



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO FINAL DE CURSO - TFC

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E TECNOLÓGICA DE SUBESTAÇÕES DIGITAIS DE ENERGIA ELÉTRICA

THAÍS BATISTA PARREIRA

Orientador:

Prof. Dr. Jorge Luiz Brito de Faria

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E
TECNOLÓGICA DE SUBESTAÇÕES DIGITAIS DE
ENERGIA ELÉTRICA

THAÍS BATISTA PARREIRA

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Jorge Luiz Brito de Faria

Cuiabá-MT

— Junho de 2023 —

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

P259a Parreira, Thaís Batista.

Análise de viabilidade econômica e tecnológica de subestação digitais de energia elétrica [recurso eletrônico] / Thaís Batista Parreira. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 65 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Jorge Luiz Brito de Faria.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Subestação digital; Automação; Digitalização; Cibersegurança; Eficiência energética. I. Faria, Jorge Luiz Brito de, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.036723/2023-49

Interessado: Thais Batista Parreira

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E TECNOLÓGICA DE SUBESTAÇÕES DIGITAIS DE ENERGIA ELÉTRICA

ALUNO: THAÍS BATISTA PARREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de Maio de 2023.

Nota: ...10,00 (DEZ).....

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Jorge Luiz Brito de Faria - Orientador

Prof. José Mateus Rondina - Examinador(a)

Eng. Luis Fellipe Ferreira Reis - Examinador(a)



Documento assinado eletronicamente por **LUIS FELLIPE FERREIRA REIS, Usuário Externo**, em 31/05/2023, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE MATEUS RONDINA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 31/05/2023, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JORGE LUIZ BRITO DE FARIA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 31/05/2023, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5841367** e o código CRC **2330EF78**.

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica. À minha mãe e irmã, que sempre me apoiaram e incentivaram a buscar meus sonhos, mesmo nos momentos mais difíceis. Ao meu orientador, que me guiou com paciência, sabedoria e dedicação, e me ajudou a aprimorar minha pesquisa. Ao meu melhor amigo e parceiro de vida, Gabriel, por todo apoio e incentivo. Aos meus amigos e colegas de curso, que compartilharam comigo momentos de alegria, desafios e aprendizado. A todos vocês, minha gratidão é imensa e minha admiração é eterna. Sem o amor, o carinho, o suporte e o estímulo de cada um, este trabalho não seria possível. Que esta dedicação seja uma pequena homenagem àqueles que me ajudaram a trilhar este caminho.

“A jornada de mil quilômetros começa com o primeiro passo”

Rei Leão.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças e sabedoria para concluir este trabalho. Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, que sempre me apoiou e me incentivou a buscar o conhecimento e a excelência em tudo o que faço. Agradeço também a minha irmã, que me deu todo o suporte necessário e foi uma fonte constante de alegria e motivação. Agradeço ao meu orientador, Jorge, pela paciência, sabedoria e dedicação em me ajudar a desenvolver este trabalho. Seus ensinamentos, sugestões e críticas foram fundamentais para o meu crescimento como pesquisador. Agradeço ao meu parceiro de vida, Gabriel Gubolin, por estar sempre ao meu lado, por ser minha estrutura e apoio durante o fim da minha formação acadêmica. Agradeço aos meus amigos e colegas de curso, pelos momentos de descontração, amizade e companheirismo. Agradeço em especial aos que sempre estiveram presentes deixando esse curso um pouco mais fácil. Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Sem o apoio e a colaboração de cada um, este trabalho não seria possível. O meu sincero agradecimento a todos!

Resumo

PARREIRA, T.B. **Análise de viabilidade econômica e tecnológica de subestações digitais de energia elétrica.** 2023. 64f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da implementação de subestações digitais, considerando aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. Serão abordados temas como as tecnologias utilizadas em subestações digitais, os desafios na implementação desses sistemas, as normas e regulamentações relacionadas e a importância da cibersegurança em subestações digitais. A partir da revisão bibliográfica e análise crítica dos temas abordados, espera-se apresentar conclusões e recomendações que possam ser úteis para profissionais e pesquisadores envolvidos com a modernização da infraestrutura elétrica.

Palavras-chave: *Subestação digital; Automação; Digitalização; Cibersegurança; Eficiência energética.*

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the feasibility of implementing digital substations from a technical, economic, and regulatory perspective. Topics such as the technologies used in digital substations, the challenges in implementing these systems, the related standards and regulations, and the importance of cybersecurity in digital substations will be addressed. From the literature review and critical analysis of the topics addressed, it is expected to present conclusions and recommendations that may be useful to professionals and researchers involved in the modernization of the electrical infrastructure.

Keywords: *Digital Substations, Power Systems, Automation, Energy Efficiency, Cybersecurity.*

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras | ix |
| Lista de Tabelas | x |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | xi |
| Introdução | 1 |
| 1 Problemática | 2 |
| 2 Justificativa | 2 |
| 3 Objetivos | 3 |
| 3.1 Objetivo Geral | 3 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 1 Referencial Teórico | 4 |
| 1.1 Fundamentos de subestações elétricas e suas principais funções | 4 |
| 1.1.1 Tipos de subestações | 5 |
| 1.1.2 Composição de uma subestação | 7 |
| 1.1.3 Subestação Digital | 11 |
| 1.2 Digitalização na área de energia elétrica | 14 |
| 1.2.1 Sistemas de automação | 15 |
| 1.2.2 Sistemas de proteção | 16 |
| 1.2.3 Tecnologias de comunicação | 17 |
| 1.2.4 Tecnologias utilizadas em subestações digitais | 18 |
| 1.3 Regulamentações e normas técnicas | 21 |
| 2 Metodologia | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Análises de Viabilidade | 25 |
| 3.1 | Vantagens da implantação de subestações digitais | 26 |
| 3.2 | Diferenças entre subestações | 29 |
| 3.3 | Análise econômica | 30 |
| 3.4 | Desafios e Limitações | 34 |
| 3.4.1 | Aplicações | 37 |
| 3.4.2 | Tecnologias | 37 |
| 4 | Resultados e Persepectivas | 40 |
| 4.1 | Resultados | 40 |
| 4.2 | Tendências futuras e perspectivas | 42 |
| 5 | Considerações Finais | 46 |
| | Bibliografia | 51 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Sistema Elétrico de Potência - SEP | 4 |
| 1.2 | Subestação Elevadora. | 5 |
| 1.3 | Subestação de distribuição. | 6 |
| 1.4 | Subestação Desabrigada. | 6 |
| 1.5 | Subestação Móvel. | 7 |
| 1.6 | Disjuntor a óleo de uma subestação. | 9 |
| 1.7 | Chave Seccionadora. | 10 |
| 1.8 | Diagrama estrutural das subestações convencionais x digitais. | 12 |
| 1.9 | Representação Rede Elétrica Inteligente. | 13 |
| 1.10 | Representação Rede Elétrica Inteligente. | 15 |
| 1.11 | Diagrama de blocos do uso do SCADA em redes inteligentes. | 16 |
| 1.12 | Layout Subestação Digital. | 19 |
| 3.1 | Comparação entre subestação digital x convencional. | 26 |
| 3.2 | Subestação Lorena. | 27 |
| 3.3 | Benefícios da Subestação Digital da Eneel. | 28 |
| 3.4 | Comparação sobre a manutenção na SE Convencional x Digital. | 32 |
| 3.5 | Ameaças Cibernéticas no sistema de uma subestação digital. | 35 |
| 3.6 | IoT no setor elétrico e suas possíveis aplicações. | 38 |
| 3.7 | Fluxograma da ferramenta de previsão de falhas. | 39 |
| 4.1 | Nível de automação x DEC. | 44 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Normas Aplicáveis e melhores práticas para subestações digitais. | 22 |
| 3.1 | Estimativa de cabos para construção da subestação convencional SE Lorena. | 33 |
| 3.2 | Estimativa de cabos para construção da Subestação digital - SE Lorena. | 33 |
| 4.1 | Tabela de Comparação (Fonte: Autoria própria) | 41 |

Lista de Abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica

IEC – International Electrotechnical Commission

CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

AT – alta tensão

MT – média tensão

BT – baixa tensão

CLPs – controladores lógicos programáveis

IHM – interfaces homem-máquina

UREs – unidades remotas de entrada/saída

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

RTUs – Remote Terminal Units

IEDs – Intelligent Electronic Devices

Introdução

O avanço tecnológico tem transformado a forma como a energia elétrica é produzida, distribuída e consumida. As subestações elétricas são um exemplo de infraestrutura que passou por diversas evoluções tecnológicas, desde a utilização de relés eletromecânicos até a automação e digitalização dos sistemas. A subestação digital é um novo modelo de subestação que utiliza tecnologias digitais para monitoramento, controle e proteção dos equipamentos, possibilitando a tomada de decisões mais rápidas e eficientes. A subestação digital é uma tendência na indústria elétrica, uma vez que apresenta diversas vantagens em relação às subestações convencionais, como a redução de custos de operação e manutenção, maior confiabilidade e segurança, além da possibilidade de integração com outras tecnologias, como a geração distribuída e o armazenamento de energia. Entretanto, a implementação de subestações digitais também apresenta desafios, como a necessidade de garantir a compatibilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e a segurança cibernética dos sistemas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da implementação de subestações digitais, considerando aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. Serão abordados temas como as tecnologias utilizadas em subestações digitais, os desafios na implementação desses sistemas, as normas e regulamentações relacionadas e a importância da cibersegurança em subestações digitais.

A relevância desse trabalho está na análise crítica da viabilidade da subestação digital, que pode ser um passo importante na modernização da infraestrutura elétrica do país. Além disso, a discussão sobre os desafios e

oportunidades na implementação de subestações digitais pode contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e seguras para o setor elétrico. O presente trabalho tem ainda o objetivo de contribuir para o avanço do conhecimento sobre subestações digitais e sua viabilidade técnica, econômica e regulatória. A partir da revisão bibliográfica e análise crítica dos temas abordados, espera-se apresentar conclusões e recomendações que possam ser úteis para profissionais e pesquisadores envolvidos com a modernização da infraestrutura elétrica.

1 Problemática

A implementação de subestações digitais é uma tendência crescente no setor elétrico, pois promove maior precisão na operação e controle, além de permitir a utilização de sistemas de automação e gerenciamento de dados que podem aumentar a eficiência energética e reduzir os custos operacionais. No entanto, essa implementação apresenta desafios, principalmente relacionados à segurança cibernética e à compatibilidade entre sistemas digitais e existentes. Portanto, a problemática é como superar esses desafios e garantir que a implementação de subestações digitais traga benefícios significativos para o setor elétrico.

2 Justificativa

A justificativa para este trabalho baseia-se na importância e atualidade do tema. Como as subestações digitais são uma tendência, com o objetivo de melhorar a eficiência energética e a qualidade do serviço. No entanto, essa implementação apresenta desafios significativos relacionados à segurança cibernética e à compatibilidade entre sistemas digitais e existentes.

Portanto, esse trabalho visa contribuir com o analisar fornecimento de *insights* de soluções que possam superar esses desafios e garantir a implementação segura, eficiente e rentável de subestações digitais no setor elétrico. Além disso, este trabalho pode ser útil para profissionais e pesquisadores que bus-

cam aprofundar seus conhecimentos sobre a aplicação de tecnologias digitais no setor elétrico, em especial nas subestações, e para estudantes que desejam se atualizar sobre as últimas tendências nesse campo.

3 Objetivos

3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desse trabalho é apontar os benefícios de uma subestação de energia elétrica automatizada Além dos reflexos na qualidade de energia, no meio ambiente e no âmbito financeiro da concessionária.

3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar as tecnologias disponíveis das subestações digitais, e suas vantagens e desvantagens;
- Identificar e analisar os principais desafios relacionados à segurança cibernética e à compatibilidade de sistemas na implementação de subestações digitais;
- Mostrar que a subestação digital é vantajosa e eficaz, expondo os benefícios em termos de segurança, eficiência e rentabilidade

Capítulo 1

Referencial Teórico

1.1 Fundamentos de subestações elétricas e suas principais funções

As subestações elétricas são elementos fundamentais no sistema elétrico de potência, pois permitem o controle e a distribuição da energia elétrica de forma segura e eficiente. São responsáveis por receber, transformar, distribuir e controlar a energia elétrica de alta tensão. Basicamente, elas são compostas por transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, entre outros componentes, que permitem a adequação da tensão elétrica para distribuição em diferentes níveis de tensão. Segundo Carleto (2017), as subestações podem ser classificadas de acordo com a sua função, podendo ser de manobra e transformação. É possível ver o esquema de um sistema elétrico de potência na figura 1.1.



Figura 1.1: Sistema Elétrico de Potência - SEP. Fonte: Carleto (2017)

Existem diferentes tipos de subestações elétricas, de acordo com sua finalidade e localização. Por exemplo, subestações de distribuição são usadas para distribuir energia elétrica em áreas urbanas e rurais, enquanto subestações de transmissão são usadas para transmitir energia elétrica a longas distâncias. Além disso, subestações podem ser aéreas ou subterrâneas, dependendo do ambiente em que estão localizadas.

1.1.1 Tipos de subestações

Existem diversos tipos de subestações elétricas, cada uma com uma finalidade específica. A seguir, serão elencados os principais tipos de subestações existentes:

- **Subestação Elevadora:** é responsável por elevar a tensão da energia elétrica gerada em uma usina hidrelétrica ou termelétrica, tornando-a mais adequada para a transmissão de longas distâncias. Conforme a figura 1.2.

