades para análise e otimização da eficiência. Por exemplo, seria possível realizar simulações de consumo energético em diferentes cenários operacionais, identificar gargalos de energia e avaliar o impacto de diferentes equipamentos ou configurações no consumo total da subestação. Conforme Crespo e Ruschel (2007), o BIM visa a colaboração, interoperabilidade e reutilização da informação. Nesse contexto, as informações energéticas embutidas no modelo poderiam ser compartilhadas entre diferentes disciplinas, como engenheiros elétricos, projetistas e gestores de operação, para uma tomada de decisão mais informada e colaborativa em busca da eficiência energética.

Além disso, a característica de "modelo digital composto por um banco de dados que permite agregar informações para diversas finalidades", conforme descrito no texto ao abordar o conceito de BIM, é crucial para a análise de eficiência energética. Ao integrar dados sobre o consumo de energia, custos operacionais e ciclo de vida dos equipamentos no modelo BIM da subestação, é possível realizar análises mais completas e identificar oportunidades para reduzir o consumo e os custos a longo prazo. A visualização 3D inerente ao BIM também pode auxiliar na compreensão espacial da subestação e na identificação de possíveis melhorias no *layout* para otimizar o fluxo de energia e reduzir perdas.

Embora o estudo de caso específico não esteja presente no texto, a base conceitual fornecida por Crespo e Ruschel (2007) sobre a natureza inteligente e informativa dos modelos BIM demonstra o potencial significativo dessa metodologia para a análise e melhoria da

eficiência energética em infraestruturas complexas como subestações. A capacidade de gerenciar a informação da construção ao longo de todo o ciclo de vida do projeto e de ter objetos com "atributos parametrizáveis como materiais, finalidade, especificações, fabricante, e preço" sugere que a inclusão de parâmetros relacionados à eficiência energética seria uma evolução natural e altamente benéfica dentro do ambiente BIM.

Embora o texto de Cardoso *et al.* (2019) não apresente um estudo de caso concreto sobre eficiência energética em subestações utilizando BIM, ele introduz um aspecto crucial que se interliga fortemente a essa temática: a integração do BIM com o GIS para a gestão de ativos em subestações de energia elétrica. Ao propor essa metodologia, o trabalho de Cardoso *et al.* (2019) abre um caminho promissor para a utilização de dados georreferenciados e informações detalhadas dos equipamentos presentes no modelo BIM para fins de análise e otimização do consumo de energia. Essa perspectiva complementa a ideia de Crespo e Ruschel (2007) sobre a necessidade de objetos BIM modelados demonstrarem um "comportamento inteligente", o que, no contexto da eficiência energética, implicaria a inclusão de dados sobre o desempenho energético dos ativos.

A integração entre BIM e SIG, conforme proposto por Cardoso *et al.* (2019), permite enriquecer o modelo BIM da subestação com informações de localização geográfica precisa e dados espaciais relevantes. Essa combinação possibilita uma visão mais abrangente do contexto em que a subestação está inserida, influenciando potencialmente o consumo de energia. Por exemplo, dados climáticos georreferenciados poderiam ser vinculados aos equipamentos no modelo BIM para analisar o impacto das condições ambientais no desempenho e consumo energético dos transformadores ou sistemas de refrigeração. Além disso, a gestão de ativos facilitada pela integração SIG-BIM pode incluir informações sobre o ciclo de vida dos equipamentos e seus padrões de consumo ao longo do tempo, elementos essenciais para identificar ineficiências e planejar substituições ou otimizações visando a eficiência energética.

O trabalho de Cardoso *et al.* (2019) enfatiza que a associação das metodologias BIM e SIG proporciona condições para o aprimoramento do desempenho de equipes técnicas durante as etapas de planejamento e execução dos projetos de subestações. No âmbito da eficiência energética, essa melhoria pode se traduzir em análises mais precisas do consumo previsto, na identificação de soluções de projeto mais eficientes e no acompanhamento do desempenho energético dos equipamentos após a implementação. A possibilidade de atualização de informações em tempo real, também mencionada como um dos resultados da

integração BIM-SIG, é fundamental para monitorar o consumo de energia da subestação e identificar desvios ou oportunidades de melhoria contínua.

Embora o foco principal de Cardoso *et al.* (2019) seja a redução de custos de logística de manutenção, a prevenção de acidentes e a atualização de informações, a base para a análise de eficiência energética é estabelecida ao se integrar um modelo tridimensional associado a atributos e informações construtivas (BIM) com uma base de dados utilizada nos meios de produção geográfica por meio de coordenadas espaciais (SIG). Essa união permite que informações sobre o consumo energético dos equipamentos, que poderiam ser atributos dentro do modelo BIM, sejam analisadas em conjunto com dados geográficos e informações de gestão de ativos, proporcionando um panorama mais completo para a tomada de decisões relacionadas à eficiência energética.

O trabalho de Cardoso *et al.* (2019) não apresenta um estudo de caso específico sobre eficiência energética em subestações com BIM, mas a metodologia proposta de integração BIM-SIG para a gestão de ativos cria uma estrutura valiosa para futuras análises e otimizações do consumo de energia. Ao combinar as capacidades de modelagem informativa do BIM com a inteligência espacial do SIG, possibilita-se desenvolver abordagens inovadoras para o monitoramento, análise e melhoria da eficiência energética em subestações, aproveitando o potencial dos "objetos inteligentes" no ambiente BIM para conter e utilizar dados relevantes sobre o desempenho energético dos equipamentos.

