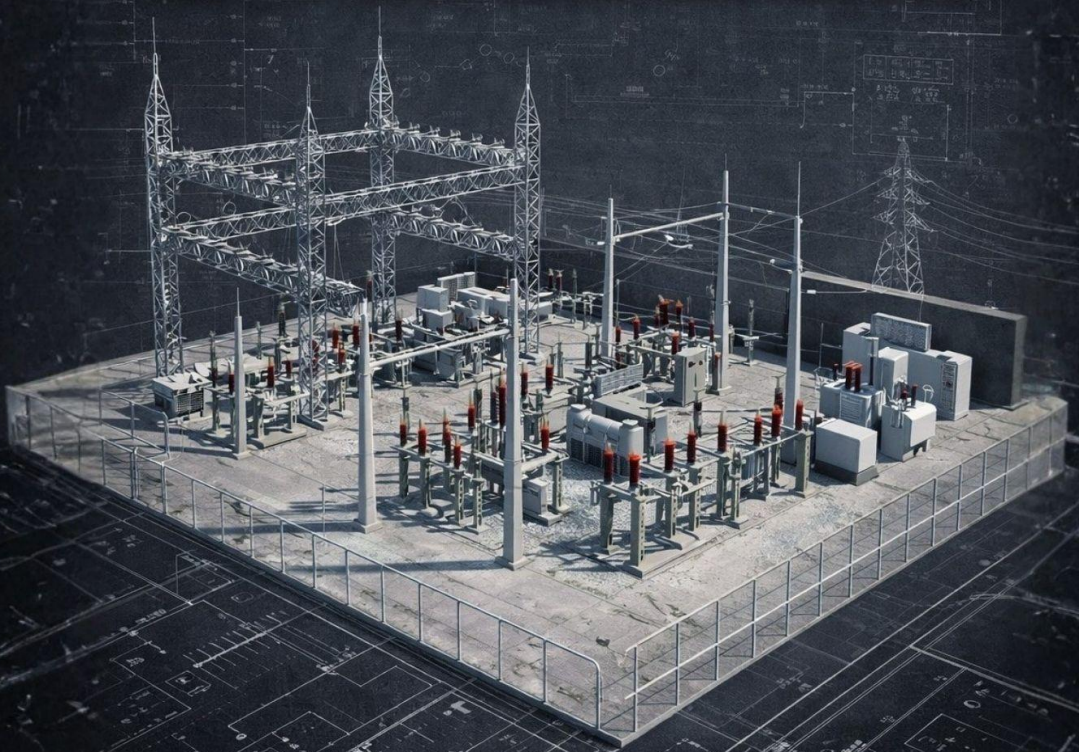




SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

Guia prático para elaboração de projetos



EDIBERTO BERNARDES CAMPOS JUNIOR

SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

GUIA PRÁTICO PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS

1ª Edição



AUTOR

Ediberto Bernardes Campos Júnior

DOI: 10.47538/AC-2026.05



Ano 2026

SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

GUIA PRÁTICO PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS

1ª Edição

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

C213s

Campos Júnior, Ediberto Bernardes

Subestações de alta tensão [recurso eletrônico] : guia prático para elaboração de projetos / Ediberto Bernardes Campos Júnior. - 1. ed. - Natal [RN] : Amplamente, 2026. recurso digital

Formato: ebook

Modo de acesso: world wide web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5321-087-5 (recurso eletrônico)

DOI: 10.47538/AC-2026.05

1. Engenharia elétrica. 2. Subestações elétricas. 3. Alta voltagem. 4. Livros eletrônicos. I. Título.

26-102987.0

CDD: 621.3126

CDU: 621.3.027.3



Meri Gleice Rodrigues de Souza - Bibliotecária - CRB-7/6439

Direitos para esta edição cedidos pelos
autores à Editora Amplamente.
Editora Amplamente
Empresarial Amplamente Ltda.
CNPJ: 35.719.570/0001-10
publicacoes@editoraamplamente.com.br
www.amplamentecursos.com
Telefone: (84) 999707-2900
Caixa Postal: 3402
CEP: 59082-971
Natal- Rio Grande do Norte – Brasil
Copyright do Texto © 2025 Os autores
Copyright da Edição © 2025 Editora
Amplamente
Declaração dos autores/ Declaração da
Editora: disponível em



<https://www.amplamentecursos.com/politicas-editoriais>

Editora-Chefe: Dayana Lúcia R. de Freitas
Assistentes Editoriais: Caroline Rodrigues
de F. Fernandes; Margarete Freitas
Baptista

Bibliotecária: Meri Gleice Rodrigues de
Souza - CRB-7/6439

Projeto Gráfico, Edição de Arte e
Diagramação: Luciano Luan Gomes Paiva;
Caroline Rodrigues de F. Fernandes
Capa: Canva®/Freepik®

Parecer e Revisão por pares: Revisores

CONSULTORIA TÉCNICA E REVISÃO
CRÍTICA: Rita de Cássia Soares Duque



Ano 2026

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	5
SOBRE O AUTOR.....	7
INTRODUÇÃO	9
CAPÍTULO I.....	11
Subestações de Alta Tensão no Contexto dos Sistemas Elétricos de Potência	
CAPÍTULO II	20
Premissas de Engenharia, Normas Técnicas e Critérios de Projeto	
CAPÍTULO III.....	27
Arquitetura das Subestações e Arranjos Elétricos	
CAPÍTULO IV	36
Segurança Operacional, Aterramento e Proteção em Subestações de Alta Tensão	
CAPÍTULO V.....	43
Especificação Técnica e Validação de Equipamentos de Alta Tensão	
CAPÍTULO VI.....	54
Sistema de Proteção, Comando e Supervisão de Subestações (SPCS)	
CAPÍTULO VII.....	65
Padronização, Formação Profissional e Sustentação Técnica dos Sistemas Elétricos	

CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

APRESENTAÇÃO

A concepção, a implantação e a operação de subestações de alta tensão inserem-se entre as atividades mais sensíveis e estratégicas dos sistemas elétricos de potência. Trata-se de um campo no qual decisões de engenharia extrapolam o domínio estritamente técnico e repercutem diretamente na confiabilidade do fornecimento, na segurança das pessoas, na integridade dos ativos e na sustentabilidade dos sistemas ao longo do tempo. Nesse contexto, a necessidade de referenciais técnicos consistentes, organizados e alinhados às boas práticas de engenharia torna-se permanente.

Este manual nasce da convergência entre experiência profissional consolidada e a demanda recorrente por materiais que articulem fundamentos técnicos, critérios normativos e práticas de engenharia de forma integrada e aplicada. Ao longo de sua elaboração, buscou-se estruturar um percurso técnico que respeitasse a lógica dos sistemas elétricos de potência, evitando abordagens fragmentadas e priorizando a coerência entre projeto, especificação, proteção, supervisão e operação.

A obra não se propõe a substituir normas técnicas, manuais corporativos ou documentos regulatórios. Ao contrário, assume como premissa a centralidade desses instrumentos, utilizando-os como base para a sistematização do conhecimento e para a discussão crítica de decisões de engenharia. O objetivo é oferecer ao leitor um guia técnico-acadêmico que favoreça a compreensão integrada dos sistemas, apoiando tanto a formação profissional quanto a atuação em contextos reais de projeto e operação de subestações.

A estrutura adotada reflete essa intenção. Os capítulos iniciais estabelecem os fundamentos e o posicionamento funcional das subestações no sistema elétrico de potência. Na sequência, são

discutidas a arquitetura elétrica, os critérios de arranjos, a especificação e a validação de equipamentos de alta tensão, bem como os sistemas de proteção, comando e supervisão. O manual é encerrado com uma síntese orientada à padronização técnica, à formação profissional continuada e à responsabilidade inerente à prática da engenharia elétrica contemporânea.

Ao longo do texto, optou-se por uma linguagem técnica, objetiva e integradora, acompanhada de exemplos pontuais e diagramas conceituais estritamente necessários à compreensão dos temas tratados. Essa escolha editorial busca preservar o rigor acadêmico sem comprometer a aplicabilidade prática, reconhecendo que a engenharia se constrói na interseção entre teoria, norma e experiência.

Destina-se, portanto, a engenheiros, projetistas, gestores técnicos, estudantes de pós-graduação e demais profissionais que atuam ou pretendem atuar no campo dos sistemas elétricos de potência, especialmente no domínio das subestações de alta tensão. Espera-se que este manual contribua para o fortalecimento de práticas de engenharia mais seguras, coerentes e tecnicamente responsáveis, alinhadas às exigências atuais e futuras do setor elétrico.

SOBRE O AUTOR

Ediberto Bernardes Campos Júnior é engenheiro eletricitista, graduado pela Universidade Federal de Goiás (UFG), com trajetória profissional consolidada no campo dos **Sistemas Elétricos de Potência**, especialmente nas áreas de **projeto, implantação e operação de subestações de alta tensão**.

Ao longo de mais de uma década de atuação no setor elétrico, desenvolveu e coordenou projetos eletromecânicos e civis de subestações elevadoras, ampliações de rede básica e sistemas associados de transmissão, participando de empreendimentos de grande porte e elevada complexidade técnica. Destaca-se sua atuação no **Complexo Eólico Mundo Novo**, no estado do Rio Grande do Norte, empreendimento com capacidade instalada de 160 MVA, no qual esteve à frente dos projetos da subestação elevadora 34,5/230 kV, da linha de transmissão associada e das conexões em subestação integrante da rede básica.

Sua experiência profissional inclui colaboração direta com concessionárias e transmissoras de energia de abrangência nacional, entre as quais se destacam **Enel, CPFL, EDP, Furnas e CHESF**, participando de processos de padronização técnica, definição de critérios de engenharia, homologação de equipamentos de alta tensão e elaboração de documentos técnicos normativos aplicáveis a sistemas críticos.

Possui atuação relevante no desenvolvimento de **sistemas de aterramento e SPDA para subestações**, tendo sido responsável por estudos de resistividade do solo, projetos de malhas de aterramento e adequação de instalações às exigências normativas e de segurança operacional. Também contribuiu para a padronização de estruturas metálicas utilizadas em subestações compactas,

posteriormente incorporadas como referência técnica por concessionárias de distribuição.