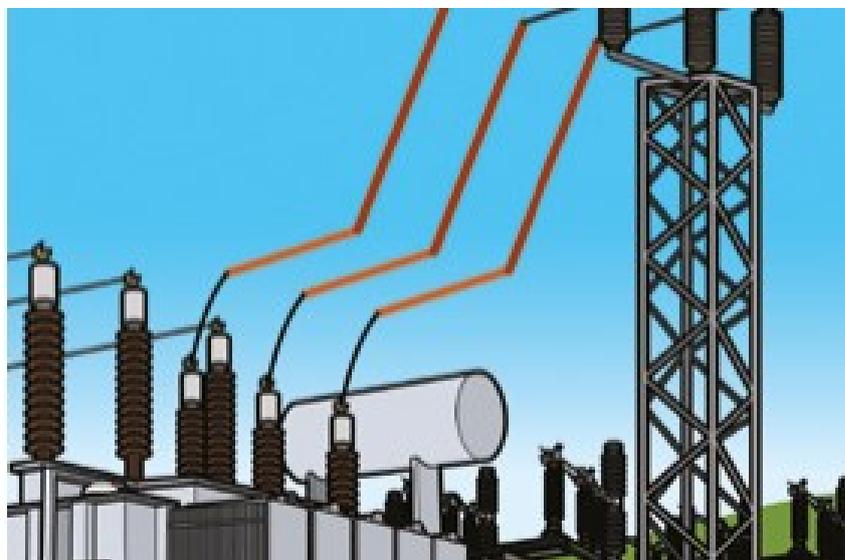


Figura 1.2: Subestação Elevadora. Fonte: Carleto (2017)

- **Subestação de Transmissão:** recebe a energia elétrica das usinas e eleva a tensão para que seja transmitida por longas distâncias por meio das linhas de transmissão.
- **Subestação de Distribuição:** recebe a energia elétrica da subestação

de transmissão e a distribui para os consumidores por meio de redes de distribuição. Conforme a figura 1.3.

-

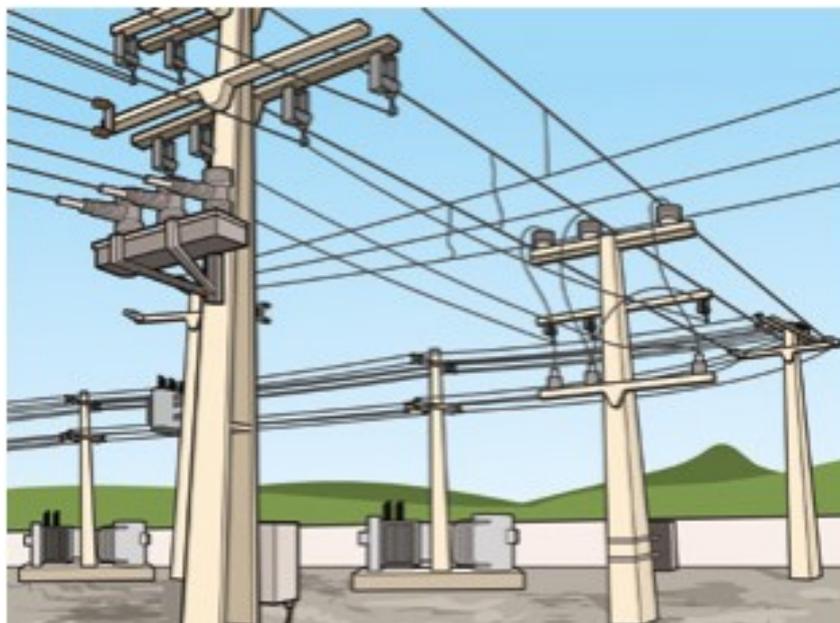


Figura 1.3: Subestação de distribuição. Fonte: Carleto (2017)

- **Subestação Aberta:** é uma subestação que não possui estruturas fechadas e é utilizada em locais onde há espaço suficiente para a instalação de equipamentos a céu aberto. Visto na figura 1.4

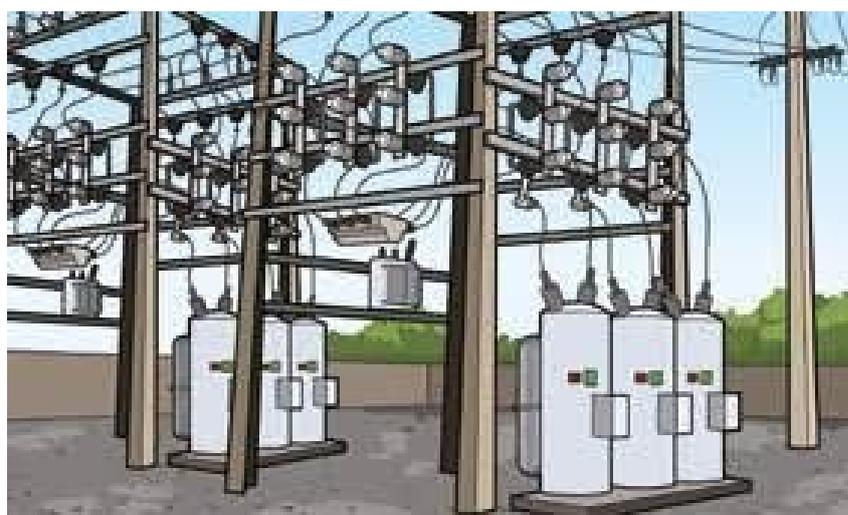


Figura 1.4: Subestação Desabrigada. Fonte: Carleto (2017)

- **Subestação Blindada:** é uma subestação fechada e isolada, com a

finalidade de proteger os equipamentos contra interferências externas, como poeira, umidade e intempéries.

- **Subestação Móvel:** é uma subestação que pode ser transportada de um lugar para outro, de acordo com as necessidades da rede elétrica. Conforme a figura 1.5



Figura 1.5: Subestação Móvel. Fonte: Carleto (2017)

- **Subestação Compacta:** é uma subestação de pequenas dimensões, que pode ser instalada em espaços reduzidos.
- **Subestação Híbrida:** é uma subestação que utiliza uma combinação de tecnologias convencionais e digitais, como a automação e o controle remoto, para garantir um funcionamento mais eficiente e seguro.

De acordo com Pansini et al. (2015), as subestações podem ser classificadas quanto ao nível de tensão em subestações de alta tensão (AT), subestações de média tensão (MT) e subestações de baixa tensão (BT). Já Silva e Oliveira (2018) ressaltam que a escolha do tipo de subestação a ser utilizada em um determinado projeto deve levar em consideração diversos fatores, como a demanda de energia elétrica, a localização geográfica e as características do sistema elétrico em que será instalada.

1.1.2 Composição de uma subestação

A composição das subestações pode variar de acordo com sua finalidade e localização, bem como as normas e regulamentações aplicáveis em cada país.

Por exemplo, no Brasil, as subestações são regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e devem seguir as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da International Electrotechnical Commission (IEC).

No entanto, alguns equipamentos são comuns a todas as subestações e são fundamentais para o seu funcionamento. A seguir, são listados os principais tipos de equipamentos presentes em uma subestação de energia elétrica:

- **Transformadores:** os transformadores são os equipamentos responsáveis por realizar a transformação da tensão da energia elétrica de uma linha de transmissão para a tensão adequada para distribuição local. São essenciais para garantir a segurança do sistema e reduzir as perdas de energia durante a transmissão. Os transformadores podem ser do tipo elevador, abaixador, autotransformador ou isolador, e possuem diversas configurações e tamanhos.
- **Disjuntores:** os disjuntores são equipamentos que têm a função de interromper a passagem de corrente elétrica em situações de emergência, como curtos-circuitos e sobrecargas. São responsáveis por proteger o sistema elétrico e evitar danos aos equipamentos. Podem ser do tipo a vácuo, a óleo, a ar ou a SF₆ (Hexafluoreto de enxofre), e possuem diferentes capacidades nominais. Um exemplo desses disjuntores pode ser visto na figura 1.6.
- **Bancos de capacitores:** os bancos de capacitores são equipamentos que têm a função de corrigir o fator de potência da subestação, melhorando a eficiência energética do sistema e reduzindo as perdas de energia. Podem ser fixos ou automáticos, e seu dimensionamento deve levar em conta a carga da subestação e as características elétricas do sistema.
- **Chaves seccionadoras:** as chaves seccionadoras são equipamentos que permitem a abertura e o fechamento de partes do sistema elétrico, para manutenção ou operação de emergência. Não possuem capacidade de interrupção de corrente elétrica, sendo utilizadas para permitir o isola-

mento de partes do sistema. Podem ser do tipo faca, pantográfica ou motorizada, e são importantes para garantir a segurança do sistema. Conforme figura 1.7.

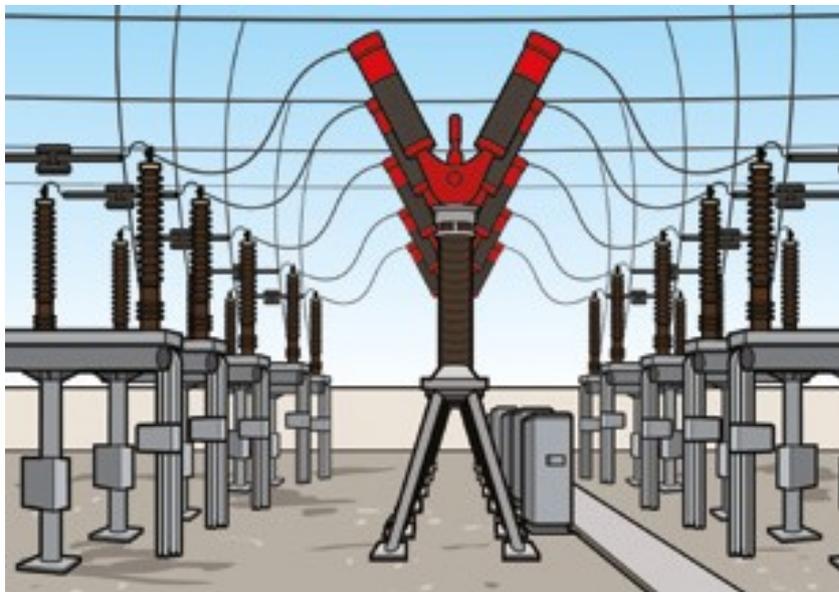


Figura 1.6: Disjuntor a óleo de uma subestação. Fonte: Carleto (2017)

- **Medidores e instrumentos de proteção:** os medidores e instrumentos de proteção são equipamentos que permitem o monitoramento do sistema elétrico, fornecendo informações sobre tensão, corrente, potência, fator de potência e outros parâmetros elétricos. Também permitem a detecção de falhas e o acionamento de proteções em emergências. São equipamentos essenciais para garantir a operação segura e eficiente da subestação.

Os reatores são utilizados para limitar a corrente elétrica em circuitos de alta tensão e reduzir a influência de harmônicos no sistema.

Segundo Araújo et al. (2014), a escolha e dimensionamento desses equipamentos deve levar em consideração diversos fatores, como a potência elétrica a ser transmitida, o tipo de corrente elétrica, a tensão nominal, as condições ambientais, entre outros.

Além disso, é importante destacar que a manutenção e substituição desses equipamentos são fundamentais para garantir a segurança e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. De acordo com Bocquillon (2002), as

subestações de energia elétrica devem ser projetadas para permitir a manutenção dos equipamentos sem interromper o fornecimento de energia elétrica, e a manutenção preventiva deve ser realizada regularmente para evitar falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos.

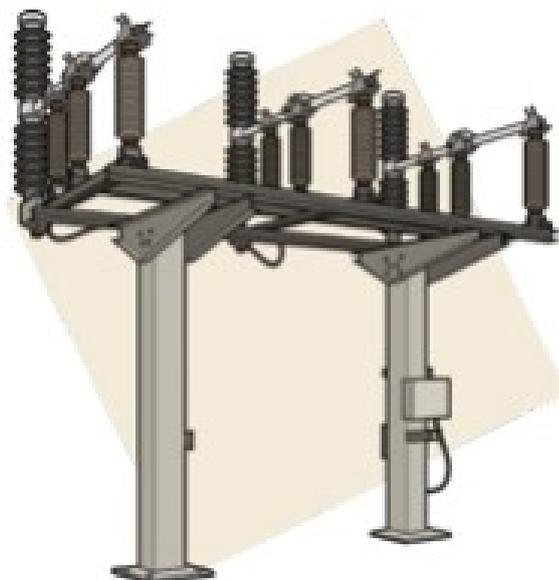


Figura 1.7: Chave Seccionadora. Fonte: Carleto (2017)

Dessa forma, pode-se concluir que os equipamentos que compõem uma subestação de energia elétrica são essenciais para garantir a confiabilidade e segurança do sistema elétrico, e devem ser escolhidos e dimensionados de forma adequada, levando em consideração diversos fatores. Além disso, a manutenção e substituição desses equipamentos são fundamentais para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

De forma geral, as subestações elétricas são elementos fundamentais para garantir a segurança, eficiência e qualidade da energia elétrica fornecida à população. A evolução tecnológica tem permitido o desenvolvimento de subestações mais modernas e eficientes, como as subestações digitais, que podem trazer benefícios significativos para o setor elétrico.

As subestações elétricas desempenham um papel crucial na regulação dos níveis de tensão e corrente da rede elétrica, com a finalidade de direcionar a energia para os destinos apropriados. Um exemplo prático ocorre nas re-

sidências, onde um transformador, localizado em um poste de luz, recebe a energia elétrica proveniente da rede de transmissão e a converte para um nível de tensão adequado às necessidades de cada residência. Posteriormente, o quadro de distribuição elétrica realiza a distribuição da energia para os diversos aparelhos e cômodos presentes na residência. (SIEMENS, 2022)

Siqueira et al. (2020) ressaltam que as subestações também podem contar com sistemas de automação, que permitem a aquisição de dados em tempo real, bem como o controle e supervisão remota dos equipamentos e dispositivos de proteção. Esses sistemas geralmente são compostos por controladores lógicos programáveis (CLPs), sensores e atuadores, além de interfaces homem-máquina (IHM) para visualização das informações. Uma comparação dos sistemas de comunicação entre as subestações convencionais e subestações digitais podem ser vistas na figur1.8.