Embora o artigo de Ferreira (2022) não apresente um estudo de caso dedicado à eficiência energética em subestações com BIM, ele estabelece as bases para compreender o potencial desta aplicação ao mencionar a capacidade do BIM de abranger a análise de desempenho e a simulação de conforto para atender aos requisitos de baixo consumo de energia e construção sustentável através do BIM nD. O termo BIM nD refere-se à aplicação do BIM que vai além das dimensões mais comuns (3D para geometria, 4D para tempo/cronograma, 5D para custo). Especificamente, a dimensão nD é descrita como a aplicação do BIM em análise de *performance* e simulação de conforto. O objetivo é atender aos requisitos para baixo consumo de energia e construção sustentável. O modelo 3D está presente nessas dimensões nD. Esta menção é crucial, pois indica que as dimensões avançadas do BIM nD podem integrar informações relacionadas ao desempenho energético dos ativos da subestação, permitindo uma avaliação mais completa e informada sobre o seu consumo.

As características intrínsecas ao BIM, detalhadas por Ferreira (2022), como a modelagem paramétrica, onde objetos inteligentes contêm informações além da geometria, podem ser aplicadas aos equipamentos de uma subestação. Transformadores, sistemas de resfriamento, painéis e outros componentes poderiam ter parâmetros definidos, incluindo dados de consumo energético, eficiência em diferentes cargas e perdas de energia. A capacidade de vincular essas informações ao modelo BIM da subestação cria um ambiente digital rico em dados, propício para análises de desempenho energético e identificação de áreas para otimização.

Adicionalmente, Ferreira (2022) discute o potencial de simulação inerente ao BIM. No contexto da eficiência energética em subestações, essa funcionalidade permitiria a criação de modelos virtuais para simular o consumo de energia em diferentes cenários operacionais, como variações de carga, condições climáticas ou a implementação de novas tecnologias para redução do consumo. Através dessas simulações, seria possível avaliar o impacto de diferentes estratégias de eficiência energética antes da sua implementação física, otimizando as decisões e minimizando riscos.

Apesar da ausência de um estudo de caso específico no artigo de Ferreira (2022), a discussão sobre o BIM nD e suas capacidades de análise de desempenho para baixo consumo de energia, juntamente com os conceitos de modelagem paramétrica e simulação, evidenciam um potencial significativo para a aplicação do BIM na melhoria da eficiência energética em subestações. O artigo, ao explorar as diversas funcionalidades do BIM no setor elétrico, prepara o terreno para futuras pesquisas e aplicações práticas que possam levar a estudos de caso concretos nesta importante área.

A menção de Abreu, Paiva e Silva (2023) ao monitoramento de instalações técnicas e rastreamento de consumo de energia usando dados espaciais em soluções GIS e BIM integradas oferece uma conexão direta com o tema. Essa capacidade de rastrear o consumo energético, utilizando a inteligência espacial do GIS combinada com as informações detalhadas do BIM, estabelece uma base fundamental para a análise e eventual melhoria da eficiência energética em subestações.

A integração de GIS e BIM, conforme apresentado por Abreu, Paiva e Silva (2023), permite que dados de localização geográfica e informações detalhadas dos equipamentos da subestação sejam analisados conjuntamente. No contexto da eficiência energética, isso significa que o consumo de energia de cada componente da subestação pode ser espacialmente referenciado e vinculado às suas características técnicas no modelo BIM. Por

exemplo, é possível monitorar o consumo de transformadores específicos em diferentes áreas geográficas e correlacionar esse consumo com fatores ambientais ou padrões de carga, possibilitando a identificação de equipamentos com desempenho abaixo do esperado ou áreas com maior demanda energética.

As ferramentas de análise inerentes às soluções GIS e BIM integradas, mencionadas por Abreu, Paiva e Silva (2023) no contexto de dados espaciais, podem ser aplicadas para identificar ineficiências energéticas em subestações. Ao rastrear e analisar o consumo de energia ao longo do tempo e em diferentes condições, é possível detectar padrões anormais, perdas de energia ou equipamentos operando fora de sua faixa ideal de eficiência. Essa análise pode levar à identificação de oportunidades para otimizar o uso de energia, como a substituição de equipamentos obsoletos por modelos mais eficientes, a implementação de sistemas de controle de iluminação inteligentes ou a otimização do resfriamento dos equipamentos em função das condições ambientais.

Embora o texto de Abreu, Paiva e Silva (2023) não apresente um estudo de caso específico sobre a aplicação de GIS e BIM para eficiência energética em subestações, a capacidade de monitorar instalações técnicas e rastrear o consumo de energia usando dados espaciais demonstra claramente o potencial dessas ferramentas para essa finalidade. A integração dessas tecnologias permite uma análise mais profunda e contextualizada do consumo energético, preparando o terreno para futuros estudos de caso que possam detalhar a aplicação prática do BIM na otimização da eficiência energética em subestações.