No campo da formação profissional, coordenou a implantação do **Centro de Treinamento em Alta Tensão do Estado de Goiás**, iniciativa realizada em parceria com o SENAI GO e a Enel Goiás, inaugurada em 2020, voltada à capacitação prática de profissionais do setor elétrico. O centro consolidou-se como espaço de formação técnica aplicada, atendendo anualmente um número expressivo de profissionais da área.

Atualmente, atua em funções de coordenação técnica e gestão de contratos em empresas de engenharia do setor elétrico e é **mestrando em Gerenciamento de Projetos** pela Aliva University (Estados Unidos). Possui domínio avançado da língua inglesa, com proficiência equivalente ao nível C2 do Quadro Europeu Comum de Referência, e é profissional registrado no **Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA)**.

Sua atuação é orientada pela integração entre fundamentos técnicos, padronização normativa, segurança operacional e responsabilidade profissional continuada, princípios que estruturam a concepção e o desenvolvimento deste manual.

INTRODUÇÃO

Este guia tem como objeto técnico a **concepção, a organização e a operação de subestações de alta tensão no contexto dos sistemas elétricos de potência**. Parte-se do entendimento de que essas instalações constituem elementos estruturantes do sistema elétrico, concentrando decisões de engenharia que impactam diretamente a confiabilidade do fornecimento, a segurança operacional e a integridade dos ativos ao longo de seu ciclo de vida.

A abordagem adotada fundamenta-se na **integração entre princípios teóricos, critérios normativos e práticas consolidadas de engenharia**. Ao invés de tratar os temas de forma fragmentada, o manual organiza o conhecimento segundo uma lógica sistêmica, na qual arquitetura elétrica, especificação de equipamentos, sistemas de proteção, comando e supervisão são compreendidos como partes interdependentes de um mesmo conjunto técnico.

Essa opção **metodológica reflete a realidade dos projetos e das operações em subestações, nos quais decisões isoladas tendem a gerar inconsistências técnicas e operacionais**.

O conteúdo foi estruturado de modo a servir tanto como referência de consulta quanto como instrumento de formação técnica continuada. Cada capítulo desenvolve um **eixo específico do sistema**, preservando coerência conceitual com os demais e mantendo nível de detalhamento compatível com o caráter de **manual técnico-acadêmico**. Exemplos pontuais e diagramas conceituais são empregados de forma controlada, com a finalidade de apoiar a compreensão funcional, **sem substituir normas técnicas, procedimentos corporativos ou projetos executivos**.

Este manual destina-se a engenheiros, projetistas, profissionais de operação, gestores técnicos e estudantes de pós-

graduação que atuam ou pretendem atuar no campo dos sistemas elétricos de potência. Espera-se que a leitura contribua para a consolidação de práticas de engenharia mais consistentes, fundamentadas e alinhadas às exigências de segurança, desempenho e padronização técnica que caracterizam o setor elétrico contemporâneo.

A partir desta introdução, o Capítulo 1 estabelece os fundamentos conceituais e o posicionamento funcional das subestações no sistema elétrico de potência, servindo como base para o desenvolvimento técnico dos capítulos subsequentes.

CAPÍTULO I

Subestações de Alta Tensão no Contexto dos Sistemas Elétricos de Potência

Apresentação

O projeto de subestações de alta tensão exige compreensão prévia do Sistema Elétrico de Potência como estrutura integrada, na qual geração, transmissão e distribuição operam de forma coordenada. A literatura clássica da área demonstra que a análise fragmentada de componentes compromete a confiabilidade e a estabilidade do sistema, razão pela qual o entendimento sistêmico constitui requisito inicial para qualquer decisão de engenharia (Stevenson Jr., 1982; Grainger; Stevenson Jr., 1994).

Este capítulo estabelece os fundamentos conceituais que orientam todo o manual, delimitando o papel das subestações de alta tensão como elementos estratégicos para operação, proteção e controle do sistema elétrico. Ao fixar esses conceitos iniciais, cria-se a base necessária para a compreensão dos critérios normativos, das escolhas arquitetônicas e das decisões técnicas que estruturam a engenharia de subestações, as quais serão aprofundadas ao longo do manual, conforme a abordagem sistêmica proposta por Kundur (1994).

1.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo consiste em apresentar os conceitos estruturantes do manual, definindo o Sistema Elétrico de Potência, caracterizando as subestações de alta tensão e explicitando a relação entre projeto, confiabilidade e segurança. Esses elementos são tratados como fundamentos técnicos indispensáveis à atuação

do engenheiro projetista, cuja responsabilidade extrapola a elaboração documental e alcança a estabilidade e a continuidade do serviço elétrico (Billinton; Allan, 1996).

1.2 Sistema Elétrico de Potência: estrutura e função

O Sistema Elétrico de Potência pode ser definido como o conjunto integrado de instalações e equipamentos responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, operando de forma coordenada para atender à demanda com níveis adequados de tensão, frequência e confiabilidade. Essa integração exige que o sistema seja analisado como um todo, considerando interações dinâmicas entre seus subsistemas (Stevenson Jr., 1982).

A transmissão em alta tensão desempenha papel central nesse arranjo, pois viabiliza o transporte eficiente de grandes blocos de energia entre centros geradores e consumidores. Nesse contexto, as subestações assumem a função de organizar fluxos de potência, realizar transformações de tensão e permitir manobras operacionais seguras, conforme sistematizado por Grainger e Stevenson Jr. (1994).

1.3 Subestações de alta tensão: definição técnica e papel sistêmico

Subestações de alta tensão são instalações destinadas à interconexão de circuitos, transformação de níveis de tensão e seccionamento controlado do sistema elétrico, incorporando funções de proteção e controle. Sua concepção está diretamente associada à coordenação de dispositivos de proteção e à seletividade operacional, elementos essenciais para a integridade do sistema (Blackburn; Domin, 2014).

Do ponto de vista sistêmico, a subestação atua como unidade decisória da operação elétrica, condicionando a flexibilidade do sistema e sua capacidade de resposta a contingências. Assim, o

projeto dessas instalações deve considerar não apenas o estado normal de operação, mas também cenários de falha e recomposição, conforme discutido por Mason (1956) e Kindermann (1997).

1.4 Confiabilidade, continuidade e segurança do sistema elétrico

A confiabilidade do sistema elétrico refere-se à sua capacidade de fornecer energia de forma adequada e previsível, mesmo diante de falhas ou perturbações. Trata-se de um atributo técnico mensurável, diretamente influenciado pelas decisões de projeto adotadas nas subestações de alta tensão (Billinton; Allan, 1996).

A continuidade do serviço e a segurança operacional constituem desdobramentos diretos desse conceito. Arranjos inadequados, critérios de proteção mal definidos ou ausência de redundâncias comprometem a estabilidade do sistema e ampliam riscos à integridade de pessoas e equipamentos. A literatura de estabilidade de sistemas de potência reforça que confiabilidade e segurança não podem ser tratadas de forma dissociada do projeto estrutural das subestações (Kundur, 1994).

1.5 Responsabilidade técnica do engenheiro em projetos de alta tensão

O projeto de subestações de alta tensão envolve responsabilidade técnica ampliada, uma vez que suas decisões impactam diretamente a segurança operacional e a confiabilidade do sistema elétrico. Cabe ao engenheiro projetista interpretar normas técnicas, avaliar riscos e selecionar soluções compatíveis com o contexto de operação, evitando aplicações automáticas e descontextualizadas (ABNT, 2022; IEC, 2010).

Essa responsabilidade manifesta-se desde a definição do escopo até a validação final do projeto, integrando critérios elétricos, civis e de proteção. O projeto assume, portanto, caráter preventivo,

funcionando como instrumento de mitigação de falhas e de preservação da segurança coletiva.

1.6 Subestações como infraestrutura crítica de interesse público

A energia elétrica configura serviço essencial à organização social e ao desenvolvimento econômico. As subestações de alta tensão integram a infraestrutura crítica que sustenta esse serviço, sendo indispensáveis à operação de sistemas urbanos, industriais e de serviços públicos (CIGRÉ, 2018).

A caracterização dessas instalações como infraestrutura crítica impõe exigências adicionais ao projeto, especialmente quanto à robustez, previsibilidade e confiabilidade operacional. Nesse cenário, a atuação do engenheiro projetista articula técnica e interesse público, ampliando o alcance social das decisões de engenharia (IEEE, 2019).

Aplicação Técnica

Delimitação funcional da subestação no contexto do Sistema Elétrico de Potência

Contexto técnico

No âmbito dos sistemas elétricos de potência, a subestação desempenha papel central como elemento de interface entre os subsistemas de geração, transmissão e distribuição. A correta delimitação funcional dessa instalação é condição necessária para a definição de responsabilidades técnicas, critérios normativos e limites operativos do sistema.

Entradas e premissas

Considera-se uma subestação inserida em um sistema interligado de alta tensão, com funções associadas à transformação de níveis de tensão, ao seccionamento de circuitos e à implementação de sistemas de proteção e supervisão. Parte-se da premissa de que a clareza quanto à posição da subestação no sistema é indispensável para a coerência do projeto e da operação.

Decisão técnica

A subestação é definida como unidade funcional do sistema elétrico de potência responsável por intermediar fluxos de energia entre diferentes níveis do sistema, assegurando condições adequadas de manobra, proteção e continuidade do fornecimento. Essa definição orienta a organização do sistema, a seleção de equipamentos e a aplicação dos critérios normativos pertinentes.

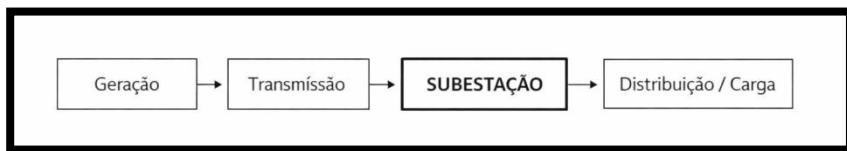
Entregáveis e evidências técnicas

- Definição formal dos limites funcionais da subestação no sistema elétrico
- Identificação das interfaces com os subsistemas adjacentes
- Diagrama funcional simplificado representando o posicionamento da subestação no Sistema Elétrico de Potência

Resultado técnico esperado

A delimitação funcional adequada da subestação contribui para a consistência técnica do projeto, reduz ambiguidades operativas e estabelece bases sólidas para as etapas subsequentes de arquitetura, especificação de equipamentos, proteção e supervisão do sistema elétrico.