Por fim, Castro (2019) destaca a importância das subestações na distribuição de energia elétrica, ressaltando que a sua adequada operação e manutenção são fundamentais para garantir a segurança e confiabilidade do sistema elétrico como um todo. Nesse sentido, a evolução tecnológica tem permitido a utilização de equipamentos e sistemas mais modernos e eficientes, como as subestações digitais, que oferecem diversas vantagens em relação às subestações convencionais.

1.1.3 Subestação Digital

Uma subestação digital é aquela que possui equipamentos modernos de automação e tecnologias de comunicação para monitorar e controlar o fluxo de energia elétrica de forma eficiente e segura. Segundo R. A. Lima & Ferreira (2017), a subestação digital é uma evolução das subestações convencionais, na qual são integrados equipamentos modernos de proteção, controle e monitoramento em um único sistema, visando aprimorar a eficiência operacional e a confiabilidade do sistema elétrico.

Um dos principais componentes da subestação digital é o sistema de automação, que permite a gestão remota de todas as funções da subestação,

incluindo o controle de equipamentos, medição de grandezas elétricas e aquisição de dados. Segundo Dantas et al. (2019), o sistema de automação é composto por controladores lógicos programáveis (CLPs), unidades remotas de entrada/saída (UREs), sistemas supervisórios e outros dispositivos que permitem a comunicação e interação entre os diferentes equipamentos da subestação.

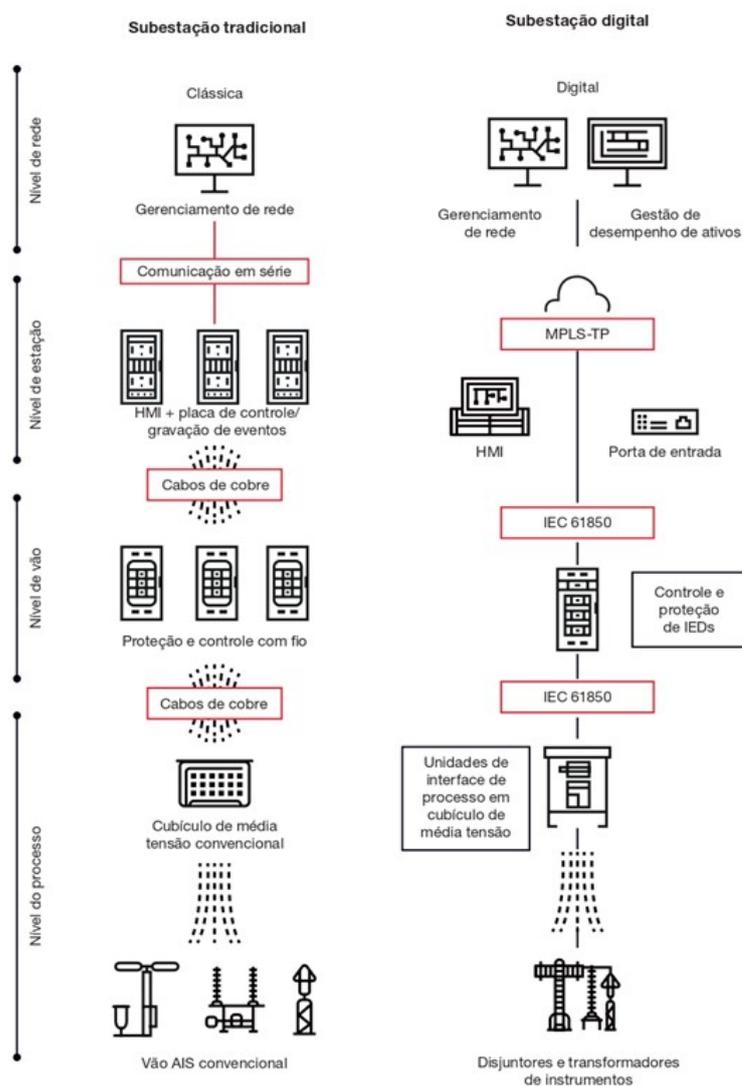


Figura 1.8: Diagrama estrutural das subestações convencionais x digitais. ¹

Outro elemento fundamental da subestação digital é o sistema de proteção, responsável por garantir a segurança e a integridade do sistema elétrico em

¹HITACHI ENERGY - <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=4CAE000922&LanguageCode=pt&DocumentPartId=pt&Action=Launch>

caso de falhas ou sobrecargas. Esse sistema é composto por dispositivos como relés, disjuntores, transformadores de corrente e potencial, entre outros, que detectam e isolam defeitos elétricos para evitar danos ao sistema. De acordo com Fagundes (2015), a utilização de relés digitais na subestação digital tem se tornado cada vez mais comum, uma vez que esses equipamentos permitem uma maior precisão e rapidez na detecção de falhas elétricas, garantindo uma proteção mais eficiente do sistema.

Finalmente, a tecnologia de comunicação é outro elemento essencial na subestação digital, uma vez que permite a transmissão de informações entre a subestação e o centro de controle, bem como a integração com outros equipamentos do sistema elétrico. De acordo com Souza & Nicasio (2016), existem diversas tecnologias de comunicação utilizadas em subestações digitais, como redes de comunicação óptica, protocolos de comunicação como IEC 61850 e DNP3, entre outros. Alguns exemplos de protocolos de comunicação podem ser vistos na figura 1.9.

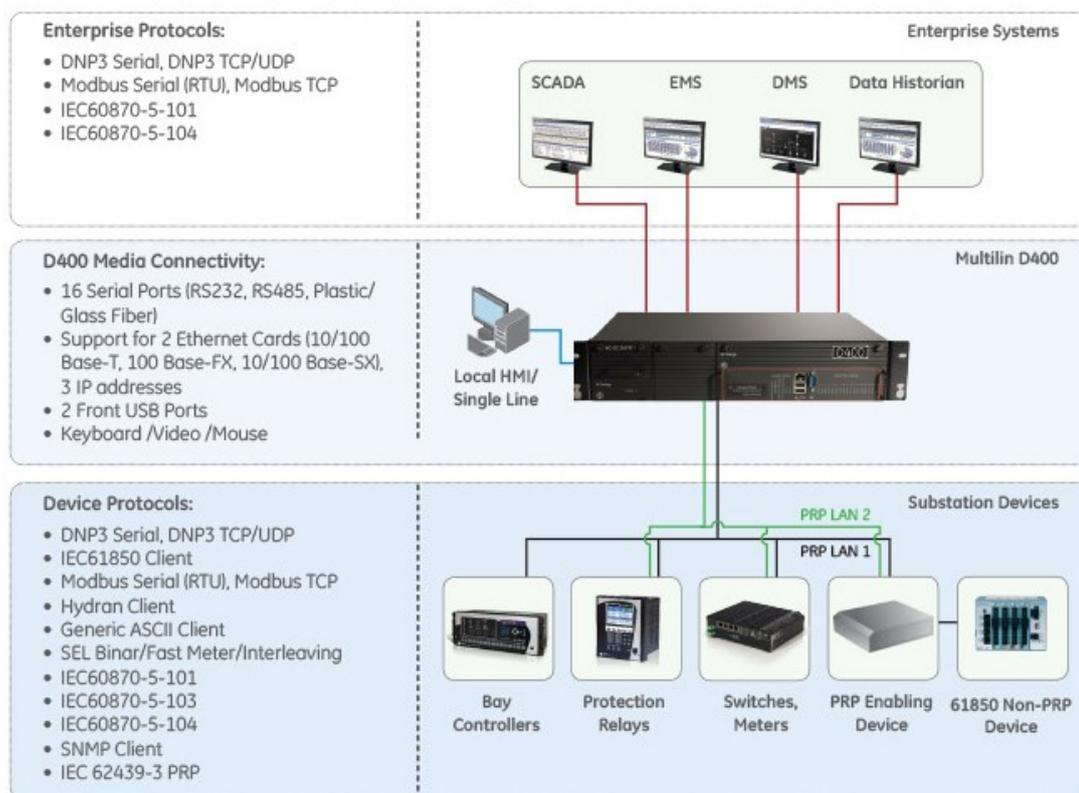


Figura 1.9: Representação Rede Elétrica Inteligente.²

²GE Grid Solutions - https://www.gegridsolutions.com/indsolutions/ind_automation.htm

1.2 Digitalização na área de energia elétrica

A digitalização na área de energia elétrica tem sido um dos grandes avanços tecnológicos nas últimas décadas. As subestações digitais são equipadas com sensores, sistemas de comunicação, softwares de controle e outros dispositivos eletrônicos que permitem uma maior precisão na medição e controle da rede elétrica, proporcionando uma maior eficiência, confiabilidade e segurança no fornecimento de energia elétrica.

De acordo com Al-absi et al. (2021), Com a digitalização, a rede elétrica se torna mais eficiente, confiável e flexível, permitindo uma melhor gestão dos fluxos de energia elétrica e uma maior integração de fontes renováveis na rede. Os sensores instalados nas subestações digitais são capazes de coletar dados em tempo real sobre a qualidade da energia elétrica, além de informações sobre o desempenho e o estado de equipamentos e dispositivos de proteção. Esses dados são então transmitidos para sistemas de controle, que utilizam algoritmos para analisá-los e tomar decisões mais precisas e rápidas em caso de falhas ou situações de emergência.

Os sistemas de comunicação permitem a transmissão de dados entre subestações, centros de controle, geradores e consumidores, possibilitando uma gestão integrada e eficiente da rede elétrica. Além da segurança cibernética, os desafios desses sistemas incluem baixa latência, confiabilidade, escalabilidade, manutenção/suporte adequados. A digitalização desempenha um papel fundamental na integração de fontes de energia renovável, como energia solar e eólica, na rede elétrica. Através de medidores inteligentes e tecnologias de comunicação avançadas, é possível obter dados precisos sobre a geração distribuída, permitindo um melhor gerenciamento e controle, contribuindo para um planejamento mais eficiente do sistema elétrico e uma utilização sustentável dessas fontes de energia limpa, o que pode ser visualizado na figura 1.10:

Gupta et al. (2020) afirma que, a digitalização da rede elétrica é uma tendência global e representa um grande avanço tecnológico na área de energia elétrica. Com as subestações digitais, é possível obter uma maior precisão

na medição e controle da rede, além de uma maior eficiência e segurança no fornecimento de energia elétrica, através do monitoramento em tempo real, manutenção preditiva, otimização do fluxo de energia e integração de fontes renováveis. Essas tecnologias avançadas permitem uma gestão mais precisa e eficiente da rede elétrica, resultando em um fornecimento de energia mais confiável, econômico e sustentável.

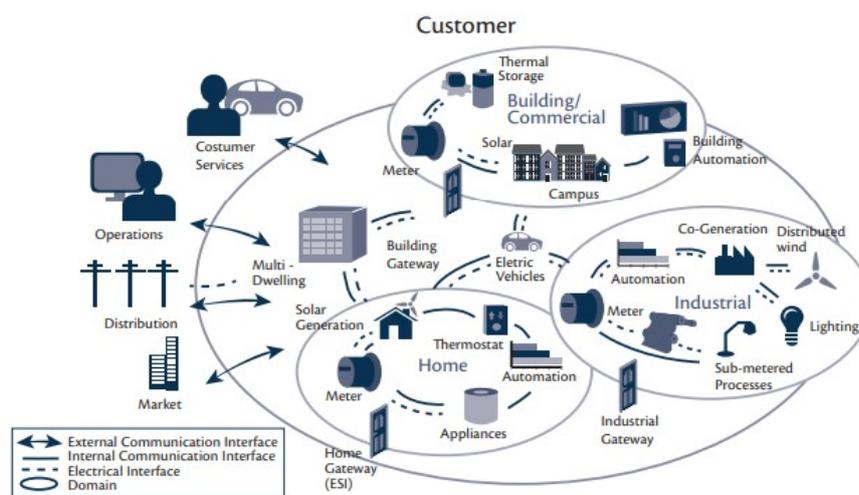


Figura 1.10: Representação Rede Elétrica Inteligente.³

1.2.1 Sistemas de automação

Os sistemas de automação industrial são amplamente utilizados em diversos setores industriais, incluindo o setor elétrico. Segundo Akbari et al. (2016), a automação de subestações é uma das principais aplicações de sistemas de automação na indústria elétrica, e tem como objetivo melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema elétrico. Os sistemas de automação em subestações são compostos por vários componentes, tais como sensores, atuadores, controladores, CLPs e sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Esses componentes trabalham em conjunto para recolher informações sobre o sistema elétrico, processar essas informações e tomar decisões em tempo real, como explicado por Chen et al. (2015). Na figura 1.11 pode ser observado um diagrama de blocos do uso do sistema

³NIST 2009 – (Report to NIST on the smart grid interoperability standards roadmap. EUA, 2009.)

SCADA.