A discussão sobre o potencial do BIM para a eficiência energética em subestações, embora não sustentada por estudos de caso específicos nos textos de Ferreira (2022) e Abreu, Paiva e Silva (2023), revela-se promissora. A capacidade do BIM nD de realizar análises de desempenho e simulações de conforto para baixo consumo de energia, aliada à modelagem paramétrica de equipamentos com dados de consumo energético e a possibilidade de simular o consumo em diversos cenários, estabelece uma base sólida para a otimização. A integração com sistemas GIS, conforme mencionado por Abreu, Paiva e Silva (2023), possibilita o monitoramento espacial do consumo e a análise de ineficiências energéticas. Apesar da ausência de estudos de caso detalhados nos textos iniciais, a literatura mais ampla sobre BIM na construção civil e, crescentemente, no setor elétrico, converge para o entendimento de que um modelo BIM rico em informações sobre equipamentos, sua localização georreferenciada e o layout da subestação tem um potencial significativo para simulações de consumo,

identificação de perdas e planejamento de intervenções focadas na otimização do uso de energia (Ferreira, 2022)(Abreu, Paiva e Silva, 2023).

5. CONCLUSÃO

5.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS

A síntese dos resultados referentes à implementação do *Building Information Modeling* (BIM) na manutenção e operação de subestações elétricas aponta avanços significativos em termos de precisão, eficiência e sustentabilidade, embora ainda existam desafios a serem enfrentados. A tecnologia BIM tem se mostrado uma ferramenta poderosa para o setor elétrico, permitindo maior controle das atividades e melhor organização da informação, especialmente no contexto da rede básica. Essa aplicação representa um passo estratégico na modernização do setor, ao oferecer soluções que otimizam o tempo, reduzem custos e melhoram a gestão de ativos.

A centralização das informações em um único modelo tridimensional proporciona benefícios tangíveis na fase de manutenção, com destaque para a precisão documental. O BIM possibilita que todos os dados dos componentes e sistemas das subestações estejam acessíveis de forma integrada, o que facilita a consulta e o planejamento de intervenções técnicas. Essa integração, aliada à visualização detalhada da infraestrutura, contribui para a identificação rápida de falhas e para uma manutenção mais eficaz.

Em termos de eficiência operacional, a implementação do BIM permite uma melhor gestão dos ativos energéticos, ao oferecer uma quantificação precisa de materiais e informações exatas sobre a localização e as características dos equipamentos. Isso reduz o tempo necessário para inspeções e reparos, além de minimizar o retrabalho. O uso de modelos digitais também facilita a aplicação de controles inteligentes, que auxiliam nas análises e avaliações contínuas do desempenho das instalações.

Contudo, a qualidade dos dados inseridos no sistema BIM é determinante para o sucesso de sua aplicação. A obtenção de resultados confiáveis depende de um processo rigoroso de coleta, verificação e atualização das informações, o que impõe exigências técnicas e metodológicas às equipes envolvidas. Além disso, a interoperabilidade entre o BIM e outras ferramentas, como os sistemas de informação geográfica (GIS) e plataformas SCADA, é fundamental para garantir a consistência dos dados e evitar falhas operacionais.

No que se refere à sustentabilidade, embora o enfoque direto seja limitado, os ganhos indiretos são notáveis. A eficiência operacional propiciada pelo BIM resulta na redução de desperdícios, menor necessidade de retrabalho e planejamento mais eficaz do uso de recursos.

A integração com sistemas GIS permite simulações de consumo energético e identificação de perdas, o que favorece práticas sustentáveis. Assim, o BIM surge como tecnologia habilitadora na transição energética, promovendo o uso racional da energia e o alinhamento com metas ambientais.

Apesar das vantagens, a adoção do BIM enfrenta resistências e obstáculos estruturais. A necessidade de treinamento especializado, aliada à curva de aprendizado associada à tecnologia, representa um desafio considerável, especialmente para profissionais acostumados com métodos convencionais. A resistência à mudança pode comprometer o aproveitamento pleno do BIM, tornando essencial o investimento em capacitação e na criação de uma cultura organizacional aberta à inovação.

Outro desafio importante diz respeito à compatibilidade com sistemas legados. Em muitas subestações, ainda são utilizadas tecnologias desatualizadas, o que dificulta a integração com o BIM. Essa limitação técnica exige investimentos adicionais em infraestrutura digital e na atualização das plataformas utilizadas pelas empresas do setor. A interoperabilidade, portanto, precisa ser tratada como um pilar estratégico para o sucesso da transformação digital no ambiente operacional das subestações.

As perspectivas futuras são promissoras e apontam para uma maior integração do BIM com tecnologias emergentes, como Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA) e sistemas de monitoramento em tempo real. A inclusão de funcionalidades para análise preditiva de falhas e a conexão com sistemas inteligentes de automação podem ampliar significativamente o escopo de atuação do BIM, especialmente na fase de operação das subestações. Essa evolução permitirá não apenas manter, mas antecipar falhas e otimizar a vida útil dos ativos.