Figura 1 – Posicionamento funcional da subestação no Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

1.7 Síntese técnica

Este capítulo estabeleceu o enquadramento sistêmico das subestações de alta tensão, destacando sua função no Sistema Elétrico de Potência, sua relevância para confiabilidade e segurança e a responsabilidade técnica associada ao projeto. Esses fundamentos constituem a base conceitual necessária para a análise das premissas normativas e dos critérios de engenharia que serão desenvolvidos no capítulo seguinte.

1.8 Checklist técnico

- ✓ Compreensão do Sistema Elétrico de Potência como estrutura integrada
- ✓ Reconhecimento da subestação como elemento sistêmico crítico
- ✓ Entendimento da relação entre projeto, confiabilidade e segurança
- ✓ Identificação da responsabilidade técnica do engenheiro projetista
- ✓ Inserção da subestação no contexto de infraestrutura de interesse público

1.9 Glossário Técnico

Sistema Elétrico de Potência (SEP)

Conjunto integrado de instalações, equipamentos e dispositivos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, operando de forma coordenada para atender à demanda com níveis adequados de tensão, frequência, confiabilidade e segurança.

Subestação de Alta Tensão

Instalação integrante do Sistema Elétrico de Potência destinada à transformação de níveis de tensão, interconexão de circuitos, manobra operacional, proteção e controle, operando em patamares de tensão que exigem elevado rigor técnico e normativo.

Confiabilidade do Sistema Elétrico

Capacidade do sistema elétrico de desempenhar sua função de suprimento de energia de forma adequada e previsível, considerando a ocorrência de falhas, contingências e perturbações dentro de critérios técnicos estabelecidos.

Continuidade do Serviço

Manutenção do fornecimento de energia elétrica ao longo do tempo, com minimização de interrupções, associada à capacidade do sistema de absorver falhas e recompor a operação em condições aceitáveis.

Segurança Operacional

Conjunto de condições técnicas e operacionais que asseguram a proteção de pessoas, a integridade de equipamentos e a

estabilidade do sistema elétrico durante a operação normal e em situações de contingência.

Responsabilidade Técnica em Engenharia

Dever legal e técnico atribuído ao engenheiro projetista de conceber, especificar e validar soluções compatíveis com normas, critérios de segurança e desempenho, assumindo os impactos das decisões de projeto sobre o sistema elétrico e a coletividade.

Infraestrutura Crítica de Energia

Conjunto de instalações e sistemas essenciais à prestação do serviço de energia elétrica, cuja interrupção ou falha compromete significativamente a segurança, o bem-estar social e o funcionamento de atividades econômicas e institucionais.

Transmissão de Energia Elétrica

Etapas do Sistema Elétrico de Potência responsável pelo transporte de grandes blocos de energia em níveis elevados de tensão, conectando centros geradores a centros consumidores ou a sistemas de distribuição.

Arranjo de Subestação

Configuração física e elétrica adotada para a disposição de equipamentos, circuitos e sistemas auxiliares em uma subestação, condicionando critérios de operação, manutenção, confiabilidade e expansibilidade.

Proteção do Sistema Elétrico

Conjunto de dispositivos, esquemas e critérios destinados a detectar condições anormais de operação e promover a atuação seletiva para isolar falhas, preservando a integridade do sistema e a segurança operacional.

Controle Operacional

Função associada à supervisão, comando e ajuste das condições de operação do sistema elétrico, permitindo manobras seguras, monitoramento contínuo e resposta adequada a eventos e contingências.

Manobra Elétrica

Ação deliberada de abertura, fechamento ou comutação de dispositivos do sistema elétrico com o objetivo de alterar condições de operação, realizar intervenções programadas ou isolar trechos em situação de falha.

Estabilidade do Sistema Elétrico

Capacidade do sistema elétrico de manter ou recuperar condições aceitáveis de operação após perturbações, preservando o equilíbrio entre geração e carga e evitando colapsos operacionais.

Observação metodológica

Este glossário tem função operacional e conceitual, não exaustiva. Os termos aqui definidos orientam a leitura do manual e serão retomados e aprofundados nos capítulos subsequentes, sempre com coerência terminológica e técnica.

CAPÍTULO II

Premissas de Engenharia, Normas Técnicas e Critérios de Projeto

Apresentação

A elaboração de projetos de subestações de alta tensão não se inicia pela definição de arranjos físicos ou pela escolha de equipamentos, mas pela fixação de premissas de engenharia e critérios técnicos coerentes com o contexto do sistema elétrico. A literatura clássica demonstra que decisões tomadas nas etapas iniciais condicionam de forma decisiva o desempenho, a segurança e a confiabilidade das instalações ao longo de seu ciclo de vida (Stevenson Jr., 1982; Grainger; Stevenson Jr., 1994).

Este capítulo tem como finalidade estabelecer as bases técnicas e normativas que orientam o projeto de subestações de alta tensão, destacando o papel das normas como referências mínimas e a necessidade de julgamento técnico por parte do engenheiro projetista. A abordagem adotada privilegia a compreensão crítica das normas e a articulação entre premissas, critérios e soluções, conforme defendido na literatura de sistemas elétricos de potência (Kundur, 1994).

2.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo consiste em apresentar as premissas de engenharia, as normas técnicas aplicáveis e os critérios de projeto que fundamentam decisões coerentes em subestações de alta tensão. Esses elementos são tratados como estruturas orientadoras do processo de projeto, permitindo que soluções técnicas sejam justificadas, verificáveis e compatíveis com os

requisitos de segurança e desempenho do sistema elétrico (Billinton; Allan, 1996).

2.2 Premissas de engenharia em projetos de alta tensão

Premissas de engenharia correspondem ao conjunto de hipóteses técnicas adotadas como ponto de partida para o desenvolvimento do projeto. Elas definem limites, objetivos e condições de contorno que orientam a escolha de soluções, evitando inconsistências conceituais ao longo das etapas subsequentes (Stevenson Jr., 1982).

Em projetos de subestações de alta tensão, a definição inadequada de premissas compromete a coerência entre segurança, confiabilidade e desempenho operacional. Por essa razão, a literatura enfatiza que premissas devem ser explicitadas, registradas e compatibilizadas com as características do sistema elétrico no qual a instalação será inserida (Grainger; Stevenson Jr., 1994).

2.3 Normas técnicas como base de projeto

As normas técnicas constituem referência fundamental para o projeto de subestações de alta tensão, estabelecendo requisitos mínimos de segurança, desempenho e conformidade. Entretanto, sua aplicação não substitui o processo decisório do engenheiro, devendo ser interpretada à luz do contexto operacional e das características específicas do sistema elétrico (IEC, 2010).

A utilização crítica das normas permite que o projeto atenda às exigências regulatórias sem comprometer soluções tecnicamente mais adequadas. Essa perspectiva está alinhada à literatura internacional, que trata as normas como instrumentos de orientação e não como prescrições absolutas (IEEE, 2019).

2.4 Normas nacionais aplicáveis a subestações

No contexto brasileiro, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas constituem referência central para o projeto de instalações elétricas. A NBR 14039 estabelece princípios aplicáveis às instalações de média tensão e fornece diretrizes conceituais relevantes também para projetos de subestações de alta tensão (ABNT, 2022).

A integração entre normas nacionais e exigências regulatórias reforça a necessidade de conformidade técnica desde as etapas iniciais do projeto. A observância desses referenciais contribui para a segurança das instalações e para a aceitação do projeto pelos órgãos competentes, sem dispensar a análise técnica crítica por parte do projetista (ABNT, 2004).

2.5 Normas internacionais e harmonização normativa

As normas internacionais, especialmente aquelas elaboradas pela IEC, constituem importante referência para o projeto de instalações elétricas acima de 1 kV. A IEC 61936-1 estabelece princípios gerais para instalações de potência, enquanto outras normas complementares tratam de aspectos específicos, como coordenação de isolamento (IEC, 2010).

A harmonização entre normas nacionais e internacionais amplia a robustez técnica do projeto e favorece a adoção de boas práticas consolidadas. Publicações técnicas do CIGRÉ reforçam a importância dessa convergência normativa para garantir segurança, interoperabilidade e desempenho sistêmico (CIGRÉ, 2018).

2.6 Critérios de projeto: segurança, confiabilidade e desempenho

Os critérios de projeto representam a tradução das premissas de engenharia em requisitos técnicos verificáveis. Entre esses

critérios, a segurança assume caráter prioritário, devendo orientar todas as decisões relacionadas à concepção da subestação (Kundur, 1994).

A confiabilidade do sistema elétrico, por sua vez, constitui atributo mensurável e diretamente influenciado pelas escolhas de projeto. A literatura demonstra que decisões estruturais adotadas em subestações impactam índices de continuidade e a capacidade de resposta a contingências, reforçando a necessidade de critérios técnicos bem definidos (Billinton; Allan, 1996).

2.7 Julgamento técnico e responsabilidade do projetista

O julgamento técnico do engenheiro projetista constitui elemento central do processo de projeto, especialmente em instalações de alta tensão. A aplicação automática de normas, sem análise contextual, pode conduzir a soluções inadequadas ou ineficientes (Stevenson Jr., 1982).

A responsabilidade técnica envolve a capacidade de justificar decisões, registrar critérios adotados e assumir os impactos das escolhas realizadas. Nesse sentido, o projeto configura-se como instrumento de controle técnico e de mitigação de riscos, articulando normas, premissas e desempenho esperado da instalação (ABNT, 2022).

2.8 Síntese técnica do capítulo

Este capítulo apresentou as premissas de engenharia, as normas técnicas e os critérios de projeto que fundamentam a elaboração de subestações de alta tensão. A articulação entre esses elementos estabelece a base conceitual necessária para a definição da arquitetura da subestação e dos arranjos elétricos, temas que serão aprofundados no capítulo seguinte.