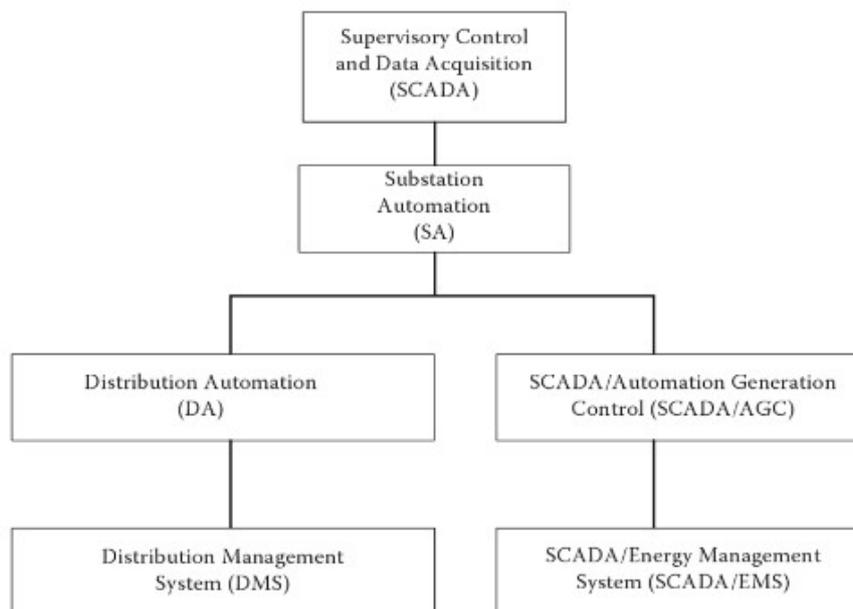


Figura 1.11: Diagrama de blocos do uso do SCADA em redes inteligentes.⁴

A automação de subestações tem evoluído rapidamente nas últimas décadas, graças ao avanço da tecnologia de microprocessadores e de sistemas de comunicação. Os sistemas de automação modernos são capazes de monitorar e controlar subestações a partir de um centro de operação remoto, possibilitando uma gestão mais eficiente e integrada do sistema elétrico.

1.2.2 Sistemas de proteção

Os sistemas de proteção são componentes essenciais de uma subestação, responsáveis por garantir a segurança do sistema elétrico e dos equipamentos da subestação. Segundo Ullah et al. (2017), o objetivo principal dos sistemas de proteção é detectar falhas no sistema elétrico e isolar as partes defeituosas do sistema, evitando assim danos maiores.

Os sistemas de proteção em subestações geralmente são compostos por relés de proteção, que são dispositivos eletrônicos capazes de detectar falhas elétricas e enviar sinais para os disjuntores da subestação, que por sua vez interrompem a corrente elétrica no circuito defeituoso. Além disso, os

⁴Mini S. Thomas e John D. McDonald - Power System Scada and Smart Grids

sistemas de proteção também podem incluir equipamentos auxiliares, como transformadores de corrente e de potencial, para medir as grandezas elétricas do sistema e fornecer informações para os relés de proteção.

Com o avanço da tecnologia, os sistemas de proteção em subestações têm evoluído para sistemas digitais. Segundo L. Wei et al. (2018), os sistemas de proteção digitais apresentam vantagens em relação aos sistemas analógicos, como maior precisão, flexibilidade e facilidade de manutenção. E ainda, os sistemas de proteção digitais também podem ser integrados com sistemas de automação, possibilitando uma gestão mais integrada e eficiente da subestação.

1.2.3 Tecnologias de comunicação

As tecnologias de comunicação são fundamentais para o funcionamento de uma subestação digital. Segundo Fang et al. (2018), a comunicação é responsável por conectar os diversos equipamentos da subestação e possibilitar a troca de informações em tempo real. Dessa forma, a escolha das tecnologias de comunicação adequadas é essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema.

Uma das tecnologias de comunicação mais utilizadas em subestações digitais é o protocolo IEC 61850. Conforme Yang et al. (2019), o protocolo IEC 61850 é um padrão internacional para sistemas de automação e proteção em subestações elétricas. Ele define um conjunto de regras e procedimentos para a comunicação entre os equipamentos da subestação, permitindo a troca de informações em tempo real e possibilitando uma gestão mais integrada e eficiente da subestação.

Além do protocolo IEC 61850, outras tecnologias de comunicação também podem ser utilizadas em subestações digitais, como redes Ethernet, redes de fibra óptica e comunicação sem fio. A escolha das tecnologias de comunicação adequadas depende das características específicas da subestação, como a distância entre os equipamentos, o tipo de informações a serem transmitidas e o nível de segurança exigido.

1.2.4 Tecnologias utilizadas em subestações digitais

As subestações digitais são equipadas com uma série de tecnologias avançadas que permitem uma melhor medição, monitoramento e controle da rede elétrica. Entre as tecnologias mais comuns utilizadas em subestações digitais estão sensores, sistemas de comunicação, sistemas de proteção e controle digital, softwares de análise de dados e outros dispositivos eletrônicos.

Segundo Zhou et al. (2020), as subestações digitais são equipadas com sensores de alta precisão, sistemas de comunicação confiáveis e sistemas de proteção e controle digitais, que permitem um monitoramento contínuo da rede elétrica e uma resposta rápida a situações de emergência. Os sensores são dispositivos eletrônicos que convertem grandezas físicas (como corrente, tensão e temperatura) em sinais elétricos que podem ser processados digitalmente.

Esses sensores são amplamente utilizados em subestações digitais para medir e monitorar as grandezas elétricas da rede elétrica. Por exemplo, sensores de tensão e corrente são usados para medir a magnitude e fase da tensão e corrente em diferentes pontos da rede elétrica, permitindo a identificação de falhas e o monitoramento do fluxo de energia. As subestações digitais utilizam tecnologias avançadas para controle, proteção e monitoramento dos sistemas elétricos de alta tensão. Algumas das principais tecnologias e equipamentos utilizados em subestações digitais incluem:

- **Remote Terminal Units (RTUs):** As RTUs são dispositivos eletrônicos que permitem a coleta e transmissão de dados em tempo real entre os equipamentos de uma subestação digital e o sistema de controle e supervisão. As RTUs são responsáveis por capturar as informações dos sensores e dispositivos instalados na subestação digital e enviá-las para o sistema de supervisão e controle. As RTUs são conectadas à rede elétrica por meio de comunicação serial ou protocolos de comunicação Ethernet. Além disso também são utilizados nos controles de sistemas *self-healing*.
- **Intelligent Electronic Devices (IEDs):** Os IEDs são dispositivos

eletrônicos utilizados para a proteção e controle de equipamentos elétricos de alta tensão. Os IEDs são responsáveis por realizar funções de proteção, medição e controle de equipamentos, como disjuntores, transformadores e barramentos. Os IEDs são conectados às RTUs por meio de protocolos de comunicação digitais, como o IEC 61850. Conforme a figura 1.12 podemos ver um layout de uma subestação digital com o protocolo IEC 61850.

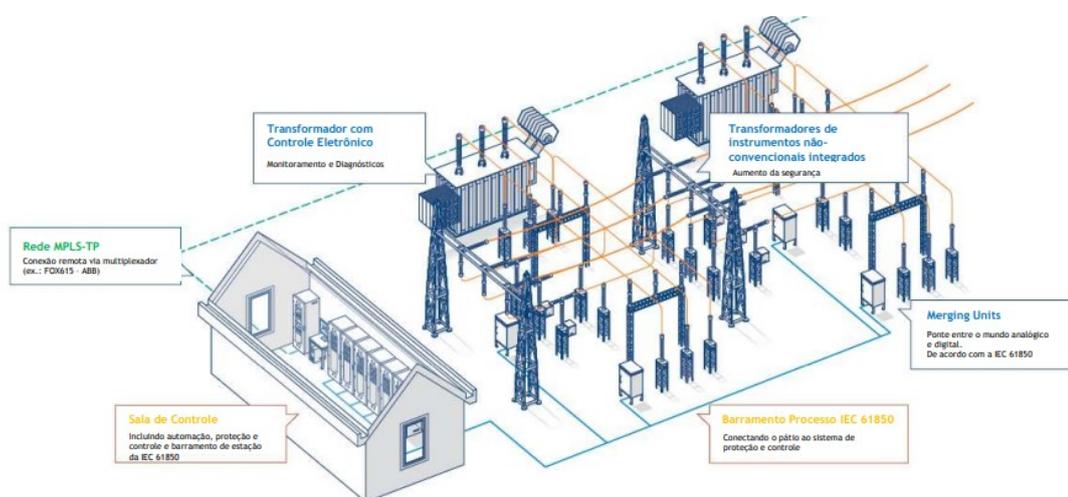


Figura 1.12: Layout Subestação Digital.⁵

- **Sensores ópticos:** Os sensores ópticos são dispositivos utilizados para monitorar e medir a corrente elétrica e a temperatura dos equipamentos elétricos. Os sensores ópticos são instalados em pontos estratégicos da subestação digital e são conectados às RTUs para envio de dados em tempo real. Os sensores ópticos permitem a detecção precoce de falhas e anomalias nos equipamentos elétricos, contribuindo para a redução do tempo de indisponibilidade e a melhoria da confiabilidade do sistema.
- **Sistemas de comunicação:** As subestações digitais utilizam sistemas de comunicação avançados para troca de dados entre os equipamentos e o sistema de supervisão e controle. Os sistemas de comunicação podem utilizar diferentes protocolos, como o IEC 61850, DNP3 e Modbus, e podem incluir redes de fibra óptica, rádio e Ethernet.
- **Sistemas de armazenamento e processamento de dados:** As su-

⁵Subestações Digital – ABB

bestações digitais geram uma grande quantidade de dados em tempo real, que precisam ser armazenados e processados de forma eficiente. Para isso, as subestações digitais utilizam sistemas de armazenamento em nuvem e servidores de alta performance, que permitem o processamento e análise dos dados em tempo real.

De acordo com Nigim et al. (2019), a automação da subestação pode ser alcançada através do uso de tecnologias avançadas, como sensores inteligentes, sistemas de comunicação de dados, dispositivos de controle digital, sistemas de monitoramento de qualidade de energia, sistemas de gerenciamento de informação e ferramentas de análise de dados.

Os sistemas de comunicação são utilizados para transmitir informações entre diferentes dispositivos da subestação digital e para se comunicar com o sistema de controle da rede elétrica. Esses sistemas podem ser baseados em fios, como cabos de cobre ou fibra ótica, ou sem fio, como sistemas de rádio e satélite. Por exemplo, em subestações digitais inteligentes, a comunicação sem fio é usada para transferir dados entre sensores, dispositivos de controle e o centro de operação da rede elétrica, permitindo uma tomada de decisão rápida e eficiente.

Os sistemas de proteção e controle digital são responsáveis por monitorar e controlar o fluxo de energia elétrica na subestação digital. Eles utilizam algoritmos digitais para identificar e isolar falhas na rede elétrica e para proteger os equipamentos da subestação contra danos. Esses sistemas também podem ser programados para operar automaticamente em emergências, evitando ou minimizando os impactos de falhas na rede elétrica.

Os softwares de análise de dados são usados para processar e analisar as informações coletadas pelos sensores e sistemas de comunicação da subestação digital. Eles permitem a identificação de padrões e tendências na rede elétrica, bem como a realização de diagnósticos e previsões. Por exemplo, o software de análise de dados pode ser usado para prever a demanda futura de energia elétrica, permitindo que os operadores da subestação digital ajustem a geração e o fornecimento de energia de forma mais eficiente.

1.3 Regulamentações e normas técnicas relacionadas à digitalização de subestações

A digitalização de subestações elétricas é um processo que envolve a integração de tecnologias de informação e comunicação com os equipamentos de energia elétrica, e deve seguir uma série de regulamentações e normas técnicas para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico. Uma das principais normas técnicas relacionadas à digitalização de subestações é a norma IEC 61850, desenvolvida pelo Comitê Internacional de Eletrotécnica (IEC, na sigla em inglês), que estabelece um conjunto de padrões para a comunicação entre dispositivos eletrônicos de subestações.

Além da norma IEC 61850, existem outras regulamentações e normas técnicas que devem ser consideradas na digitalização de subestações elétricas. No Brasil, por exemplo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu uma série de normas e regulamentações relacionadas à digitalização do setor elétrico, como a Resolução Normativa nº 843/2019, que estabelece as regras para a implantação de medidores eletrônicos de energia elétrica em unidades consumidoras.

Outro exemplo de regulamentação relacionada à digitalização de subestações é a norma IEEE 1547, desenvolvida pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), que estabelece os requisitos para a conexão de geradores distribuídos ao sistema elétrico. A norma IEEE 1547 define um conjunto de requisitos técnicos e de segurança para a conexão de geradores distribuídos, como a proteção contra sobretensões e a qualidade da energia gerada. Na tabela 1.1 é relacionada algumas normas aplicáveis nas práticas para subestações digitais.

Portanto, a digitalização de subestações elétricas deve seguir uma série de regulamentações e normas técnicas, como a norma IEC 61850, a norma IEEE 1547 e procedimentos de rede da ONS, para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico.