A adoção de níveis mais avançados do BIM, com colaboração em rede e integração plena dos agentes envolvidos, poderá redefinir os padrões operacionais da rede básica. Para isso, será necessário superar as barreiras atuais por meio de políticas de incentivo à inovação, investimento contínuo em tecnologias digitais e valorização do capital humano. A *Tabela 9* apresenta uma comparação entre os diferentes níveis do BIM (2D, 3D, 4D, 5D, etc.) e os benefícios associados à sua aplicação na operação. A transição para um modelo mais colaborativo depende do engajamento institucional e da promoção de uma visão de longo prazo.

Tabela 9 – Comparação entre níveis BIM (2D, 3D, 4D, 5D, etc.) e seus benefícios na operação.

Nível BIM	Descrição	Benefícios na Operação
2D (CAD)	Representações bidimensionais tradicionais com uso de ferramentas CAD.	- Visualização básica da geometria da subestação. - Baixa integração com dados operacionais. - Troca de informações pouco eficiente.
3D BIM	Modelo tridimensional com informações paramétricas integradas.	- Visualização intuitiva de ativos. - Acesso direto a dados técnicos, históricos e operacionais. - Suporte à manutenção e inspeções com base em localização precisa.
4D BIM (3D + Tempo)	Adiciona a dimensão tempo ao modelo, vinculando componentes ao cronograma.	- Compreensão da sequência de montagem e intervenções. - Apoio à desmontagem e substituições. - Histórico temporal útil para planejamento futuro.
5D BIM (4D + Custo)	Incorpora orçamento e análise de custos ao modelo.	- Planejamento de orçamento para manutenção e substituição. - Acompanhamento de custos operacionais ao longo do tempo. - Base para decisões financeiras informadas.
nD BIM (6D, 7D, etc.)	Integra múltiplas dimensões adicionais (energia, sustentabilidade, sensores, localização).	- Monitoramento em tempo real com IoT. - Análise de desempenho energético e sustentabilidade (6D). - Gestão espacial com SIG (GIS). - Operação inteligente, preditiva e integrada.

(Fonte: o autor)

A aplicação do BIM na manutenção e operação de subestações elétricas revela-se uma abordagem transformadora, com impactos diretos na eficiência, na sustentabilidade e na redução de custos. Os benefícios potenciais, embora já evidentes, dependem da superação de desafios técnicos, humanos e organizacionais. Com uma estratégia estruturada de implementação, o BIM pode consolidar-se como um dos principais pilares da modernização do setor elétrico brasileiro.

5.2. CONTRIBUIÇÕES PARA A ENGENHARIA ELÉTRICA E A SUSTENTABILIDADE

As contribuições da implementação do *Building Information Modeling* (BIM) para a Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade no contexto de subestações elétricas são multifacetadas e abrangem diversas etapas do ciclo de vida dessas infraestruturas críticas. No âmbito da Engenharia Elétrica, o BIM representa uma evolução significativa em relação aos métodos tradicionais baseados em CAD, oferecendo uma abordagem mais integrada e rica em informações para o projeto, a construção, a operação e a manutenção de subestações. A capacidade de criar modelos tridimensionais paramétricos que contêm não apenas a geometria dos componentes elétricos, mas também informações técnicas detalhadas, como especificações, dados de desempenho e histórico de manutenção, transforma a maneira como os engenheiros elétricos trabalham.

Uma das principais contribuições do BIM para a Engenharia Elétrica reside na melhoria da coordenação e colaboração entre as diferentes disciplinas envolvidas no projeto de subestações. Ao integrar modelos de arquitetura, estrutura, instalações elétricas e eletromecânicas em uma única plataforma, o BIM facilita a detecção precoce de conflitos e interferências entre os sistemas, evitando retrabalhos e atrasos na fase de construção. A visualização 3D proporcionada pelo BIM também aprimora a compreensão do projeto por todas as partes interessadas, desde os engenheiros projetistas até as equipes de construção e operação.

Além disso, o BIM contribui para a otimização do projeto elétrico em si, permitindo a realização de análises e simulações que auxiliam na tomada de decisões mais informadas. Por exemplo, modelos BIM detalhados podem ser utilizados para simular o comportamento de sistemas elétricos em diferentes condições de carga, otimizar o *layout* dos equipamentos para facilitar a manutenção e garantir o cumprimento de normas de segurança. A integração do BIM com Sistemas de Informação Geográfica (GIS), conforme apontado por diversos autores, eleva ainda mais o potencial da ferramenta, permitindo a análise do contexto geográfico das subestações e a gestão integrada de ativos em uma escala territorial mais ampla.

No que tange à manutenção e operação de subestações, o BIM oferece um repositório centralizado de informações que pode ser acessado pelas equipes de campo, fornecendo dados precisos e atualizados sobre todos os componentes e sistemas. Isso facilita o planejamento e a execução de atividades de manutenção preventiva e corretiva, reduzindo o tempo de inatividade das instalações e aumentando a confiabilidade do fornecimento de energia. A possibilidade de integrar o modelo BIM com sistemas de monitoramento em tempo

real, como o SCADA, abre caminho para a implementação de estratégias de manutenção preditiva, antecipando falhas e otimizando a gestão de ativos ao longo de seu ciclo de vida.