2.9 Checklist técnico do Capítulo 2

- ✓ Premissas de engenharia claramente definidas
- ✓ Normas técnicas identificadas e contextualizadas
- ✓ Critérios de segurança e confiabilidade estabelecidos
- ✓ Decisões técnicas fundamentadas e registráveis
- ✓ Conformidade normativa associada ao julgamento técnico

2.10 Glossário Técnico

Premissas de Engenharia, Normas Técnicas e Critérios de Projeto

Premissas de Engenharia

Conjunto de hipóteses técnicas iniciais que delimitam condições de contorno, objetivos e restrições do projeto, orientando a definição de critérios e soluções em subestações de alta tensão.

Critérios de Projeto

Requisitos técnicos derivados das premissas de engenharia, utilizados para avaliar, selecionar e justificar soluções de projeto quanto à segurança, confiabilidade e desempenho operacional.

Norma Técnica

Documento técnico consensual que estabelece requisitos mínimos, diretrizes ou recomendações para projeto, execução e operação de instalações elétricas, servindo como referência obrigatória ou orientadora.

Conformidade Normativa

Atendimento aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis, assegurando que o projeto esteja alinhado a padrões reconhecidos de segurança e desempenho.

Harmonização Normativa

Processo de compatibilização entre normas nacionais e internacionais, com o objetivo de assegurar coerência técnica, interoperabilidade e adoção de boas práticas consolidadas.

Segurança de Projeto

Condição resultante de decisões técnicas que visam à proteção de pessoas, à integridade de equipamentos e à estabilidade do sistema elétrico durante operação normal e em contingências.

Confiabilidade do Sistema

Capacidade do sistema elétrico de desempenhar sua função de suprimento de energia de forma previsível e adequada, considerando falhas e perturbações, influenciada diretamente pelos critérios de projeto adotados.

Desempenho Operacional

Resultado técnico do projeto expresso pela eficiência, flexibilidade, estabilidade e capacidade de resposta da subestação às condições normais e anormais de operação.

Julgamento Técnico

Capacidade do engenheiro projetista de interpretar normas, avaliar contextos específicos e tomar decisões fundamentadas, indo além da aplicação automática de prescrições normativas.

Responsabilidade Técnica

Dever legal e técnico do engenheiro de responder pelas decisões de projeto, assumindo os impactos dessas escolhas sobre a segurança, o desempenho e a confiabilidade do sistema elétrico.

CAPÍTULO III

Arquitetura das Subestações e Arranjos Elétricos

Apresentação

A arquitetura de uma subestação e a definição de seus arranjos elétricos constituem decisões estruturantes do projeto, pois condicionam segurança, confiabilidade, flexibilidade operacional e possibilidades de expansão. A literatura clássica de sistemas elétricos de potência demonstra que escolhas arquitetônicas inadequadas comprometem a operação e ampliam riscos ao longo do ciclo de vida da instalação (Stevenson Jr., 1982; Grainger; Stevenson Jr., 1994). Este capítulo organiza os princípios técnicos que orientam tais escolhas, estabelecendo a progressão conceitual necessária ao manual.

3.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo é apresentar os fundamentos técnicos da arquitetura de subestações, explicitar o papel dos diagramas unifilares como instrumento central de projeto e introduzir os principais arranjos elétricos utilizados em subestações de alta tensão. Ao final, o leitor deverá relacionar decisões arquitetônicas a consequências operacionais, reconhecendo limites, compromissos e a necessidade de julgamento técnico (Kundur, 1994).

3.2 Arquitetura de subestações: conceito e função

Arquitetura de subestações corresponde à organização funcional e física dos elementos que compõem a instalação,

incluindo circuitos, barramentos, equipamentos de manobra, proteção e controle. Trata-se de uma decisão sistêmica, pois define como a subestação se integra ao Sistema Elétrico de Potência e como responderá a condições normais e contingenciais (Stevenson Jr., 1982).

Sob a perspectiva operacional, a arquitetura orienta fluxos de potência, estabelece fronteiras de manobra e condiciona a seletividade da proteção. Assim, não se limita à disposição espacial de equipamentos, mas expressa uma lógica de funcionamento alinhada aos objetivos de segurança e desempenho do sistema (Grainger; Stevenson Jr., 1994).

3.3 Diagramas unifilares como instrumento de projeto

O diagrama unifilar constitui a principal representação técnica da arquitetura da subestação, sintetizando circuitos, barramentos, equipamentos e interligações de forma funcional. Ele permite compreender o comportamento do sistema, planejar manobras e avaliar impactos de falhas, sendo instrumento indispensável à comunicação técnica do projeto (Stevenson Jr., 1982).

A leitura do diagrama unifilar deve ser técnica e sistêmica, não meramente gráfica. Cada elemento representado corresponde a uma função operacional e a uma decisão de projeto. A literatura ressalta que a clareza e a coerência do diagrama refletem diretamente a qualidade da concepção da subestação (Grainger; Stevenson Jr., 1994; Kundur, 1994).

3.4 Arranjos elétricos em subestações de alta tensão

Arranjos elétricos referem-se à forma como barramentos, circuitos e dispositivos de manobra são organizados no diagrama unifilar da subestação. Esses arranjos determinam a flexibilidade de operação, a facilidade de manutenção e a capacidade de isolamento

de falhas, influenciando diretamente a confiabilidade do sistema (Blackburn; Domin, 2014).

Do ponto de vista operacional, diferentes arranjos apresentam comportamentos distintos frente a contingências. A literatura clássica de proteção e operação destaca que a escolha do arranjo deve considerar seletividade, simplicidade e adequação ao contexto do sistema elétrico, evitando soluções padronizadas sem análise técnica (Mason, 1956; Kindermann, 1997).

3.5 Critérios técnicos para escolha do arranjo elétrico

A escolha do arranjo elétrico deve ser orientada por critérios técnicos previamente definidos, entre os quais se destacam segurança operacional, confiabilidade, continuidade do serviço e possibilidade de expansão futura. Esses critérios derivam das premissas de engenharia e das normas técnicas discutidas no capítulo anterior (Kundur, 1994).

A literatura de confiabilidade evidencia que arranjos mais complexos tendem a oferecer maior flexibilidade, porém demandam maior rigor de operação e manutenção. Assim, a definição do arranjo envolve compromissos técnicos que devem ser explicitados e justificados pelo projetista (Billinton; Allan, 1996).

3.6 Relação entre arranjo elétrico e operação da subestação

O arranjo elétrico condiciona diretamente as manobras operacionais, o isolamento de falhas e a recomposição do sistema após contingências. Arranjos mal definidos dificultam intervenções programadas e ampliam o impacto de falhas simples, enquanto arranjos coerentes favorecem respostas rápidas e seguras (Mason, 1956).

A operação segura da subestação depende da compatibilidade entre arranjo, esquemas de proteção e procedimentos operacionais.

A literatura reforça que essa integração deve ser considerada desde a fase de projeto, evitando correções tardias e onerosas (Blackburn; Domin, 2014; Kundur, 1994).

3.7 Limitações, compromissos e julgamento técnico

Não existe arranjo elétrico universalmente aplicável. Cada solução envolve compromissos entre custo, complexidade, confiabilidade e requisitos operacionais. A literatura de sistemas elétricos destaca que o julgamento técnico do engenheiro projetista é essencial para equilibrar esses fatores de forma coerente com o contexto da instalação (Stevenson Jr., 1982; Grainger; Stevenson Jr., 1994).

Esse julgamento deve ser fundamentado, documentado e alinhado às normas técnicas aplicáveis, reconhecendo que a norma estabelece limites mínimos, mas não substitui a análise técnica contextualizada (IEC, 2010).

Aplicação

Escolha de arranjo elétrico em subestação de alta tensão em função de requisitos de confiabilidade e manobra

Contexto técnico

A definição do arranjo elétrico de uma subestação constitui decisão estrutural que influencia diretamente a confiabilidade do sistema, a flexibilidade operativa e as condições de manutenção. Diferentes configurações de barramento apresentam compromissos distintos entre simplicidade construtiva, continuidade de serviço e facilidade de manobra.

Entradas e premissas

Considera-se uma subestação de alta tensão integrante de um sistema interligado, com necessidade de elevada disponibilidade operacional e possibilidade de manobras para manutenção sem interrupção significativa do fornecimento. São avaliados, de forma comparativa, os arranjos de barra simples, barra dupla e arranjo em anel, adotando-se critérios de confiabilidade e flexibilidade operativa.

Decisão técnica

A escolha do arranjo elétrico é orientada pela relação entre requisitos de confiabilidade e complexidade do sistema. O arranjo de barra simples apresenta maior simplicidade e menor custo, porém menor flexibilidade de manobra. O arranjo de barra dupla amplia a confiabilidade e a continuidade de serviço, ao permitir a transferência de circuitos entre barramentos. O arranjo em anel oferece elevada flexibilidade operativa e maior tolerância a falhas, sendo indicado para subestações com elevada exigência de disponibilidade.

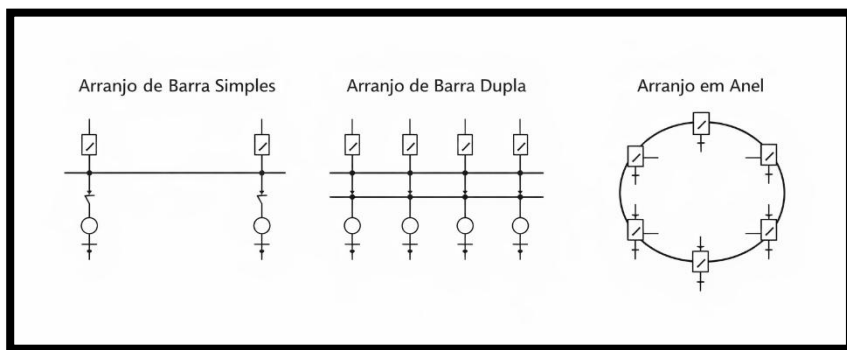
Entregáveis e evidências técnicas

- Definição do arranjo elétrico adotado conforme requisitos operativos
- Análise comparativa entre alternativas de barramento
- Diagramas unifilares representativos dos arranjos avaliados

Resultado técnico esperado

A seleção adequada do arranjo elétrico assegura equilíbrio entre confiabilidade, flexibilidade de manobra e viabilidade técnica, estabelecendo base consistente para a especificação de equipamentos, definição dos sistemas de proteção e organização da operação da subestação.