Tabela 1.1: Normas Aplicáveis e melhores práticas para subestações digitais.⁶

| Padrão | Descrição |
|---|--|
| NISTIR 7628 | Painel de Interoperabilidade de Redes Inteligentes (Smart Grid Interoperability Panel, ou SGP do NIST responde à Lei de Independência e Segurança Energética-normas coordenadas para comunicações de redes inteligentes. O NISTIR 7628 inclui protocolos para a gestão de informação e interoperabilidade de soluções de redes inteligentes encoraja a utilização de informação digital e tecnologia de controle para melhorar a confiança e eficiência enquanto otimiza a cibersegurança. |
| NERC-CIP | As normas NERC-CIP protegem infraestruturas e transmissões críticas, como bens cibernéticos. O cumprimento é obrigatório para o Sistema de Energia em Massa (Bulk Energy System, ou BES). A norma abrange centros sistemas de controle que utilizam uma categoria superior para centros de controle de transmissão, enquanto as subestações são abrangidas pela categorização inferior ou média, fazendo com que a conformidade às normas seja menos rigorosa. Os vendedores de produtos e integradores de sistemas não oferecem certificação de conformidade NERC-CIP; serviços públicos são os responsáveis, embora muitos provedores incluam características técnicas para atender a conformidade. |
| IEEE C37.240 Requisitos Padrão de Cibersegurança para Automação Proteção . Sistemas de Controle | A norma C37.240 cobre a adequação e implementação técnica das normas de segurança NERC-CIP e NIST de redes inteligentes para subestações digitais. Abrange a automação, proteção e sistemas de controle das subestações, aplicando princípios de engenharia independente de voltagem ou da natureza crítica de bens cibernéticos em particular. O IEEE publicou a norma em 2014, que hoje está sendo revista. |
| IEEE 1686 Norma IEEE para Recursos de Cibersegurança de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes | A norma IEEE 1688 define recursos essenciais de segurança dos dispositivos eletrônicos inteligentes (Intelligent Electronic Devices, ou IEDs), incluindo relés de proteção instalados em subestações digitais. Alguns requisitos não se aplicam aos IEDs das subestações, mas ajudam um serviço público a compreender suas medidas e recursos de cibersegurança. A norma cobre a autenticação e segurança do registro de eventos do usuário, deixando espaço para soluções sob medida, como interfaces com software antigo. A norma permite que fabricantes e fornecedores declarem os recursos de segurança do seu dispositivo e ajuda os serviços públicos a considerarem a cibersegurança de forma consistente. |
| IEC 62351 | A importante norma IEC 62351 foca nas funções de gestão de segurança e nos requisitos gerais para a gestão de dados e comunicações. Esta norma de segurança técnica tem como objetivo assegurar protocolos de comunicação projetados para sistemas de energia, tais como IEC 61850 ou IEC 60870-5-104. Atualmente em desenvolvimento, a norma utiliza assinaturas digitais e acesso autorizado, além de ajudar na detecção de invasão. |
| IEC 62443 (Antiga ISA 590) | Esta norma recentemente introduzida derivada da ISA 800 cobre a segurança de todos os aspectos do sistema de controle, provavelmente incluindo subestações. A norma define requisitos para a cadeia de valor, o lado do fornecimento, e o integrador de sistemas. O programa do Instituto ISA de Segurança e Conformidade (Security Compliance Institute, ou ISCA) avalia a conformidade dos dispositivos a norma, enquanto outros programas de certificação IEC 82443 confirmam recursos de cibersegurança de um dispositivo. |
| IEC 61869 | Esta norma não está relacionada à cibersegurança. Ela foca nos transformadores de instrumento enquanto suporta a interoperabilidade dos componentes das subestações. Embora muitos serviços públicos ainda se refiram ao barramento de processo como 61850, muitos estão transicionando para 61889. A norma cobre os valores dos instrumentos em transformadores de instrumentos não convencionais, o que irá gerar impacto na interoperabilidade. |
| IEC 61850 § Barramento de Processo | IEC 61850 define protocolos de comunicação para IEDs em subestações suportando vários protocolos incluindo GOOSE perficção de Fabricação de Managem (Manufacturing Message Specification ou MMS Valores de Medida Amostrada Sampled Measured Values ou SMV) Os protocolos poden user TCP/IP ou LAN de subestacle our ulliam Ethemet norma define a arquitetura de comunicações para barramento de processor subestações come forma de aumentar interoperabilidade em subestações por meio de uso de Ethernet. |

⁶ABB - <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A5495&LanguageCode=pt&DocumentPartId=pt&Action=Launch>

Capítulo 2

Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em uma análise de viabilidade econômica e tecnológica de subestações digitais de energia elétrica. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica detalhada sobre o conceito de subestação digital, suas tecnologias e aplicações, bem como sobre trabalhos recentes relacionados ao tema. Inicialmente, foram selecionados artigos científicos e outras fontes confiáveis de informação, que abordassem os conceitos teóricos envolvidos nas subestações digitais, incluindo sistemas de automação, sistemas de proteção, tecnologias de comunicação, entre outros. Essa revisão bibliográfica foi realizada de forma sistemática, com o objetivo de obter uma visão abrangente sobre o tema.

Em seguida, foram identificados os principais desafios e vantagens associados à implementação de subestações digitais, bem como os resultados obtidos em trabalhos recentes relacionados ao tema. Com base nessas informações, foi possível definir a estrutura e os objetivos deste trabalho. Para a análise de viabilidade econômica e tecnológica, foram selecionados estudos de casos que abordam fatores como custos de implantação, custos de manutenção, eficiência energética, confiabilidade e segurança.

Por fim, os resultados foram analisados e discutidos, com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica e tecnológica da implementação de subestações digitais em diferentes contextos. Foram identificadas as principais vantagens e desafios associados à subestação digital, bem como as tecnologias e

estratégias mais adequadas para a sua implantação.

Capítulo 3

Análise de Viabilidade Técnico-financeira

De acordo com Panda et al. (2021), a implantação de subestações digitais oferece vantagens significativas em relação às subestações convencionais, incluindo maior eficiência energética, redução de custos de manutenção, melhor qualidade do serviço e maior flexibilidade operacional.

Uma das principais vantagens da subestação digital é a redução de custos na sua construção e manutenção. Uma subestação digital requer menos equipamentos e cabos em comparação com uma subestação convencional. Além disso, a instalação de equipamentos digitais permite um monitoramento mais preciso do sistema elétrico, o que pode reduzir o tempo de inatividade não programada e, portanto, os custos associados. Conforme pode ser visto na figura 3.1 a comparação entre as subestações convencionais e digitais:

Outra vantagem é a melhoria na confiabilidade do sistema elétrico. Os equipamentos digitais fornecem uma coleta de dados mais precisa e em tempo real, permitindo que os operadores monitorem o sistema elétrico de forma mais eficiente. Isso permite que os operadores possam detectar e resolver problemas com mais rapidez, minimizando as interrupções no fornecimento de energia elétrica.



Figura 3.1: Comparação entre subestação digital x convencional.¹

3.1 Vantagens da implantação de subestações digitais

A subestação digital também oferece mais flexibilidade do que as subestações convencionais. Os equipamentos digitais permitem que a subestação seja facilmente reconfigurada para atender às mudanças nas necessidades do sistema elétrico. Por exemplo, uma subestação digital pode ser reconfigurada para suportar um novo tipo de gerador de energia elétrica sem a necessidade de substituir completamente os equipamentos existentes.

Além disso, a subestação digital também oferece mais segurança em comparação com as subestações convencionais. A transmissão de dados digitais é mais segura do que a transmissão de dados analógicos, o que torna mais difícil para hackers interferirem no sistema elétrico. E ainda, os equipamentos

¹Subestações digitais – ABB

digitais são menos propensos a falhas, pois são menos afetados por fatores externos, como umidade e vibração.

Dessa forma, conforme Zayed et al. (2020), as subestações digitais são capazes de fornecer um serviço de alta qualidade aos consumidores, reduzindo o tempo de interrupções e melhorando a estabilidade da rede elétrica. Além disso, as subestações digitais permitem a integração de novas tecnologias e fontes de energia renovável, contribuindo para a transição energética.

Um exemplo de sucesso na implementação de tecnologias digitais em subestações é a subestação digital Lorena da ISA CTEEP localizada no interior de São Paulo. A subestação conta com equipamentos digitais e sistemas de automação e controle, possibilitando o monitoramento em tempo real e a detecção de falhas antes que elas se tornem problemas maiores. Como resultado, houve uma redução significativa no tempo de interrupção de energia elétrica para os clientes da empresa. Conforme figura 3.2.



Figura 3.2: Subestação Lorena.²

²<https://www.isactEEP.com.br/pt/noticias/isa-ctEEP-obtem-termo-para-operacao-definitiva-da-subestacao-lorena-a-primeira-digital-do-sistema-interligado-nacional-sin>

Outro exemplo é a subestação digital da ENEL Distribuição São Paulo, que conta com sistemas avançados de monitoramento, controle e automação. Com a implementação da subestação digital, a empresa obteve uma redução de 60% no tempo de deslocamento das equipes de manutenção e uma diminuição de 50% no número de interrupções de energia elétrica. Conforme figura 3.3.

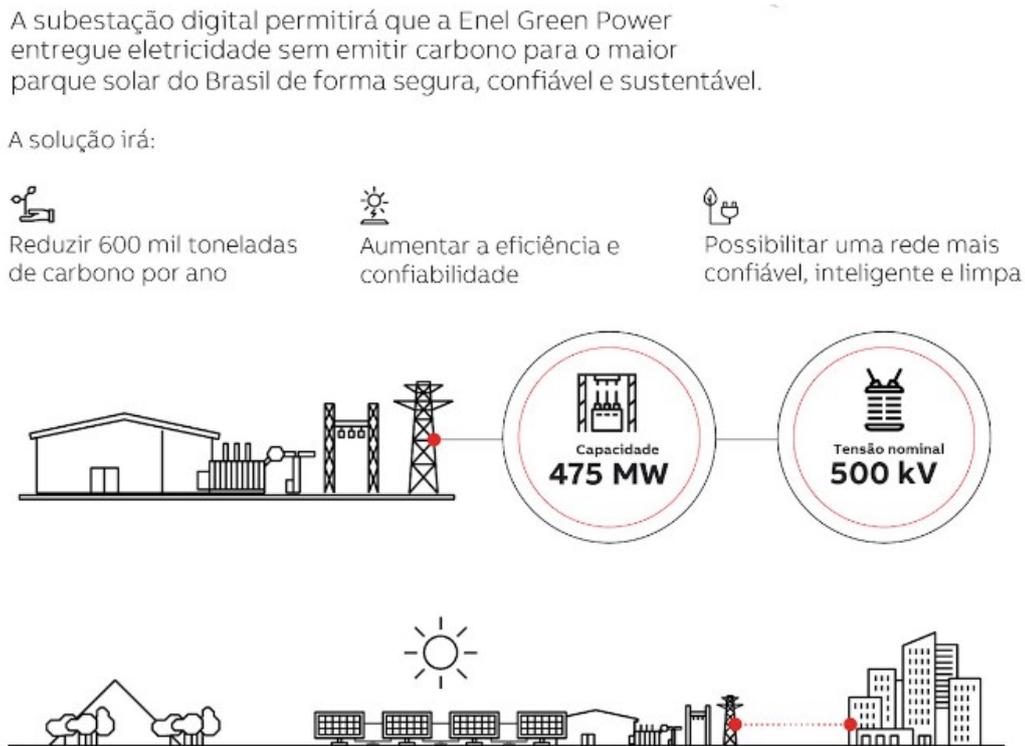


Figura 3.3: Benefícios da Subestação Digital da Eneel.³

Portanto, a implementação de subestações digitais apresenta diversos benefícios, como o aumento da confiabilidade e segurança do sistema elétrico, a redução de custos operacionais, a melhora na eficiência energética e a possibilidade de integração com fontes de energia renovável. De acordo com J. Zhang et al. (2017), a digitalização de subestações tem o potencial de melhorar a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico, além de oferecer maior eficiência energética e redução de custos operacionais. Os autores afirmam que a adoção de tecnologias digitais em subestações é uma tendência global que pode levar a uma transformação significativa no setor elétrico.

³<https://new.abb.com/news/pt-br/detail/57059/abb-instala-a-primeira-subestacao-digital-de-500-kv-do-mundo-na-america-do-sul>

3.2 Diferenças entre subestações convencionais e digitais

As subestações convencionais são equipadas com dispositivos eletromecânicos e eletroeletrônicos que executam funções específicas, como proteção, controle e monitoramento de sistemas elétricos. Já as subestações digitais utilizam equipamentos eletrônicos mais avançados, como relés digitais, controladores programáveis e sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que permitem maior automação e inteligência no controle e monitoramento do sistema elétrico.

Uma das principais diferenças entre as subestações convencionais e digitais é a forma como os dados são tratados. Nas subestações convencionais, as informações são processadas manualmente por meio de leituras de instrumentos eletromecânicos, enquanto nas subestações digitais, as informações são coletadas automaticamente por meio de sensores eletrônicos e transmitidas a um sistema de controle centralizado.

Outra diferença significativa é a maior flexibilidade e capacidade de adaptação das subestações digitais, que permitem ajustes e reconfigurações mais rápidas e precisas do sistema elétrico. Isso é possível graças ao uso de tecnologias de comunicação avançadas, que permitem a transmissão de informações em tempo real entre os equipamentos da subestação e o sistema de controle centralizado.

Um exemplo de aplicação de subestação digital é o projeto Smart Grid da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig). O projeto visa implantar tecnologias avançadas de automação e controle nas subestações, permitindo o monitoramento em tempo real do sistema elétrico e a detecção rápida de falhas e anomalias.

Segundo F. J. F. Lima & Costa (2018), as subestações digitais oferecem diversas vantagens em relação às subestações convencionais, como maior precisão e confiabilidade no controle e monitoramento do sistema elétrico, menor tempo de resposta a falhas e maior capacidade de adaptação a mudanças na

demanda de energia. Além disso, as subestações digitais permitem a integração de fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica, ao sistema elétrico de forma mais eficiente e sustentável.

Outro estudo de Maldonado et al. (2019) ressalta a importância das subestações digitais na modernização e otimização do sistema elétrico, destacando que essas subestações permitem a implementação de sistemas de proteção e controle mais avançados e inteligentes, que reduzem o risco de falhas e aumentam a segurança do sistema elétrico.

3.3 Análise econômica de investimentos em subestações digitais

A análise econômica é um elemento crucial no processo de tomada de decisão para investimentos em subestações digitais. De acordo com Hosseini, a análise econômica é uma ferramenta importante para a tomada de decisões sobre investimentos em subestações digitais. A análise de custo-benefício pode ser usada para avaliar a efetividade de diferentes projetos em termos de custo e benefícios, enquanto a análise de fluxo de caixa descontado pode ser usada para avaliar a viabilidade financeira a longo prazo do projeto. Além disso a adoção de uma subestação digital pode implicar em custos iniciais mais elevados, mas pode gerar economias significativas em longo prazo. Dessa forma, é importante realizar uma avaliação rigorosa da viabilidade econômica dos projetos de subestações digitais antes da tomada de decisão.