Ainda no âmbito da Engenharia Elétrica, o BIM tem um papel crescente na educação e treinamento de novos profissionais. A visualização imersiva de subestações em ambientes virtuais, possibilitada pelo BIM e por tecnologias como a Realidade Virtual (RV) e a Realidade Aumentada (RA), complementa o ensino teórico e prático, facilitando a compreensão do funcionamento dos equipamentos e dos procedimentos de segurança. O desenvolvimento de catálogos interativos de componentes de subestações utilizando RA e a criação de ambientes virtuais para treinamento de operadores demonstram o potencial dessas tecnologias para a formação de engenheiros elétricos mais qualificados.

Em relação à Sustentabilidade, a implementação do BIM em subestações elétricas contribui de diversas maneiras para a redução do impacto ambiental do setor energético. A otimização do projeto, facilitada pelas análises e simulações em ambiente BIM, pode levar à redução do consumo de materiais na construção de novas subestações e na modernização das existentes. A *Tabela 10* apresenta um comparativo entre o consumo de materiais com e sem o uso do BIM em projetos de subestações, evidenciando essa contribuição. A identificação precoce de conflitos e a melhor coordenação entre as disciplinas também minimizam o desperdício de materiais e a geração de resíduos de construção.

Tabela 10 – Comparativo entre consumo de materiais com e sem uso do BIM em projetos de subestações.

Critério	Com BIM	Sem BIM
Quantificação de Materiais	Geração automatizada e precisa de listas de materiais a partir do modelo 3D.	Quantificação parcial e, muitas vezes, manual; maior propensão a erros.
Desperdício de Materiais	Redução significativa de desperdício com detecção antecipada de conflitos.	Desperdício médio estimado entre 5% a 10% devido a retrabalho e falhas de projeto.
Retrabalho	Menor incidência, devido à simulação prévia e visualização precisa do projeto.	Maior incidência, causada por erros não detectados previamente à execução.
Dimensionamento de Materiais	Otimização via cálculos automáticos e sobreposição de peças; em casos, redução de até 5% no uso.	Maior margem de segurança e desperdício por imprecisão no planejamento.

Planejamento e Gestão de Materiais	Integração de dados em repositório centralizado; suporte à logística e gestão eficaz.	Planejamento mais fragmentado; possível desorganização e inconsistência de informações.
Custos Associados aos Materiais	Redução de custos via maior controle, menor desperdício e previsibilidade orçamentária.	Custos mais elevados por conta de erros, desperdício e necessidade de correções no processo.

(Fonte: o autor)

A melhor gestão dos ativos energéticos, proporcionada pelo BIM durante a fase de operação, também contribui para a sustentabilidade. A manutenção mais eficiente e o monitoramento do desempenho dos equipamentos permitem identificar e corrigir perdas de energia, otimizando o uso dos recursos e reduzindo a necessidade de geração adicional. A integração com GIS possibilita o monitoramento espacial do consumo e a análise de ineficiências energéticas em uma perspectiva sistêmica.

Além disso, o BIM pode ser utilizado para analisar o ciclo de vida dos equipamentos das subestações, auxiliando na escolha de materiais mais sustentáveis e na implementação de práticas de descarte adequadas ao final de sua vida útil. A capacidade de simular o desempenho energético das instalações ao longo do tempo permite a avaliação de diferentes cenários e a adoção de soluções que visam a eficiência energética e a redução da pegada de carbono.

As contribuições do BIM para a Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade no contexto de subestações elétricas são significativas e abrangentes. Desde a melhoria do projeto e da colaboração interdisciplinar até a otimização da manutenção, da operação e da gestão de ativos, o BIM se configura como uma ferramenta fundamental para a modernização e a sustentabilidade da rede básica de energia elétrica. A contínua evolução da tecnologia BIM e sua crescente adoção no setor elétrico prometem impulsionar ainda mais a eficiência, a segurança e a sustentabilidade dessas infraestruturas essenciais para a sociedade.

5.3. PERSPECTIVAS FUTURAS: BIM E *SMART GRIDS*

As perspectivas futuras para a integração do *Building Information Modeling* (BIM) e das *Smart Grids* no setor de energia elétrica, especialmente no contexto de subestações, são promissoras e apontam para uma transformação digital abrangente da rede básica. A

metodologia BIM, que evoluiu de uma ferramenta de projeto para um sistema integrado de gestão do ciclo de vida dos ativos, apresenta um potencial significativo para otimizar o planejamento, a construção, a operação e a manutenção de infraestruturas energéticas, elementos cruciais para o desenvolvimento e aprimoramento das *Smart Grids*. A *Tabela 11* apresenta uma linha do tempo da evolução do BIM do 3D ao 7D, com destaque para o plano da FURNAS até 2028.

Tabela 11 – Linha do tempo da evolução BIM 3D → 7D com destaque para o plano da FURNAS até 2028.