Figura 1 – Diagramas unifilares comparativos de arranjos elétricos em subestações



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.8 Síntese técnica

Este capítulo apresentou os fundamentos da arquitetura de subestações, o papel dos diagramas unifilares como síntese do projeto e os princípios que orientam a escolha dos arranjos elétricos. A compreensão integrada desses elementos prepara o leitor para a análise dos requisitos de segurança, aterramento e proteção, que serão abordados no capítulo seguinte.

3.9 Checklist técnico do Capítulo 3

- ✓ Arquitetura da subestação definida de forma sistêmica
- ✓ Diagrama unifilar coerente com a função operacional
- ✓ Arranjo elétrico escolhido com base em critérios técnicos
- ✓ Impactos operacionais avaliados
- ✓ Compromissos e limitações explicitados

3.10 Glossário Técnico

Arquitetura das Subestações e Arranjos Elétricos

Arquitetura de Subestações

Organização funcional e física dos elementos que compõem uma subestação, incluindo circuitos, barramentos, equipamentos de manobra, proteção e controle, definida de modo a assegurar operação segura, confiável e compatível com o Sistema Elétrico de Potência.

Arranjo Elétrico

Configuração adotada para a interligação de barramentos, circuitos e dispositivos de manobra em uma subestação, representada no diagrama unifilar e responsável por condicionar a operação, a manutenção e a capacidade de isolamento de falhas.

Diagrama Unifilar

Representação técnica simplificada que sintetiza, de forma funcional, os circuitos, barramentos, equipamentos e interligações de uma subestação, servindo como instrumento central de concepção, análise e comunicação do projeto elétrico.

Barramento

Elemento condutor destinado à interligação elétrica de circuitos e equipamentos em uma subestação, permitindo a distribuição e o controle do fluxo de potência conforme o arranjo elétrico adotado.

Flexibilidade Operacional

Capacidade da subestação de permitir manobras, intervenções e recomposições do sistema com impacto mínimo sobre o fornecimento de energia, diretamente influenciada pela arquitetura e pelo arranjo elétrico.

Recomposição do Sistema

Processo de restabelecimento das condições normais de operação do sistema elétrico após a ocorrência de falhas ou desligamentos, condicionado pela seletividade da proteção e pela coerência do arranjo elétrico.

Continuidade do Serviço

Manutenção do fornecimento de energia elétrica com minimização de interrupções, associada à capacidade da subestação de operar, isolar falhas e permitir recomposição eficiente do sistema.

Manobra Operacional

Ação técnica de abertura, fechamento ou comutação de dispositivos elétricos com o objetivo de alterar condições de operação, realizar intervenções programadas ou isolar partes do sistema em situação de contingência.

Isolamento de Falhas

Capacidade do sistema e do arranjo elétrico de restringir os efeitos de uma falha a uma porção limitada da instalação, preservando a integridade do restante da subestação e do sistema elétrico.

Trade-off de Projeto

Compromisso técnico estabelecido entre critérios concorrentes, como custo, complexidade, confiabilidade e flexibilidade operacional, inerente às decisões de arquitetura e arranjo elétrico em subestações.

Julgamento Técnico

Capacidade do engenheiro projetista de interpretar normas, avaliar o contexto específico do sistema elétrico e tomar decisões fundamentadas, reconhecendo limites normativos e impactos operacionais das escolhas realizadas.

CAPÍTULO IV

Segurança Operacional, Aterramento e Proteção em Subestações de Alta Tensão

Apresentação

A segurança operacional em subestações de alta tensão constitui condição estruturante do projeto e não um requisito complementar. A literatura técnica demonstra que falhas de concepção relacionadas à segurança e ao aterramento estão entre as principais causas de acidentes, danos a equipamentos e instabilidades operacionais, reforçando a necessidade de incorporar tais aspectos desde as etapas iniciais do projeto (Kundur, 1994; IEEE, 2019).

Este capítulo organiza os fundamentos técnicos que orientam decisões de segurança, com ênfase no papel do aterramento como sistema de proteção integrado à arquitetura e aos arranjos elétricos da subestação.

4.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo é estabelecer os princípios técnicos da segurança operacional em subestações de alta tensão, abordando os fundamentos do aterramento elétrico, as tensões de passo e de toque e a integração entre segurança, arquitetura e arranjos elétricos. Esses elementos são tratados como requisitos de projeto que condicionam a proteção de pessoas, a integridade dos equipamentos e a confiabilidade do sistema elétrico (Billinton; Allan, 1996).

4.2 Segurança operacional em subestações de alta tensão

A segurança operacional refere-se ao conjunto de condições técnicas que asseguram a proteção de pessoas e a estabilidade do sistema durante a operação normal e em situações de contingência. Em subestações de alta tensão, os riscos elétricos são elevados em razão dos níveis de tensão, das correntes de curto-circuito e da complexidade das manobras operacionais (Kundur, 1994).

Nesse contexto, a segurança deve ser compreendida como critério central de projeto, influenciando decisões relativas à arquitetura, aos arranjos elétricos e aos sistemas de proteção. A literatura técnica reforça que a segurança operacional depende da coerência entre concepção, normas aplicáveis e procedimentos operacionais, não podendo ser tratada de forma isolada (IEC, 2010).

4.3 Fundamentos do aterramento elétrico

O aterramento elétrico constitui sistema de proteção destinado a estabelecer um caminho de baixa impedância para correntes de falha, equalizar potenciais e reduzir riscos de choque elétrico. Em subestações de alta tensão, o aterramento assume papel estruturante, pois influencia diretamente a segurança de pessoas e a proteção dos equipamentos (IEEE, 2019).

A literatura técnica enfatiza que o aterramento não se limita à conexão ao solo, mas corresponde a um sistema integrado, composto por condutores, eletrodos e interligações que devem ser concebidos em consonância com a arquitetura da subestação. A inadequação desse sistema compromete a eficácia das proteções e amplia riscos operacionais (Kundur, 1994).

4.4 Tensões de passo e de toque

As tensões de passo e de toque representam diferenças de potencial que podem ocorrer na superfície do solo ou entre partes

condutoras acessíveis durante a circulação de correntes de falha. Essas tensões constituem fator crítico de risco à segurança de pessoas em subestações de alta tensão (IEEE, 2019).

O controle dessas tensões está diretamente associado ao projeto da malha de aterramento e à distribuição dos potenciais no interior da subestação. A literatura técnica destaca que a avaliação dessas grandezas deve orientar decisões de projeto, de modo a manter os níveis de tensão dentro de limites aceitáveis para a segurança humana (IEC, 2010).

4.5 Normas técnicas aplicáveis à segurança e ao aterramento

As normas técnicas estabelecem requisitos mínimos para a segurança e o aterramento de instalações elétricas, fornecendo parâmetros para o projeto e a verificação das condições de proteção. No contexto brasileiro, normas da ABNT constituem referência central, enquanto normas internacionais da IEC e diretrizes do IEEE complementam o embasamento técnico (ABNT, 2022; IEC, 2010).

A aplicação dessas normas exige interpretação técnica e compatibilização com o contexto específico da subestação. A literatura ressalta que o atendimento normativo não elimina a necessidade de julgamento técnico, especialmente em instalações de alta complexidade e criticidade (IEEE, 2019).

4.6 Integração entre aterramento, arquitetura e arranjos elétricos

O sistema de aterramento deve ser concebido de forma integrada à arquitetura da subestação e aos arranjos elétricos adotados. A disposição de barramentos, equipamentos e estruturas metálicas influencia a distribuição de potenciais e a eficácia do aterramento (Grainger; Stevenson Jr., 1994).

Arranjos elétricos distintos impõem exigências específicas ao sistema de aterramento, especialmente quanto à continuidade elétrica e à equipotencialização das massas metálicas. A literatura técnica reforça que a dissociação entre arquitetura, arranjos e aterramento compromete a segurança operacional e dificulta a manutenção da instalação (Kundur, 1994).

4.7 Julgamento técnico e responsabilidade na segurança do projeto

A segurança em subestações de alta tensão resulta de decisões técnicas fundamentadas, que extrapolam a aplicação automática de normas. Cabe ao engenheiro projetista avaliar riscos, interpretar requisitos normativos e justificar soluções compatíveis com o contexto operacional da instalação (Stevenson Jr., 1982).

A responsabilidade técnica associada à segurança envolve o registro das premissas adotadas, a justificativa dos critérios de projeto e a verificação das condições de proteção. A literatura de engenharia enfatiza que a segurança constitui responsabilidade indelegável do projetista, com impactos diretos sobre a coletividade e a confiabilidade do sistema elétrico (Billinton; Allan, 1996).

4.8 Síntese técnica

Este capítulo apresentou os fundamentos da segurança operacional em subestações de alta tensão, destacando o papel do aterramento, o controle das tensões de passo e de toque e a integração entre segurança, arquitetura e arranjos elétricos. Esses elementos constituem a base técnica necessária para a análise dos equipamentos e sistemas de proteção, que serão tratados no capítulo seguinte.

4.9 Checklist técnico

- ✓ Segurança considerada como requisito estruturante do projeto
- ✓ Fundamentos do aterramento compreendidos como sistema integrado
- ✓ Tensões de passo e de toque reconhecidas como fatores críticos
- ✓ Normas técnicas identificadas e contextualizadas
- ✓ Integração entre arquitetura, arranjos e segurança assegurada
- ✓ Julgamento técnico do projetista explicitado

4.10 Glossário Técnico

Segurança Operacional, Aterramento e Proteção em Subestações de Alta Tensão

Segurança Operacional

Conjunto de condições técnicas e organizacionais que asseguram a proteção de pessoas, a integridade de equipamentos e a estabilidade do sistema elétrico durante a operação normal e em situações de contingência em subestações de alta tensão.