Existem várias ferramentas e métodos disponíveis para realizar uma análise econômica, incluindo a análise de custo-benefício, análise de retorno sobre investimento (ROI) e análise de fluxo de caixa descontado. Cada método possui suas próprias limitações e é importante escolher o método mais adequado para o projeto específico.

Um dos principais benefícios das subestações digitais é a capacidade de monitorar e controlar remotamente os equipamentos, reduzindo a necessidade de visitas físicas à subestação e aumentando a eficiência operacional. Isso

pode levar a economias significativas de custos de manutenção e operação a longo prazo. Por exemplo, a ABB implantou um projeto de subestação digital para a empresa de energia elétrica finlandesa Fingrid, que resultou em uma economia de 35% nos custos de manutenção.

J. Zhang et al. (2017) afirma que, as subestações digitais têm o potencial de melhorar significativamente a eficiência operacional e a confiabilidade do sistema elétrico. A capacidade de monitorar e controlar remotamente os equipamentos pode levar a economias significativas de custos de manutenção e operação, enquanto a detecção precoce de falhas pode reduzir os custos associados à interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Outro benefício econômico das subestações digitais é a capacidade de melhorar a confiabilidade do sistema elétrico. A capacidade de detectar falhas precocemente e responder rapidamente a elas pode reduzir os custos associados à interrupção do fornecimento de energia elétrica. Um estudo realizado pela Siemens mostrou que a implementação de uma subestação digital pode resultar em uma redução de até 70% nos custos associados à interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Além disso, as subestações digitais podem facilitar a integração de fontes de energia renovável no sistema elétrico, permitindo um gerenciamento mais eficiente da geração e distribuição de energia. Isso pode levar a uma maior utilização de fontes de energia renovável e redução de custos associados à energia fóssil.

A análise da viabilidade econômica e técnica da implantação de subestações digitais é um aspecto crucial para a adoção dessa tecnologia em diferentes contextos, como sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Essa análise envolve a avaliação de diversos aspectos, como custos de implantação, benefícios esperados, impactos na operação e manutenção do sistema elétrico, entre outros. A seguir, serão abordados os principais aspectos que devem ser considerados na análise de viabilidade econômica e técnica da implantação de subestações digitais em diferentes contextos:

- **Custo de implantação:** O custo de implantação de subestações di-

digitais pode ser significativo, incluindo o investimento em equipamentos eletrônicos avançados, sistemas de comunicação, sensores, entre outros. Ressalta-se a importância de checar os custos associados à implantação de subestações digitais e compará-los com os custos de implantação de subestações convencionais. Nas tabelas 3.1 e 3.2 e figura 3.4 podem ser comparados:

Comparando as duas tabelas podemos verificar que houve uma redução significativa de 50,19% no valor empenhado em cabos de comando para a implantação da SE Lorena.

- **Benefícios esperados:** As subestações digitais podem oferecer diversos benefícios, como maior confiabilidade, automação e monitoramento em tempo real, o que pode resultar em redução de custos operacionais e de manutenção. Se faz necessário verificar os benefícios esperados da implantação de subestações digitais e compará-los com os benefícios oferecidos pelas subestações convencionais.

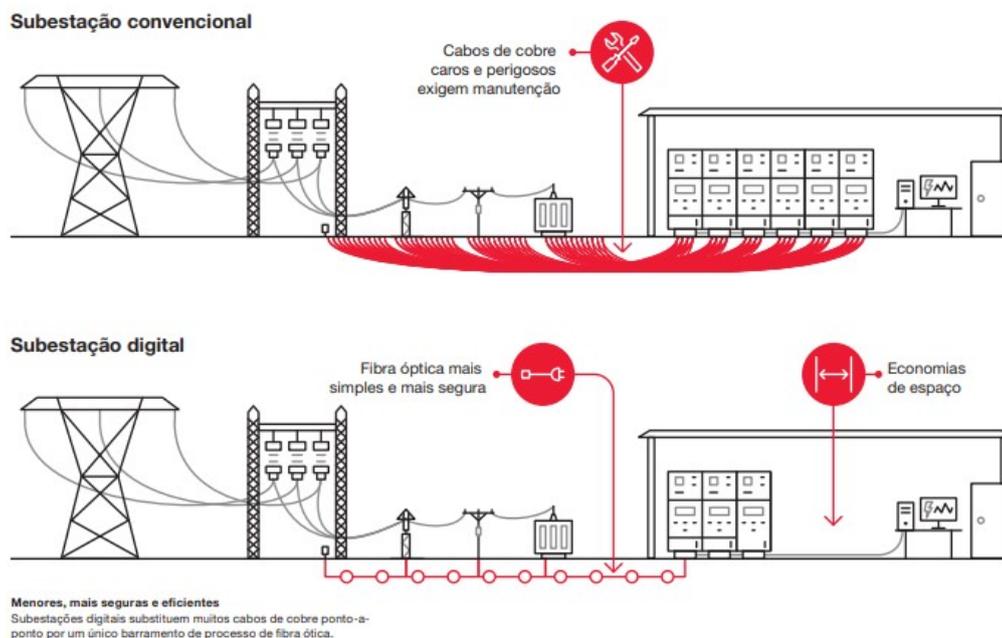


Figura 3.4: Comparação sobre a manutenção na SE Convencional x Digital.⁴

- **Impactos na operação e manutenção:** As subestações digitais po-

⁴ABB - <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A5495&LanguageCode=pt&DocumentPartId=pt&Action=Launch>

Tabela 3.1: Estimativa de cabos para construção da subestação convencional SE Lorena.

| Cabos de Cobre Blindados | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|------------|
| Formação | Total (m) | R\$/m | Total R\$ |
| 12 X 2,5 | 9205,75 | 13,48 | 124.093,51 |
| 4 X 4 | 8165 | 8,30 | 67.769,50 |
| 4 X 6 | 23196,65 | 10,66 | 247.276,29 |
| 6 X 2,5 | 47730,75 | 7,96 | 379.936,77 |
| Cabos de Cobre sem Blindagem | | | |
| Formação | Total (m) | R\$/m | Total R\$ |
| 1 X 35 | 207 | 9,16 | 1.896,12 |
| 1 X 95 | 69 | 25,15 | 1.735,35 |
| 1 X 300 | 1012 | 95,00 | 96.140,00 |
| 2 X 6 | 943 | 4,03 | 3.800,29 |
| 3 X 16 | 494,5 | 14,27 | 7.056,52 |
| 3 X 6 | 10965,25 | 5,77 | 63.269,49 |
| 4 X 10 | 23 | 12,91 | 296,93 |
| TOTAL GERAL | (m) | 102011,9 | |
| TOTAL GERAL | (R\$) | 993.270,77 | |

Tabela 3.2: Estimativa de cabos para construção da Subestação digital - SE Lorena.

| Cabos de Cobre Blindados | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|-----------|
| Formação | Total (m) | R\$/m | Total R\$ |
| 12 X 2,5 | 4899 | 13,48 | 66.038,52 |
| 4 X 4 | 1127 | 8,30 | 9.354,10 |
| 4 X 6 | 5193,4 | 10,66 | 55.361,64 |
| 6 X 2,5 | 9625,5 | 7,96 | 76.618,98 |
| Cabos de Cobre sem Blindagem | | | |
| Formação | Total (m) | R\$/m | Total R\$ |
| 1 X 35 | 207 | 9,16 | 1.896,12 |
| 1 X 95 | 69 | 25,15 | 1.735,35 |
| 1 X 300 | 1012 | 95,00 | 96.140,00 |
| 2 x 6 | 943 | 4,03 | 3.800,29 |
| 3 X 16 | 494,5 | 14,27 | 7.056,52 |
| 3 X 6 | 12391,25 | 5,77 | 71.497,51 |
| 4 X 10 | 23 | 12,91 | 296,93 |
| TOTAL CABOS | (m) | 35984,65 | |
| TOTAL CABOS | (R\$) | 389.795,96 | |
| TOTAL FIBRA OPTICA | (R\$) | 105.000,00 | |
| TOTAL GERAL | (R\$) | 494.795,96 | |

dem impactar a operação e manutenção do sistema elétrico, requerendo a capacitação de técnicos e engenheiros para lidar com a nova tecnologia. Nessa etapa avaliar-se os impactos na operação e manutenção do sistema elétrico e as implicações de longo prazo para o pessoal técnico

da empresa.

- **Custos operacionais e de manutenção:** As subestações digitais podem reduzir os custos operacionais e de manutenção, graças à maior eficiência e automação proporcionada pela tecnologia digital. É importante verificar esses custos e compará-los com os custos operacionais e de manutenção das subestações convencionais.
- **Contexto do sistema elétrico:** O contexto do sistema elétrico em que a subestação digital será implantada também é um fator importante a ser considerado. Por exemplo, as subestações digitais podem ser mais adequadas para sistemas de transmissão de energia elétrica de longa distância, em que a confiabilidade e eficiência são essenciais. Já em sistemas de distribuição, os custos de implantação podem ser um fator limitante.

3.4 Desafios e Limitações da Implementação de Subestações Digitais

A implantação de subestações digitais também apresenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a integração dos equipamentos digitais com os equipamentos analógicos existentes. Como a maioria das subestações ainda utiliza equipamentos analógicos, a transição para equipamentos digitais pode ser um processo lento e difícil.

Integração com sistemas legados: muitas subestações operam com sistemas legados, que podem não ser compatíveis com as tecnologias digitais mais recentes. A integração desses sistemas pode ser um desafio, exigindo a realização de ajustes e atualizações nos sistemas existentes, ou mesmo a substituição de equipamentos obsoletos.

Também há a necessidade de treinar os operadores para trabalhar com os novos equipamentos digitais. Os operadores precisam de treinamento especializado para operar e manter os equipamentos digitais, o que pode ser um processo demorado e dispendioso.

Segurança cibernética: a digitalização das subestações aumenta a vulnerabilidade a ataques cibernéticos, que podem afetar a confiabilidade e segurança do sistema elétrico como um todo. É essencial garantir que as subestações digitais estejam protegidas contra possíveis ameaças cibernéticas, por meio da implementação de medidas de segurança adequadas, como firewalls, anti-vírus e criptografia de dados. Algumas possíveis ameaças são representadas na figura 3.5:

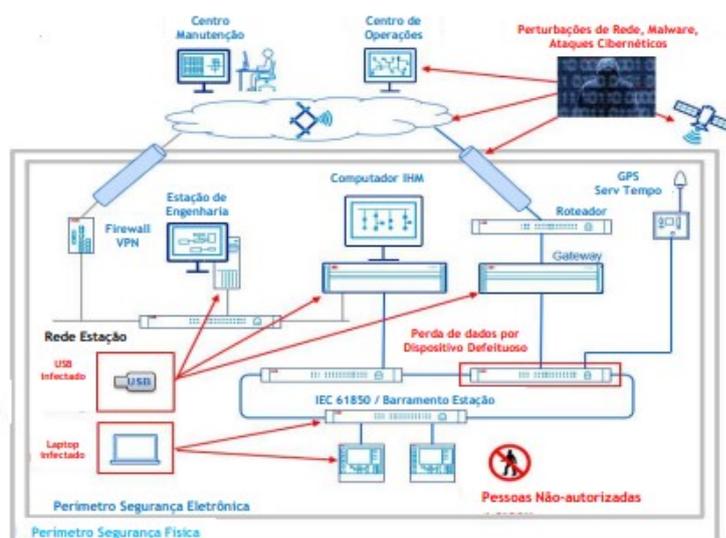


Figura 3.5: Ameaças Cibernéticas no sistema de uma subestação digital.⁵

Para garantir a segurança cibernética em subestações digitais, é necessário adotar medidas de proteção, como criptografia de dados, autenticação de usuários, detecção de intrusão e monitoramento constante. Deve-se também garantir a atualização dos sistemas de segurança e a capacitação dos profissionais envolvidos na operação e manutenção da subestação.

Algumas iniciativas têm sido adotadas para melhorar a segurança cibernética em subestações digitais. O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos (NIST) desenvolveu um conjunto de diretrizes para a segurança cibernética de infraestrutura crítica, que incluem orientações específicas para subestações elétricas. Além disso, a norma IEC 62443 define um conjunto de requisitos de segurança cibernética para sistemas de automação industrial, incluindo subestações elétricas.

⁵Subestações ABB

- Custos elevados: a implantação de subestações digitais envolve custos elevados, tanto na aquisição de equipamentos e software especializados, quanto na capacitação dos profissionais envolvidos. Ressalta-se que a manutenção e atualização constante desses sistemas também demandam investimentos significativos.
- Disponibilidade de energia elétrica confiável: a confiabilidade e disponibilidade da energia elétrica são fundamentais para o funcionamento das subestações digitais. Problemas como interrupções de energia, oscilações de tensão e distúrbios na rede podem afetar o desempenho desses sistemas, exigindo a implementação de medidas de proteção e contingência.

Outro exemplo de sucesso da implantação dessa tecnologias é o projeto de modernização do sistema elétrico da cidade de Santiago, no Chile, que envolveu a instalação de subestações digitais e a implementação de tecnologias avançadas de monitoramento e controle da rede elétrica. O projeto resultou em uma redução significativa no número de interrupções de energia e na melhoria da qualidade do serviço prestado aos consumidores.

As subestações digitais têm ganhado cada vez mais espaço no setor elétrico, apresentando diversas vantagens em relação às subestações convencionais, como maior eficiência, maior segurança, maior flexibilidade e menor custo de manutenção. Nesse contexto, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de explorar as aplicações, tecnologias e resultados obtidos com o uso de subestações digitais.