Ano / Etapa	Dimensão BIM	Descrição da Dimensão	Evolução no Setor Elétrico	Iniciativas da FURNAS
Pré-2010	2D / CAD	Desenhos técnicos bidimensionais.	Uso predominante de CAD em projetos elétricos.	Sem uso sistemático do BIM.
2010 – 2015	3D	Modelagem tridimensional com informações geométricas.	Início da adoção de BIM em projetos-piloto.	Primeiras análises sobre viabilidade do BIM.
2015 – 2018	4D (Tempo)	Integração com cronogramas de execução.	Planejamento visual de obras começa a ser utilizado.	Início da implantação de metodologias de planejamento com BIM.
2018 – 2020	5D (Custos)	Orçamentação automatizada vinculada ao modelo.	Consolidação do BIM como ferramenta de orçamento em algumas empresas.	Mapeamento dos processos de projetos básicos de subestações.
2020 – 2023	6D (Sustentabilidade)	Análise de eficiência energética e impacto ambiental.	Crescimento do interesse em construção sustentável.	Desenvolvimento do sistema gestor BIM integrado ao GIS.

2024 – 2025	7D (Gestão e Manutenção)	Dados para operação e manutenção ao longo do ciclo de vida.	Integração com SCADA e GIS para manutenção preditiva.	Integração BIM-GIS com parametrização geoespacial e criação de versões de modelos.
2026 – 2028	iBIM / BIM Nível 3	Plataforma colaborativa integrada com dados em nuvem.	Previsão de consolidação da interoperabilidade total.	Aperfeiçoamento do sistema gestor; ampliação da aplicação do BIM em todas as fases do projeto.

(Fonte: o autor)

Uma das principais perspectivas futuras reside na integração cada vez mais profunda do BIM com outras tecnologias digitais, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a Internet das Coisas (IoT), a Realidade Virtual (RV) e Aumentada (RA), e a Inteligência Artificial (IA).

A combinação BIM-SIG, por exemplo, oferece uma poderosa plataforma para a gestão de projetos de infraestrutura, permitindo a análise espacial e a visualização integrada de dados geográficos e informações detalhadas dos modelos BIM de subestações. Essa integração facilita a seleção de locais, o planejamento energético, o projeto estrutural e a avaliação de desempenho.

A incorporação da IoT aos modelos BIM representa outra evolução significativa para as *Smart Grids*. Sensores e dispositivos IoT instalados nas subestações poderão fornecer dados em tempo real sobre o desempenho dos equipamentos, condições ambientais e consumo de energia, alimentando os modelos BIM e permitindo um monitoramento contínuo e preciso.

O uso de Realidade Virtual e Aumentada também apresenta perspectivas promissoras para o futuro da operação e manutenção de subestações no contexto das *Smart Grids*. A *Figura 18* ilustra o uso de óculos de realidade virtual com visualização do modelo BIM de uma subestação, demonstrando como ambientes virtuais imersivos baseados em modelos BIM podem ser utilizados para treinamento de operadores em cenários seguros e controlados.

Figura 18 – Uso de óculos de realidade virtual com visualização do modelo BIM de uma subestação

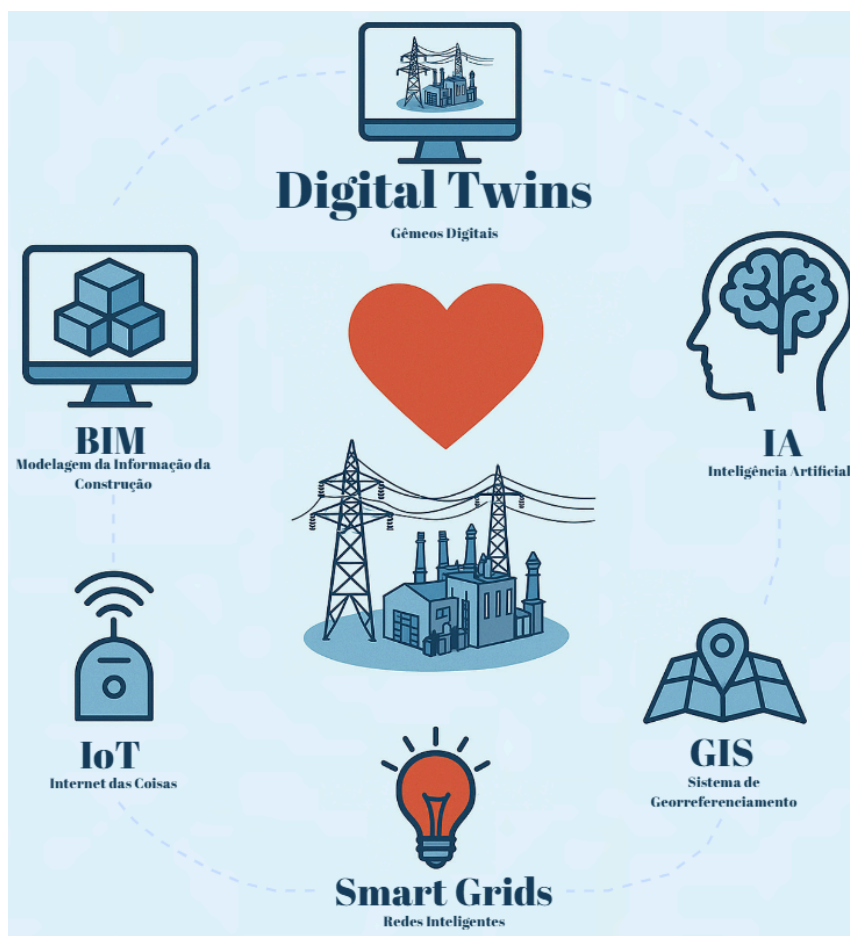


(Fonte: Barreto, 2023)

A Inteligência Artificial tem o potencial de revolucionar a análise dos dados integrados nos modelos BIM, provenientes de diversas fontes. Algoritmos de IA podem identificar padrões, prever falhas, otimizar o consumo de energia e auxiliar na tomada de decisões estratégicas. A evolução do BIM em termos de suas dimensões é fundamental para as perspectivas futuras. A transição do BIM 3D para o BIM 6D e 7D permitirá que as subestações sejam projetadas com maior foco na eficiência energética, redução de perdas técnicas e otimização dos custos.