Aterramento Elétrico

Sistema de proteção constituído por condutores, eletrodos e interligações destinado a estabelecer caminhos de baixa impedância para correntes de falha, promover a equipotencialização e reduzir riscos de choque elétrico.

Corrente de Falha

Corrente elétrica resultante de uma condição anormal no sistema, como curto-circuito ou falha à terra, cuja magnitude e duração influenciam diretamente o dimensionamento e a eficácia do sistema de aterramento.

Equipotencialização

Condição obtida pela interligação elétrica de massas metálicas e partes condutoras acessíveis, de modo a reduzir diferenças de potencial perigosas durante a circulação de correntes de falha.

Tensão de Passo

Diferença de potencial elétrico existente entre dois pontos da superfície do solo separados por uma distância equivalente ao passo humano, podendo representar risco à segurança de pessoas durante falhas à terra.

Tensão de Toque

Diferença de potencial elétrico entre uma parte condutora acessível e o ponto do solo onde a pessoa se encontra, durante a ocorrência de correntes de falha no sistema elétrico.

Proteção contra Choque Elétrico

Conjunto de medidas técnicas destinadas a reduzir o risco de choque elétrico, incluindo aterramento adequado, equipotencialização, isolamento e critérios construtivos compatíveis com normas técnicas.

Malha de Aterramento

Arranjo de condutores enterrados, interligados entre si, projetado para distribuir correntes de falha no solo e controlar gradientes de potencial na área da subestação.

Arquitetura da Subestação

Organização física e funcional dos elementos que compõem a subestação, cuja configuração influencia diretamente a segurança operacional e a eficácia do sistema de aterramento.

Arranjo Elétrico

Configuração dos barramentos, circuitos e dispositivos de manobra que condiciona a circulação de correntes de falha, a seletividade da proteção e a distribuição de potenciais na subestação.

Julgamento Técnico

Capacidade do engenheiro projetista de interpretar normas, avaliar riscos e tomar decisões fundamentadas, considerando o contexto específico da subestação e os impactos sobre a segurança e o desempenho do sistema.

Responsabilidade Técnica

Dever legal e técnico atribuído ao engenheiro de responder pelas decisões de projeto, assumindo os impactos dessas escolhas sobre a segurança de pessoas, a integridade de equipamentos e a confiabilidade do sistema elétrico.

CAPÍTULO V

Especificação Técnica e Validação de Equipamentos de Alta Tensão

Apresentação

A especificação técnica e a validação de equipamentos de alta tensão constituem etapas centrais do processo de engenharia de subestações, pois condicionam diretamente o desempenho, a confiabilidade e a segurança da instalação ao longo de sua vida útil. Diferentemente da aquisição ou do simples atendimento normativo, a especificação representa uma decisão técnica fundamentada, que articula requisitos do sistema elétrico, premissas de projeto e critérios de desempenho esperado (IEC, 2010).

Este capítulo trata a especificação e a validação como atos formais da engenharia, posicionados entre a definição da arquitetura elétrica da subestação e a integração dos sistemas secundários. O enfoque adotado privilegia critérios técnicos, ensaios normativos, aceitação e rastreabilidade, sem recorrer a dimensionamentos extensos ou descrições construtivas detalhadas.

5.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo é estabelecer os fundamentos técnicos que orientam a especificação, os ensaios e a validação de equipamentos de alta tensão empregados em subestações. Busca-se fornecer critérios objetivos para a seleção técnica, a verificação de conformidade e a aceitação desses equipamentos, assegurando compatibilidade com o projeto elétrico e confiabilidade operacional (IEC, 2010).

5.2 Conceito de especificação técnica em equipamentos de alta tensão

A especificação técnica pode ser definida como o conjunto de requisitos funcionais, normativos e de desempenho que um equipamento deve atender para integrar adequadamente uma subestação. Trata-se de uma atividade de engenharia que extrapola a simples indicação de valores nominais, incorporando condições de operação, ambiente, manutenção e vida útil esperada (IEC, 2010).

Nesse contexto, especificar não se confunde com dimensionar ou adquirir. A especificação traduz as necessidades do sistema elétrico em critérios técnicos verificáveis, permitindo avaliar a adequação do equipamento antes de sua integração ao sistema (Stevenson Jr., 1982).

5.3 Classes de equipamentos de alta tensão em subestações

As subestações de alta tensão são compostas por diferentes classes de equipamentos, cada uma desempenhando funções específicas no controle, na proteção e na transformação da energia elétrica. Entre os principais equipamentos destacam-se os disjuntores, responsáveis pela interrupção de correntes em condições normais e de falha; os seccionadores e chaves, utilizados para manobras sem carga; os transformadores de potência, encarregados da adequação dos níveis de tensão; os transformadores de instrumentos, que fornecem sinais para medição e proteção; e os para-raios, destinados à proteção contra sobretensões (IEC, 2010).

A especificação dessas classes deve considerar sua função sistêmica e sua interação com os demais elementos da subestação, evitando decisões isoladas que comprometam o desempenho global (IEC, 2010).

5.4 Critérios técnicos de especificação

Os critérios técnicos de especificação envolvem a definição de níveis de tensão e corrente compatíveis com o sistema, capacidade de interrupção, suportabilidade dielétrica e desempenho em regime permanente e transitório. Adicionalmente, devem ser consideradas as condições ambientais, como temperatura, altitude e grau de poluição, que influenciam diretamente o comportamento dos equipamentos (IEC, 2010).

A literatura técnica destaca que a incorporação de critérios de confiabilidade e vida útil esperada na especificação contribui para a redução de falhas e custos ao longo do ciclo de vida da instalação, reforçando o caráter estratégico dessa etapa (Billinton; Allan, 1996).

5.5 Normas técnicas aplicáveis à especificação de equipamentos

A especificação de equipamentos de alta tensão é orientada por normas técnicas internacionais e nacionais, que estabelecem requisitos mínimos de desempenho, ensaios e segurança. As normas da série IEC 62271 tratam de equipamentos de manobra e controle, enquanto as séries IEC 60076, IEC 61869 e IEC 60099 abordam transformadores e para-raios. No contexto nacional, normas da ABNT complementam essas referências (IEC, 2010).

O uso das normas deve ser acompanhado de interpretação técnica, uma vez que elas definem limites e condições gerais, mas não substituem a análise contextual do projeto (IEC, 2010).

5.6 Ensaios aplicáveis aos equipamentos de alta tensão

Os ensaios constituem instrumentos formais de verificação da conformidade dos equipamentos com os requisitos especificados. Os ensaios de tipo têm por objetivo validar o projeto do equipamento, demonstrando seu desempenho sob condições

padronizadas. Os ensaios de rotina são realizados durante a fabricação, assegurando a qualidade de cada unidade produzida (IEC, 2010).

Os ensaios de comissionamento, por sua vez, ocorrem após a instalação em campo e visam verificar a integridade do equipamento e sua correta integração ao sistema elétrico. Esses ensaios representam etapa essencial para a liberação operacional da subestação (IEEE, 2013).

5.7 Validação técnica e critérios de aceitação

A validação técnica corresponde ao processo de verificação integrada dos requisitos documentais e dos resultados de ensaios, assegurando que o equipamento atende às especificações estabelecidas. Essa etapa envolve a análise de relatórios, certificados e resultados de testes, culminando na aceitação técnica do equipamento (IEC, 2010).

Os critérios de aceitação devem ser definidos previamente e aplicados de forma consistente, evitando decisões subjetivas ou desvinculadas do projeto. A literatura técnica enfatiza que a validação formal reduz riscos operacionais e reforça a rastreabilidade das decisões de engenharia (IEEE, 2013).

5.8 Documentação técnica e rastreabilidade

A documentação técnica constitui elemento essencial da especificação e validação de equipamentos de alta tensão. Datasheets, relatórios de ensaio, certificados de conformidade e registros de decisão técnica asseguram rastreabilidade e subsidiam atividades de operação, manutenção e auditoria (IEC, 2010).

A manutenção organizada dessa documentação reforça a responsabilidade técnica do projetista e contribui para a

previsibilidade do desempenho do sistema ao longo do tempo (IEC, 2010).

5.9 Julgamento técnico e responsabilidade do projetista

A especificação e a validação de equipamentos exigem julgamento técnico fundamentado, especialmente em situações que extrapolam as condições padrão previstas nas normas. Cabe ao engenheiro projetista avaliar riscos, justificar escolhas e registrar as premissas adotadas, assumindo responsabilidade pelas decisões tomadas (Stevenson Jr., 1982).

Esse julgamento técnico representa elemento central da prática profissional em engenharia elétrica, assegurando que as soluções adotadas sejam compatíveis com o contexto específico da subestação e com os objetivos do sistema elétrico (IEC, 2010).

Aplicação Técnica

Especificação técnica e validação de equipamentos de alta tensão em subestações

Contexto técnico

A especificação técnica de equipamentos de alta tensão constitui etapa determinante para a confiabilidade, a segurança e a durabilidade das subestações. A seleção inadequada de disjuntores, transformadores de corrente, transformadores de potencial ou para-raios pode comprometer o desempenho do sistema, mesmo quando a arquitetura elétrica e os sistemas de proteção estão corretamente definidos.

Entradas e premissas

Considera-se uma subestação de alta tensão integrante de um sistema elétrico de potência, submetida a requisitos normativos,

operativos e ambientais específicos. Parte-se da premissa de que a especificação dos equipamentos deve estar alinhada aos níveis de isolamento, às condições de curto-circuito, às exigências de operação e aos critérios de confiabilidade estabelecidos para o sistema.

Decisão técnica

A especificação dos equipamentos de alta tensão é conduzida a partir da definição clara dos requisitos funcionais e normativos, seguida da verificação de conformidade por meio de ensaios de tipo, ensaios de rotina e análise documental. A validação técnica assegura que os equipamentos selecionados atendam às condições de operação previstas e mantenham desempenho adequado ao longo do ciclo de vida da subestação.