Recentemente, alguns trabalhos têm sido realizados em relação às subestações digitais, com o objetivo de avaliar sua viabilidade técnica e econômica em diferentes contextos. Um exemplo disso é o estudo realizado por Arif et al. (2020), que avaliaram a implementação de uma subestação digital em uma rede elétrica de distribuição. O estudo comparou o desempenho da subestação digital com uma subestação convencional, levando em consideração fatores como confiabilidade, segurança e eficiência energética. Os resultados mostraram que a subestação digital apresentou um desempenho superior em

relação à subestação convencional, destacando-se principalmente em termos de eficiência energética.

3.4.1 Aplicações

As aplicações de subestações digitais têm sido exploradas em diversos trabalhos recentes. Y. Zhang et al. (2018) apresentam um estudo sobre a aplicação de subestações digitais em sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, enfatizando a flexibilidade e a facilidade de configuração dos sistemas digitais. Além disso, os autores destacam a possibilidade de integração de diversas funções em um único dispositivo, como medição, controle, proteção e comunicação.

Uma aplicação importante de subestações digitais é a sua utilização em sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão. Em um estudo recente, Xin et al. (2010) apresentam uma solução de subestação digital para um sistema de distribuição de energia elétrica em uma área rural. Os autores destacam a facilidade de instalação e manutenção do sistema digital, bem como a sua capacidade de monitoramento e controle remoto.

3.4.2 Tecnologias

As tecnologias utilizadas em subestações digitais são outro ponto importante que tem sido explorado em diversos trabalhos. Um exemplo é o estudo de Y. Zhang et al. (2018), que apresentam uma solução de subestação digital baseada na tecnologia de Internet das Coisas (IoT). Os autores destacam a utilização de sensores e dispositivos inteligentes para a coleta de dados e o monitoramento remoto do sistema.

Outro trabalho sobre o tema é o estudo realizado por Jia et al. (2020), que avaliaram a aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA) em subestações digitais para melhorar a eficiência operacional. Neste estudo, foi proposto um modelo de diagnóstico de falhas baseado em IA, capaz de identificar anomalias em tempo real e auxiliar na tomada de decisões em relação à manutenção da subestação. Os resultados mostraram que a aplicação de

técnicas de IA pode melhorar significativamente a eficiência operacional de subestações digitais, reduzindo o tempo de inatividade e aumentando a confiabilidade do sistema. Algumas aplicações de IoT podem ser vistas na figura 3.6

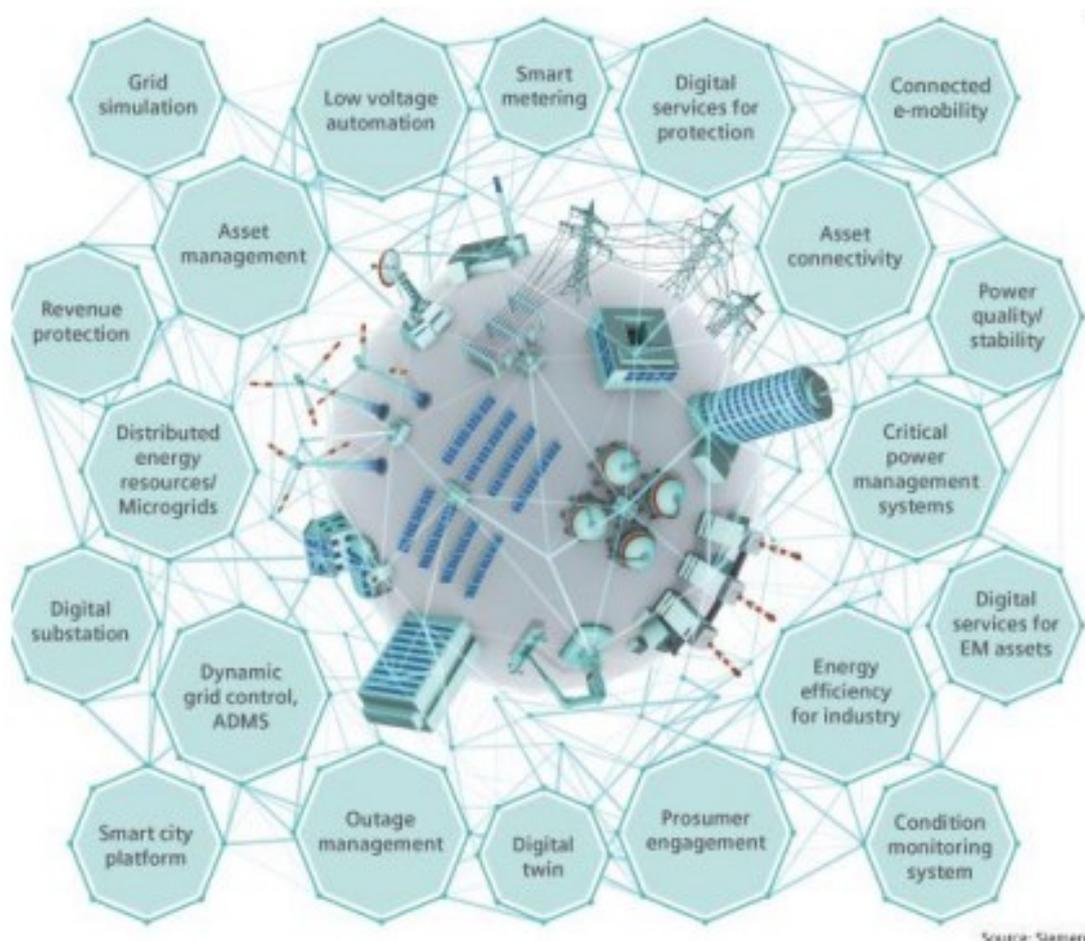


Figura 3.6: IoT no setor elétrico e suas possíveis aplicações.⁶

E ainda pode-se citar diversos estudos em andamento sobre o uso de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e big data em subestações digitais. Essas tecnologias permitem a coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando o monitoramento e controle remoto das subestações. Esses estudos visam não só melhorar a eficiência operacional das subestações, mas também aprimorar a qualidade do serviço prestado aos usuários

⁶<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:05f93d5a3c096441998512706a42840c51fd3f68/2018-05-ew-article-iot-manfred-unterweger-en.pdf>

Em um estudo recente, Xingxin et al. (2022) apresentam uma solução de subestação digital que utiliza IA para o diagnóstico e previsão de falhas. Os autores destacam a capacidade da solução de identificar possíveis problemas antes mesmo de ocorrerem, permitindo a tomada de ações preventivas. Na figura 3.7 é representado o fluxograma do programa desenvolvido no estudo mencionado.

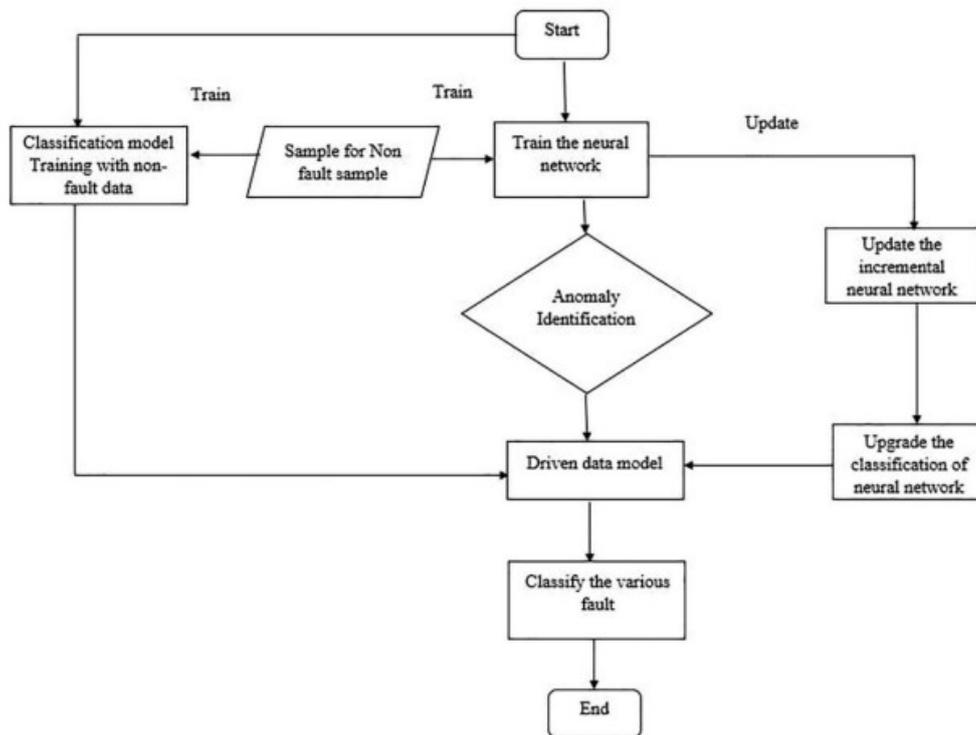


Figura 3.7: Fluxograma da ferramenta de previsão de falhas. ⁷

⁷Xingxin et al. (2022)

Capítulo 4

Resultados e Perspectivas Futuras

4.1 Resultados

Chen et al. (2020) mostram uma análise comparativa entre subestações convencionais e subestações digitais, com foco na eficiência energética. Os autores concluem que as subestações digitais apresentam maior eficiência energética, principalmente devido à redução de perdas de energia.

Um estudo de W. Wei et al. (2021) apresenta uma análise de viabilidade econômica e ambiental de subestações digitais em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores concluem que a utilização de subestações digitais pode trazer benefícios significativos em termos de redução de custos e emissões de gases de efeito estufa.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que a implementação de subestações digitais de energia elétrica apresenta vantagens significativas em relação às subestações convencionais. Entre as principais vantagens estão a maior eficiência energética, a maior confiabilidade e segurança, e a possibilidade de automação mais avançada dos sistemas de proteção. Como pode ser visto na tabela 4.1.

Outro resultado importante foi a identificação de tecnologias e estratégias que podem ser adotadas para maximizar os benefícios da subestação digital. Entre essas tecnologias destacam-se os sistemas de automação avançados, os sistemas de comunicação robustos e a utilização de inteligência artificial para

a análise de dados.

Tabela 4.1: Tabela de Comparação (Fonte: Autoria própria)

| CARACTERÍSTICAS |  SUBESTAÇÃO DIGITAL |  SUBESTAÇÃO CONVENCIONAL |
|--|---|---|
|  Eficiência Energética | Monitoramento e controle avançados para gestão eficiente da energia elétrica | Gestão menos precisa, resultando em potenciais perdas energéticas |
|  Qualidade de Serviço | Resposta rápida às falhas, reduzindo os tempos de interrupção e melhorando a qualidade do fornecimento de energia | Tempo de resposta mais lento para identificar e solucionar falhas |
|  Flexibilidade e Modularidade | Configuração flexível e expansão facilitada para atender às demandas em constante mudança | Restrições de configuração e expansão limitadas |
|  Monitoramento e Diagnóstico | Sistemas de monitoramento e diagnóstico avançados para identificar problemas em tempo real | Deteção de problemas mais demorada, dependendo de verificações manuais |
|  Integração de Tecnologias Digitais | Utilização de IoT e computação em nuvem para análise de dados e tomada de decisões informadas | Ausência de integração de tecnologias digitais, resultando em processos mais manuais |
|  Segurança Cibernética | Medidas de segurança avançadas para proteger contra ameaças cibernéticas | Menor enfoque na segurança cibernética, aumentando a vulnerabilidade a ataques |

No entanto, é importante destacar que a implementação de subestações digitais também apresenta desafios significativos, especialmente no que se refere à segurança cibernética e à integração com sistemas existentes. É necessário que sejam adotadas medidas adequadas para garantir a segurança dos sistemas e a integração efetiva com os sistemas existentes.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a subestação digital é viável do ponto de vista econômico e tecnológico, desde que sejam adotadas as medidas adequadas para garantir a segurança dos sistemas e a integração com os sistemas existentes. A adoção da subestação digital pode trazer benefícios significativos em termos de eficiência energética, confiabilidade e segurança, o que pode resultar em economias financeiras importantes a longo prazo.

Porém, é importante ressaltar que a viabilidade da subestação digital deve ser avaliada caso a caso, considerando as características específicas de cada sistema. É fundamental que sejam realizados estudos de viabilidade detalhados e que sejam adotadas medidas adequadas para garantir a segurança e a efetividade dos sistemas.

Em geral, os resultados obtidos neste trabalho mostram que a subestação

digital é uma tecnologia promissora e que pode trazer benefícios significativos para o setor de energia elétrica.

4.2 Tendências futuras e perspectivas para subestações digitais de energia elétrica

O avanço tecnológico tem mudado a forma como a energia elétrica é produzida, distribuída e consumida, e com isso surgem novas oportunidades para a digitalização de subestações. As subestações digitais estão se tornando cada vez mais comuns no setor elétrico, e muitas empresas estão investindo nessa tecnologia para melhorar a eficiência e a confiabilidade da rede elétrica. Além disso, a digitalização pode reduzir os custos operacionais, permitindo que as empresas ofereçam preços mais competitivos aos consumidores. Outra tendência para as subestações digitais é a adoção de soluções de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina para aprimorar o desempenho e a eficiência das subestações. A IA pode ser usada para otimizar a manutenção preventiva, antecipar falhas, identificar anomalias e até mesmo prever a demanda de energia. Além disso, a IA pode ser usada para melhorar a eficiência energética das subestações, por exemplo, otimizando o uso de energia e minimizando o desperdício.

O uso de tecnologias de comunicação sem fio, como o 5G e o Wi-Fi 6, é uma outra tendência para melhorar a conectividade e a velocidade de transmissão de dados nas subestações digitais. Isso pode permitir a implantação de sistemas de automação mais avançados e a coleta de dados em tempo real sobre a rede elétrica.