A interoperabilidade e a padronização dos dados BIM continuam sendo desafios importantes. A utilização de padrões abertos como o IFC facilita o intercâmbio de informações entre diferentes softwares e sistemas. Outra perspectiva futura importante é o desenvolvimento de plataformas de gestão BIM específicas para o setor elétrico, como o sistema gestor proposto por Silva *et al.* (2022). Essas plataformas visam centralizar e gerenciar todas as informações inerentes aos projetos e à manutenção de subestações. A *Figura 19* apresenta uma visão sistêmica de uma subestação conectada digitalmente — integrando BIM, IoT, IA e GIS — como o “coração” de uma *Smart Grid*, sintetizando as perspectivas futuras da integração BIM e Smart Grids para subestações elétricas, que envolvem uma sinergia poderosa entre a modelagem inteligente da informação e as tecnologias de redes elétricas avançadas.

Figura 19 – Visão sistêmica de uma subestação conectada digitalmente — BIM, IoT, IA, GIS — como “coração” de uma Smart Grid.



(Fonte: o autor)

Diante das contribuições e desafios identificados neste trabalho, propõem-se as seguintes direções para trabalhos futuros:

1. **Desenvolvimento de plataformas BIM específicas para o setor elétrico:** Investigar e prototipar ambientes de gestão BIM voltados exclusivamente para subestações e demais ativos da rede básica, com integração nativa a sistemas SCADA e GIS.
2. **Modelagem de subestações inteligentes em BIM 6D e 7D:** Estudar a incorporação de parâmetros energéticos, operacionais e financeiros nos modelos BIM, com foco na eficiência energética, sustentabilidade e gestão do ciclo de vida dos ativos.
3. **Aplicações de Inteligência Artificial em modelos BIM operacionais:** Explorar como algoritmos de aprendizado de máquina podem ser aplicados para prever falhas, otimizar manutenções e apoiar decisões estratégicas com base em dados oriundos dos modelos BIM integrados a sensores IoT.

4. **Simulações imersivas para capacitação técnica:** Avaliar a eficácia de ambientes de Realidade Virtual e Aumentada, baseados em BIM, para treinamentos em operação e manutenção de subestações, visando segurança, padronização e redução de custos de capacitação.
5. **Estudos de interoperabilidade entre BIM e Smart Grid:** Realizar investigações aprofundadas sobre a padronização de dados e fluxos de integração entre plataformas BIM, sistemas de automação da rede elétrica e tecnologias emergentes (como blockchain e gêmeos digitais).
6. **Análise comparativa de desempenho e sustentabilidade:** Conduzir estudos empíricos que comparem projetos de subestações executados com e sem uso de BIM em aspectos como consumo de materiais, tempo de execução, custo total e impacto ambiental.
7. **Avaliação do tempo necessário para a transição ao BIM:** Investigar o tempo médio necessário para que organizações do setor elétrico realizem a migração de processos tradicionais para o ambiente BIM, considerando fatores como porte da empresa, grau de digitalização, capacitação das equipes e complexidade dos projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. O.; PAIVA, J. C. de; SILVA, M. C. da. **Integração GIS – BIM**. Orientador: Paulo Cesar da Silva Emanuel. [S. l.], 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica: Módulo 2 – Classificação das Instalações**. Revisão 0. Resolução Normativa nº 1.001/2022, Brasília, DF, 2022.

ALAHLMAD, Mahmoud *et al.* **The “BIM’S 4D+” Dimension: Real Time Energy Monitoring**. In: IEEE GCC CONFERENCE AND EXHIBITION (GCC), 2011, Dubai. Anais... Dubai: IEEE, 2011. p. 1-6.

AMARNATH, C. B (2016) **Global Trends in BIM Research**. BIM ThinkSpace, 28 set. 2016. Disponível em: <https://www.bimthinkspace.com/2016/09/global-trends-in-bim-research.html> > Acesso em: 15 abr. 2025.

AZHAR, S. **Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry**. Leadership and Management in Engineering, v. 11, n. 3, p. 241-252, 2011.

BARCELOS, Mariana Afonso *et al.* **Uso de realidade aumentada na visualização de componentes de subestações de energia elétrica**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

BARRETO, C. **Realidade Virtual Aplicada na Engenharia de Subestações Elétricas**. *LinkedIn*, 18 mar. 2023. Acesso em: 15 mar. 2025.