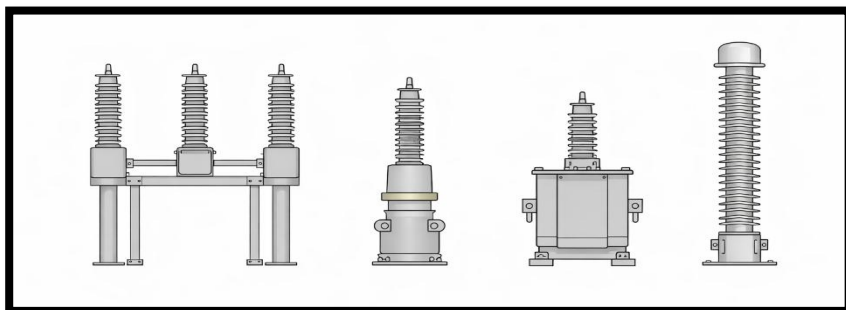
Entregáveis e evidências técnicas

- Fichas técnicas e memoriais de especificação dos equipamentos
- Relatórios de ensaios de tipo e de rotina conforme normas aplicáveis
- Documentação de aceitação técnica e registros de conformidade

Resultado técnico esperado

A correta especificação e validação dos equipamentos de alta tensão garantem a compatibilidade com o sistema elétrico, reduzem riscos operacionais e estabelecem base sólida para a operação segura, a manutenção eficiente e a sustentação técnica da subestação ao longo do tempo.

Figura 1 – Equipamentos típicos de alta tensão utilizados em subestações



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.10 Síntese técnica

Este capítulo apresentou os fundamentos da especificação técnica e da validação de equipamentos de alta tensão, abordando critérios de seleção, normas aplicáveis, ensaios e aceitação técnica. Ao consolidar esses elementos, estabeleceu-se a base necessária para a integração dos equipamentos aos sistemas de proteção, comando e supervisão, tema do capítulo seguinte.

5.11 Checklist técnico do Capítulo 5

- ✓ Especificação tratada como decisão de engenharia
- ✓ Classes de equipamentos identificadas
- ✓ Critérios técnicos claramente definidos
- ✓ Normas técnicas corretamente aplicadas
- ✓ Ensaios diferenciados por finalidade
- ✓ Validação e aceitação formalizadas
- ✓ Documentações e rastreabilidade assegurados
- ✓ Julgamento técnico explicitado

5.12 Glossário técnico

Especificação Técnica e Validação de Equipamentos de Alta Tensão

Especificação Técnica

Conjunto estruturado de requisitos funcionais, normativos e de desempenho que um equipamento deve atender para integrar adequadamente uma subestação, traduzindo as necessidades do sistema elétrico em critérios técnicos verificáveis.

Equipamentos de Alta Tensão

Conjunto de dispositivos destinados à manobra, transformação, medição, proteção e controle da energia elétrica em níveis elevados de tensão, projetados para operar de forma segura e confiável em subestações.

Critérios Técnicos de Especificação

Parâmetros de engenharia utilizados para definir as características mínimas aceitáveis de um equipamento, incluindo níveis de tensão e corrente, capacidade de interrupção, suportabilidade dielétrica, condições ambientais e vida útil esperada.

Desempenho Esperado

Comportamento funcional previsto para um equipamento ao longo de sua vida útil, considerando condições normais de operação e situações de contingência, conforme requisitos estabelecidos na especificação técnica.

Confiabilidade do Equipamento

Capacidade do equipamento de desempenhar suas funções de forma previsível e contínua ao longo do tempo, com baixa probabilidade de falha, conforme os critérios definidos em projeto.

Ensaio de Tipo

Ensaio realizado para validar o projeto de um equipamento, demonstrando sua conformidade com requisitos normativos e seu desempenho sob condições padronizadas de teste.

Ensaio de Rotina

Ensaio aplicado a cada unidade fabricada, com o objetivo de verificar a qualidade do processo produtivo e assegurar que o equipamento atende às especificações técnicas estabelecidas.

Ensaio de Comissionamento

Ensaio executado após a instalação do equipamento em campo, destinados a verificar sua integridade, funcionalidade e correta integração ao sistema elétrico da subestação.

Validação Técnica

Processo formal de verificação da conformidade de um equipamento, baseado na análise integrada da documentação técnica, dos resultados de ensaios e do atendimento aos critérios de especificação.

Crítérios de Aceitação

Conjunto de condições técnicas previamente definidas que devem ser atendidas para que um equipamento seja considerado apto a integrar o sistema elétrico e ser liberado para operação.

Documentação Técnica

Conjunto de registros formais que descrevem as características, os ensaios, a conformidade normativa e as decisões técnicas associadas a um equipamento, incluindo datasheets, relatórios e certificados.

Rastreabilidade Técnica

Capacidade de relacionar decisões de projeto, requisitos de especificação, resultados de ensaios e documentação associada a um equipamento ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Vida Útil

Período estimado durante o qual um equipamento mantém desempenho compatível com os requisitos de projeto, desde que operado e mantido conforme as condições especificadas.

Aceitação Técnica

Ato formal de aprovação de um equipamento, baseado na validação técnica, que autoriza sua integração definitiva ao sistema elétrico da subestação.

Julgamento Técnico

Capacidade do engenheiro projetista de interpretar normas, avaliar riscos e tomar decisões fundamentadas quando as condições do projeto extrapolam os cenários padronizados previstos nos documentos normativos.

Responsabilidade Técnica

Dever profissional e legal do engenheiro de responder pelas decisões de especificação e validação de equipamentos, assumindo os impactos dessas escolhas sobre a segurança, a confiabilidade e o desempenho do sistema elétrico.

CAPÍTULO VI

Sistema de Proteção, Comando e Supervisão de Subestações (SPCS)

Apresentação

O Sistema de Proteção, Comando e Supervisão de Subestações (SPCS) constitui a infraestrutura funcional responsável por detectar condições anormais, executar decisões de proteção, viabilizar comandos operacionais e registrar o comportamento do sistema elétrico. Diferentemente dos equipamentos primários, o SPCS opera como um sistema integrado de informações e ações, conectando a arquitetura elétrica da subestação às atividades de operação, manutenção e análise pós-evento (IEC, 2010).

Neste capítulo, o SPCS é tratado como elemento estruturante do projeto, articulando proteção, comando e supervisão de forma coordenada, sem retomar fundamentos de segurança, aterramento ou arranjos elétricos já estabelecidos nos capítulos anteriores.

6.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo é apresentar a arquitetura funcional do SPCS, descrevendo seus blocos constitutivos, lógicas operacionais, mecanismos de supervisão e requisitos de confiabilidade. O enfoque recai sobre a concepção e a organização do sistema em nível de projeto, permitindo ao leitor compreender como o SPCS sustenta a operação segura e verificável da subestação (IEC, 2010).

6.2 Conceito de SPCS e visão de arquitetura funcional

O SPCS pode ser definido como o conjunto integrado de funções responsáveis pela proteção do sistema elétrico, pelo comando de equipamentos e pela supervisão do estado operacional da subestação. Essa integração permite que eventos elétricos sejam identificados, processados e registrados de forma coordenada (IEC, 2010).

Do ponto de vista arquitetônico, o SPCS é estruturado em níveis funcionais, usualmente organizados em nível de processo, nível de bay ou vão e nível de estação. Essa organização estabelece interfaces claras entre equipamentos de campo, dispositivos eletrônicos inteligentes e sistemas de supervisão, favorecendo modularidade e confiabilidade (IEC, 2010).

6.3 Proteção: filosofia funcional e objetivos

A função de proteção no SPCS tem como objetivo identificar condições anormais e isolar, de forma seletiva e rápida, os elementos afetados do sistema elétrico. A literatura técnica define como objetivos fundamentais da proteção a seletividade, a rapidez, a sensibilidade e a confiabilidade, princípios que orientam a concepção funcional do sistema (Blackburn; Domin, 2014).

No contexto do SPCS, a proteção é tratada como função lógica e coordenada, vinculada ao arranjo elétrico previamente definido. Essa coordenação assegura que a atuação das proteções seja compatível com a arquitetura da subestação, sem necessidade de reconfigurações operacionais extensas (Kundur, 1994).

6.4 Comando: lógica operacional, permissivos e intertravamentos

O comando no SPCS refere-se à execução controlada de manobras sobre equipamentos da subestação, podendo ocorrer em

modo local ou remoto. Para assegurar a segurança operativa, os comandos são condicionados por permissivos e intertravamentos, que impedem ações incompatíveis com o estado do sistema (IEC, 2010).

Essas lógicas operacionais traduzem procedimentos técnicos em sequências formais de decisão, integrando aspectos elétricos, operacionais e de segurança. A literatura normativa destaca que a definição clara dessas lógicas constitui requisito essencial de projeto, reduzindo riscos de erro humano e falhas operacionais (IEC, 2010).

6.5 Supervisão: medições, alarmes, eventos e registros

A supervisão compreende o acompanhamento contínuo do estado operacional da subestação, por meio de medições, indicações de estado e geração de alarmes. Essa função permite ao operador manter visão sistêmica do funcionamento da instalação e identificar condições anormais de forma antecipada (IEC, 60870-5).

Os registros de eventos e de perturbações, organizados em sequência temporal, possibilitam a análise detalhada de ocorrências e a validação do desempenho do sistema de proteção. A literatura técnica reconhece esses registros como instrumentos centrais para diagnóstico, auditoria e melhoria contínua do sistema (IEEE, 2013).

6.6 Comunicação e integração do SPCS

A comunicação constitui elemento central do SPCS, viabilizando a troca de informações entre dispositivos eletrônicos inteligentes, sistemas de supervisão e centros de operação. Essa integração ocorre por meio de arquiteturas de rede e protocolos padronizados, concebidos para assegurar interoperabilidade e desempenho funcional (IEC, 2010).

O sincronismo de tempo desempenha papel fundamental nesse contexto, pois garante a correlação precisa entre eventos

registrados em diferentes dispositivos. A literatura técnica destaca que a precisão temporal é requisito indispensável para análises de sequência de eventos e coordenação funcional do sistema (IEEE, 2008).