Exemplo de aplicação prática de tendências futuras para subestações digitais é a subestação digital da Enel em Livorno, na Itália. Essa subestação utiliza tecnologias avançadas de comunicação sem fio e monitoramento em tempo real para melhorar a eficiência e a confiabilidade da rede elétrica. A subestação também é capaz de se adaptar automaticamente a mudanças na demanda de energia, tornando a rede elétrica mais flexível e resiliente.

Uma outra tendência é a integração das subestações digitais com outras tecnologias de energia renovável, como a geração distribuída de energia solar e eólica. Com a adoção de tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de íon de lítio, as subestações digitais podem gerenciar a carga de energia proveniente de diferentes fontes, garantindo a estabilidade da rede elétrica.

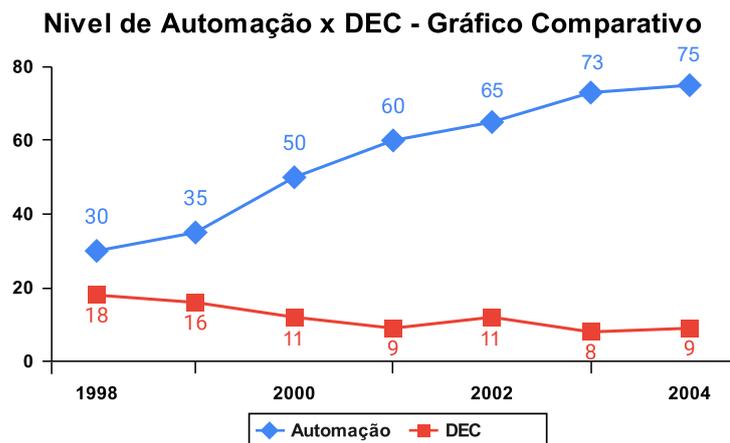
Um exemplo de subestação digital que incorpora essas tendências é a subestação digital da Siemens em Nuremberg, Alemanha. A subestação é equipada com sensores e dispositivos digitais, permitindo a coleta de dados em tempo real para monitoramento e controle. E também, a subestação é integrada com tecnologias de energia renovável, incluindo a geração distribuída de energia solar e um sistema de armazenamento de bateria de íon de lítio (Siemens, 2021).

Segundo Sánchez et al. (2020), a digitalização das subestações é uma das principais tendências para a modernização do setor elétrico. Os autores afirmam que a digitalização permite maior flexibilidade e capacidade de resposta às mudanças na demanda de energia, além de melhorar a qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia. Além disso, a digitalização permite a redução de custos operacionais e de manutenção, aumentando a eficiência da rede elétrica como um todo.

No gráfico apresentado na figura 4.1 é possível observar a correlação entre o aumento da automação do sistema com o indicador DEC (Duração Equivalente de interrupção por Consumidor) das subestações da Eletropaulo entre 1998 x 2004.

As subestações digitais têm se mostrado uma solução eficiente e confiável para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos de alta tensão. No entanto, existem outras soluções tecnológicas disponíveis no mercado que também buscam alcançar esses objetivos. Nesse sentido, uma análise comparativa entre subestações digitais e outras soluções tecnológicas

¹Adaptado de: XII SIMPEP (2005) - KVIATKOWSKI, Márcio Augusto; GOZZI, Segio. Impactos da automação de subestações de energia em indicadores técnicos da ANEEL. SIMPEP: XII, Bauru - SP, p. 11-12, 2005

Figura 4.1: Nível de automação x DEC.¹

podem ser úteis para avaliar qual delas é a mais adequada para cada contexto específico.

Uma das soluções tecnológicas mais utilizadas para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos de alta tensão são as subestações convencionais. Essas subestações utilizam equipamentos e tecnologias mais simples, como disjuntores e transformadores, para realizar o monitoramento e o controle do sistema elétrico. No entanto, as subestações convencionais apresentam algumas limitações, como a falta de flexibilidade para acomodar mudanças no sistema elétrico e a falta de capacidade para lidar com grandes quantidades de dados em tempo real.

Outra solução tecnológica que tem ganhado destaque nos últimos anos são as subestações híbridas. Essas subestações combinam tecnologias digitais e convencionais para obter o melhor dos dois mundos. Assim, é possível aproveitar as vantagens das subestações digitais, como o monitoramento e o controle em tempo real, ao mesmo tempo em que se mantém a flexibilidade e a simplicidade das subestações convencionais.

Além das subestações híbridas, também existem outras soluções tecnológicas disponíveis no mercado para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos de alta tensão. Entre elas, podemos citar as soluções de smart grid, que buscam integrar tecnologias digitais, como sensores e sistemas de automação, com a rede elétrica convencional. Essas soluções permitem um gerenciamento mais eficiente da rede elétrica, redução de perdas e aumento

da eficiência energética.

Em comparação com essas soluções tecnológicas, as subestações digitais apresentam algumas vantagens importantes, como a capacidade de lidar com grandes quantidades de dados em tempo real, a flexibilidade para acomodar mudanças no sistema elétrico e a possibilidade de integrar diferentes tecnologias e equipamentos em uma única plataforma. Além disso, as subestações digitais também apresentam uma maior eficiência energética, já que permitem um gerenciamento mais preciso e eficiente da rede elétrica.

No entanto, as subestações digitais também apresentam alguns desafios, como a necessidade de capacitação operadores, a complexidade da tecnologia envolvida e o custo de implantação e manutenção. Nesse sentido, é importante realizar uma análise comparativa entre as diferentes soluções tecnológicas disponíveis no mercado para identificar qual delas é a mais adequada para cada contexto específico.

Capítulo 5

Considerações Finais

Considerando os resultados apresentados neste trabalho, é possível concluir que a implementação de subestações digitais de energia elétrica é uma alternativa viável e promissora, que apresenta vantagens significativas em relação às subestações convencionais. A subestação digital oferece maior eficiência energética, maior confiabilidade e segurança, além de permitir uma automação mais avançada dos sistemas de proteção.

No entanto, é importante destacar que a adoção da subestação digital também apresenta desafios significativos, especialmente no que se refere à segurança cibernética e à integração com sistemas existentes. É fundamental que sejam adotadas medidas adequadas para garantir a segurança dos sistemas e a integração efetiva com os sistemas existentes. Nesse sentido, sugere-se a realização de estudos mais detalhados sobre os aspectos de segurança cibernética envolvidos na implementação de subestações digitais. Além disso, é importante desenvolver estratégias efetivas para a integração de sistemas existentes com a subestação digital, de forma a garantir a efetividade dos sistemas e minimizar os riscos de interrupção no fornecimento de energia.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a avaliação dos custos e benefícios da implementação de subestações digitais em diferentes contextos, podendo utilizar como estudo de caso a subestação de Primavera que está sendo digitalizada. É importante analisar as características específicas de cada sistema e identificar as estratégias mais adequadas para maximizar os benefícios da

subestação digital em cada caso.

Em suma, a subestação digital representa uma alternativa viável e promissora para o setor de energia elétrica, que apresenta vantagens significativas em relação às subestações convencionais. No entanto, é fundamental adotar medidas adequadas para garantir a segurança e a integração efetiva dos sistemas, além de realizar estudos mais detalhados sobre os aspectos de custo e benefício envolvidos na implementação de subestações digitais. Com essas medidas, é possível maximizar os benefícios da subestação digital e contribuir para o avanço do setor de energia elétrica.

Bibliografia

- Akbari, E., Ahmadinia, A., & Gharehpetian, G. B. (2016). Substation automation system: Architecture, security, and reliability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 732-744.
- Al-absi, A. M., Abdullah, A. H., Saleh, A. M., et al. (2021). Overview of the smart grid concept, components, and communication technologies. *IET Smart Grid*, v., 4, 280-291.
- Araújo, J. M., et al. (2014). *Subestações elétricas: projeto, construção e manutenção*. São Paulo: Érica.
- Arif, M., Mekhilef, S., & Muhammad-Sukki, F. (2020). Digital substation vs conventional substation: A comparative study. *IEEE Access*, 8, 82401-82411.
- Bocquillon, L. (2002). *Subestações elétricas*. Rio de Janeiro: LTC.
- Carleto, N. (2017). *Subestações elétricas: Controle de processos industriais. 1. ed* (1st ed., Vol. 1). Brasília: NT Editora. Acessado de <https://avant.grupont.com.br/dirVirtualLMS/arquivos/texto/2b97358dfffc8ed5b9881db23255d654c.pdf>
- Castro, A. S. A. d. (2019). *Análise dos riscos e vulnerabilidades em subestações de energia elétrica. 2019. 67 f.* Juiz de Fora: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Chen, J., Chen, S., Chen, Y., Zhang, B., & Song, Y. (2015). Research on substation automation system based on iec 61850. In *2015 IEEE international conference on cyber technology in automation* (p. 154-157). 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER): IEEE.
- Chen, J., et al. (2020). Economic analysis of energy storage system for a

- distributed generation system using particle swarm optimization. *Renewable Energy*, 127(1), 1826-1836.
- Dantas, A. S., et al. (2019). *Automação e proteção de sistemas elétricos de potência: Fundamentos, tecnologias e aplicações. 1 ed.* São Paulo: Érica.
- Fagundes, C. L. (2015). *Proteção de sistemas elétricos de potência: fundamentos teóricos e práticos. 1 ed.* São Paulo: Érica.
- Fang, X., Huang, Y., Cheng, S., & Wang, S. (2018). A survey of communication network technologies in digital substation. In *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* (p. 1-6). IEEE.
- Gupta, A., Kumar, P., Pandey, N., et al. (2020). Digital substation: A review. In *11th IEEE Power India International Conference (PIICON)* (p. 1-6). IEEE.
- Jia, Y., Li, X., Li, Y., & Yang, W. (2020). Application of artificial intelligence in digital substation fault diagnosis. *IEEE Access*, 8(108), 6929-10693.
- Lima, F. J. F., & Costa, A. L. A. (2018). *Subestações digitais de energia elétrica. XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.*
- Lima, R. A., & Ferreira, R. T. (2017). Subestação digital uma visão geral da tecnologia. In *XVIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.* São Paulo: Érica.
- Maldonado, J. C. R., et al. (2019). Subestações digitais em sistemas de energia elétrica: Revisão e análise. *IEEE Latin America Transactions*, v., 17(1), 103-113.
- Nigim, K., et al. (2019). Development of a framework for the design of digital substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v., 34(4), 1604-1614.
- Panda, P., Padhi, S., & Das, S. K. D. S. (2021). An overview of recent advancements and future perspective. In P. Communication & E. S. (scopes) (Eds.), *International conference on signal processing* (p. 181-186). Online. Proceedings. Piscataway: IEEE p.

- Pansini, A. J., et al. (2015). *Subestações de energia elétrica. 1^a ed.* São Paulo: Érica.
- Siemens. (2021). *Siemens' digital substation ensures grid stability and security of supply.* Acessado em 2023-03-01 de <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/energy/2022/nuremberg-digital-substation.html>
- SIEMENS. (2022). *Distribuição de energia: o que são subestações e como funcionam.* Acessado de <https://www.siemens.com/br/pt/empresa/stories/energia/distribuicao-de-energia-o-que-sao-subestacoes-e-como-funcionam.html>
- Siqueira, R. M., et al. (2020). Subestações digitais: tecnologias e aplicações. In C. B. D. E. A. Industrial (Ed.), *12 belo horizonte.* Anais [...] Belo Horizonte: ABCM.
- Souza, D., & Nicasio, E. H. (2016). *Automação de subestações com protocolo iec-61850: Estudo de caso* (Unpublished master's thesis). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. (Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Automação Industria))
- Sánchez, J. L., Rojas, C. R., & Quijano, N. (2020). Digital substation and its benefits: A review. *IEEE Latin America Transactions*, *18*(12), 2334-2345.
- Ullah, I., Mirza, F. A., & Chaudhry, M. A. (2017). A review of protection system in power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*, 1105-1116.
- Wei, L., Li, Z., Chen, X., & Cai, W. (2018). Research on digital substation based on iec 61850. In *2018 15th international conference on electrical engineering/electronics* (p. 313-316). Telecommunications, and Information Technology (ECTI-CON), . IEEE: Computer.
- Wei, W., Li, J., Chen, B., et al. (2021). Embodied greenhouse gas emissions from building china's large-scale power transmission infrastructure. *Nat Sustain*, *4*, 739-747. Acessado de <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00704-8> doi: 10.1038/s41893-021-00704-8
- Xin, J., Liao, Z., & Wen, F. (2010). Intelligent alarm processing and fault

- diagnosis in digital substations. In C. Zhejiang (Ed.), *2010 international conference on power system technology* (p. 1-5).
- Xingxin, C., Xin, Z., & Gangming, W. (2022). Research on online fault detection tool of substation equipment based on artificial intelligence. *Journal of King Saud University-Science*, *34*(6), 102149.
- Yang, Y., Liu, J., Wang, Y., & Wen, J. (2019). A review on iec 61850 standard in digital substations. In I. C. and (Ed.), *2019 ieee international conference on power* (p. 272-277). IEEE: and Systems (ICPICS).
- Zayed, T., Khalifa, A., & El-sayed, H. D. S. S.-o.-t.-A. T. (2020). Challenges, and future directions. *IEEE Access*, *v.*, *8*, 165601-165619.
- Zhang, J., et al. (2017). Digital substation: Concept, benefits, and technologies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *v.*, *32*(3), 1263-1273.
- Zhang, Y., Tian, Y., Li, Y., et al. (2018). Research on intelligent substation technology. In *2018 5th international conference on systems and informatics (icsai)* (p. 84-89). IEEE.
- Zhou, H., et al. (2020). Application of the digital substation based on the intelligentized equipment. In *Proceedings of the 2020 ieee 3rd international conference on renewable energy and power engineering (repe)* (p. 23-28).