BRASIL. **Governo Federal lança estratégia para promover inovação na indústria da construção**. ASMETRO-SN, 17 maio 2018. Disponível em: <https://asmetro.org.br/portalsn/2018/05/17/governo-federal-lanca-estrategia-para-promoverinovacao-na-industria-da-construcao/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CARDOSO, A. *et al.* **Metodologia utilizando o conceito BIM (Building Information Modeling) aplicada a projetos de subestações integrado a Sistema de Inteligência Geográfica (SIG)**. In: EVENTO X, 2019, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: [s.n.], 2019. 9 p.

CASEY, Michael J. **Work in progress: How building informational modeling may unify IT in the civil engineering curriculum**. In: FRONTIERS IN EDUCATION CONFERENCE, 38., 2008. Anais... IEEE, 2008. p. S4J-5-S4J-6.

COUTO, C. C. R. *et al.* **Análise comparativa de ferramentas CAD e BIM para projetos de instalações elétricas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 3., 2021, Uberlândia. Anais [...] Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1-7. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/629>. Acesso em: 3 ago. 2021.p.1-8.

CRESPO, Cláudia Campos; RUSCHEL, Regina Coeli. **Ferramentas BIM: um desafio para a melhoria no ciclo de vida do projeto**. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE

INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 3., 2007. Anais... [S.l.: s.n.], 2007.

DENIZ, Gulbin Ozcan. **Emerging CAD and BIM trends in the AEC education: An analysis from students' perspective**. Journal of Information Technology in Construction, [s. l.], v. 23, p. 138-156, 2018. Disponível em: <https://www.itcon.org/paper/2018/7>. Acesso em: 15 mar. 2025.

FARIA, C. H. L. **Plataforma BIM: O Potencial De Sua Implementação Em Projetos De Subestações**. 2021. 39 f. : il., color. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Acesso em: 15 mar. 2025.

FERREIRA, A. R.; SOUSA, L. C. O. **Revisão da literatura: uso do conceito BIM em projetos do setor elétrico nos cenários (Inter)Nacional**. Research, Society and Development, v. 11, n. 6, e37211629144, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29144>. Acesso em: 15 mar. 2025.

FMI CORPORATION; AUTODESK. **Construction disconnected: the high cost of poor data and miscommunication**. 2021. Disponível em: <https://www.autodesk.com/industry/construction/construction-disconnected>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FURNAS. **Furnas implanta metodologia BIM integrada a sistema GIS**. MundoGEO, 20 out. 2022. Disponível em: <https://mundogeo.com/2022/10/20/furnas-implanta-metodologia-bim-integrada-a-sistema-gis/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

JACOSKI, Claudio Alcides. **Integração e interoperabilidade em projetos de edificações - uma implementação com IFC/XML**. 2003. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2003.

LIU, Hua; RAN, Ying. **Study on BIM technology application prospect in engineering management industry**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION MANAGEMENT, INNOVATION MANAGEMENT AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 6., 2013. Anais... IEEE, 2013. p. 278-280.

MATTIOLI, L. R. **2D–3D Spatial Registration for Remote Inspection of Power Substations**. 2021. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.198>. Acesso em: 15 mar. 2025.

MIETTINEN, R.; PAAVOLA, S. **Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling**. Automation in Construction, v. 43, p. 84-91, 2014.

MITNETZ STROM. **Schaltanlage als Digitaler Zwilling**. BUSINESS GEOMATICS, 4 de fevereiro de 2021. Acesso em: 15 mar. 2025.

MOREALE, Michel dos Santos. **Técnicas para treinamento de operadores de sistema elétrico utilizando simulador com base na interface de tempo real**. 2007. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PANIZZA, Alexandre de Castro *et al.* **Colaboração em CAD no projeto de arquitetura, engenharia e construção: estudo de caso.** [S.l.: s.n.], 2004.

REDAÇÃO SIENGE. **Do 3d Ao 7d – Entenda Todas As Dimensões Do BIM.** Sienge, 8 de janeiro de 2020. Disponível em: <https://sienge.com.br/blog/dimensoes-do-bim/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ROCHA, V. M. **Realidade Aumentada Aplicada À Redução De Riscos Na Segurança Do Trabalho Em Subestações Elétricas.** 2021. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) - Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Acesso em: 15 mar. 2025.

SACKS, R. *et al.* **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors.** 3. ed. Hoboken: Wiley, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568.

SAMPAIO, Alcinia Zita. **Historical Evolution of Technical Drawing in Engineering.** Lisboa: IST Press, 2018.

SILVA, A. C. *et al.* **Virtual Reality for Monitor and Control of Electrical Substations.** An Acad Bras Cienc, v. 93, n. 1, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120200267.

SILVA, M. M. da *et al.* **Sistema Gestor Para Adoção De Metodologia BIM Em Subestações De Energia Elétrica.** 2022. Acesso em: 15 mar. 2025.

SPIE setzt auf Virtual Reality. [S. l.]: SPIE, 2021. Acesso em: 15 mar. 2025.

SUCCAR, B. **Building Information Modelling Framework: A Research And Delivery Foundation For Industry Stakeholders.** Automation in Construction, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2009.

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: **Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft.** VDE Studie, Offenbach am Main, Mai 2023.

VOLK, Rebekka; STENGEL, Julian; SCHULTMANN, Frank. **Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs.** Automation in Construction, v. 38, p. 109-127, 2014.