6.7 Confiabilidade do SPCS e requisitos de engenharia

A confiabilidade do SPCS está associada à sua capacidade de manter funções essenciais mesmo diante de falhas internas ou externas. Estratégias como redundância, segregação funcional e independência de alimentação são amplamente reconhecidas como práticas de engenharia para elevação da disponibilidade do sistema (Billinton; Allan, 1996).

Além disso, a testabilidade do SPCS constitui requisito de projeto, permitindo a verificação funcional durante comissionamento e manutenção. A literatura técnica ressalta que sistemas bem documentados e testáveis apresentam maior previsibilidade operacional e menor risco de falhas não detectadas (IEC, 2010).

6.8 Entregáveis de projeto do SPCS

O projeto do SPCS deve resultar em um conjunto de entregáveis técnicos que documentem sua concepção e funcionamento. Entre esses documentos destacam-se a lista de sinais, as matrizes de intertravamentos, os diagramas funcionais e a arquitetura de comunicação (IEC, 2010).

Esses entregáveis asseguram rastreabilidade das decisões de projeto e subsidiam atividades de implantação, operação e manutenção. A literatura normativa enfatiza que a clareza e a consistência da documentação são determinantes para o desempenho do SPCS ao longo de sua vida útil (IEC, 2010).

Aplicação Técnica

Arquitetura funcional mínima de um Sistema de Proteção, Comando e Supervisão (SPCS)

Contexto técnico

O Sistema de Proteção, Comando e Supervisão constitui o núcleo funcional responsável pela detecção de falhas, execução de comandos, supervisão operacional e registro de eventos em subestações de alta tensão. A compreensão de sua arquitetura funcional é essencial para assegurar confiabilidade, seletividade das proteções e previsibilidade operativa.

Entradas e premissas

Considera-se uma subestação de alta tensão equipada com dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), rede de comunicação dedicada e sistema supervisorio centralizado. Parte-se da premissa de que o SPCS deve apresentar arquitetura coerente, com segregação funcional entre níveis de campo, controle e supervisão, garantindo redundância e disponibilidade compatíveis com os requisitos do sistema.

Decisão técnica

A arquitetura funcional do SPCS é organizada em camadas, contemplando o nível de campo, responsável pela aquisição de sinais e atuação de comandos; o nível de proteção e controle, baseado em IEDs; e o nível de supervisão, responsável pela interface homem-máquina, registro de eventos e integração com centros de operação. Essa organização favorece a clareza funcional, a manutenção do sistema e a expansão futura.

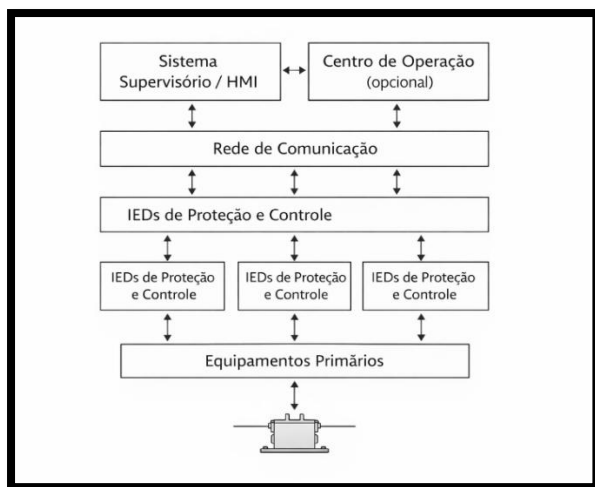
Entregáveis e evidências técnicas

- Diagrama funcional da arquitetura do SPCS
- Definição dos níveis funcionais e suas interações
- Identificação dos principais fluxos de informação e comando
- Lista de sinais essenciais para supervisão e registro de eventos

Resultado técnico esperado

A definição clara da arquitetura funcional do SPCS contribui para a confiabilidade do sistema de proteção, facilita a operação e a manutenção da subestação e assegura rastreabilidade das ações e eventos, sustentando a operação segura e contínua do sistema elétrico.

Figura 1 – Arquitetura funcional simplificada de um Sistema de Proteção, Comando e Supervisão



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

6.9 Síntese técnica do capítulo

Este capítulo apresentou o SPCS como sistema integrado responsável pela proteção, comando e supervisão da subestação. Ao tratar sua arquitetura funcional, lógicas operacionais, mecanismos de supervisão e requisitos de confiabilidade, consolidou-se a compreensão do SPCS como elo entre a arquitetura elétrica e a operação segura e verificável da instalação.

6.10 Checklist técnico

- ✓ SPCS definido como sistema integrado de funções
- ✓ Arquitetura funcional organizada por níveis
- ✓ Objetivos da proteção claramente estabelecidos
- ✓ Lógicas de comando e intertravamentos definidas
- ✓ Supervisão e registros incorporados ao projeto
- ✓ Comunicação e sincronismo considerados
- ✓ Requisitos de confiabilidade explicitados
- ✓ Entregáveis de engenharia identificados

6.11 Glossário Técnico

Sistema de Proteção, Comando e Supervisão de Subestações (SPCS)

Sistema de Proteção, Comando e Supervisão (SPCS)

Conjunto integrado de funções e dispositivos responsáveis por detectar condições anormais, executar ações de proteção, viabilizar comandos operacionais e supervisionar o estado da subestação, assegurando operação segura, controlada e rastreável.

Proteção

Função do SPCS destinada a identificar falhas ou condições anormais no sistema elétrico e promover o isolamento seletivo dos elementos afetados, preservando a estabilidade e a integridade do sistema.

Comando

Função do SPCS relacionada à execução controlada de manobras sobre equipamentos da subestação, realizada em modo local ou remoto, conforme lógicas operacionais previamente definidas.

Supervisão

Função do SPCS responsável pelo monitoramento contínuo do estado operacional da subestação, incluindo medições, indicações de estado, alarmes e registros de eventos.

Arquitetura Funcional do SPCS

Organização lógica do SPCS em níveis e blocos funcionais, estabelecendo interfaces entre equipamentos de campo, dispositivos eletrônicos e sistemas de supervisão, com vistas à modularidade e à confiabilidade.

Nível de Processo

Camada funcional do SPCS associada à interface direta com os equipamentos de pátio, responsável pela aquisição de sinais elétricos e pelo envio de comandos aos dispositivos primários.

Nível de Bay (ou Nível de Vão)

Camada intermediária do SPCS onde se concentram as funções de proteção e comando associadas a um conjunto específico de equipamentos ou circuitos da subestação.

Nível de Estação

Camada superior do SPCS responsável pela supervisão global da subestação, integração de informações e interface com sistemas de operação e controle externos.

IED (Dispositivo Eletrônico Inteligente)

Equipamento digital multifuncional utilizado no SPCS para executar funções de proteção, comando, supervisão e comunicação, integrando diversas lógicas em uma única plataforma.

Intertravamento

Mecanismo lógico que impede a execução de comandos incompatíveis com o estado operacional da subestação, assegurando segurança operativa e coerência das manobras.

Permissivo

Condição lógica que deve ser satisfeita para autorizar a execução de um comando no SPCS, geralmente associada ao estado de equipamentos ou à ausência de condições de bloqueio.

Bloqueio

Restrição lógica aplicada no SPCS para impedir determinadas ações, normalmente associada a condições de falha, manutenção ou segurança operacional.

Sequência de Eventos (SOE)

Registro cronológico dos eventos ocorridos no SPCS, com marcação temporal precisa, utilizado para análise de ocorrências, auditoria operacional e verificação do desempenho do sistema.

Oscilografia

Registro digital de grandezas elétricas ao longo do tempo, obtido durante perturbações ou falhas, utilizado para diagnóstico técnico e validação das funções de proteção.

Comunicação Funcional

Troca estruturada de informações entre dispositivos do SPCS, necessária para a coordenação das funções de proteção, comando e supervisão.

Sincronismo de Tempo

Processo de alinhamento temporal entre os dispositivos do SPCS, garantindo precisão na correlação de eventos, registros e atuações distribuídas no sistema.

Confiabilidade do SPCS

Capacidade do sistema de manter suas funções essenciais de proteção, comando e supervisão de forma previsível, mesmo na presença de falhas internas ou externas.

Redundância

Estratégia de engenharia que consiste na duplicação de funções, dispositivos ou caminhos de comunicação, com o objetivo de aumentar a disponibilidade e a confiabilidade do SPCS.

Segregação Funcional

Separação lógica ou física entre funções, sistemas ou circuitos do SPCS, destinada a reduzir a propagação de falhas e aumentar a segurança operacional.

Entregáveis de Engenharia do SPCS

Conjunto de documentos técnicos que descrevem a concepção, a lógica e a operação do SPCS, incluindo listas de sinais, diagramas funcionais, matrizes de intertravamento e arquitetura de comunicação.

CAPÍTULO VII

Padronização, Formação Profissional e Sustentação Técnica dos Sistemas Elétricos

Apresentação

O desempenho consistente dos sistemas elétricos não decorre apenas da correção do projeto inicial ou da qualidade dos equipamentos empregados, mas da capacidade de sustentar decisões técnicas ao longo do tempo. Em subestações e sistemas de potência, essa sustentação resulta da articulação entre padronização técnica, formação profissional e responsabilidade continuada na operação e na manutenção. Este capítulo encerra o manual integrando esses eixos, consolidando uma perspectiva técnica que transcende a implantação e se projeta sobre todo o ciclo de vida do sistema (IEC, 2010).

7.1 Finalidade

A finalidade deste capítulo é integrar os fundamentos desenvolvidos ao longo do manual e estabelecer diretrizes técnicas para a continuidade, a confiabilidade e a maturidade dos sistemas elétricos. O enfoque é conclusivo–propositivo, sem introdução de novos sistemas ou metodologias, orientando a prática profissional para a sustentação técnica baseada em padrões, capacitação e julgamento técnico responsável (Billinton; Allan, 1996).

7.2 Padronização como instrumento de confiabilidade técnica

A padronização técnica constitui um instrumento estratégico para a confiabilidade dos sistemas elétricos, ao promover coerência entre projetos, facilitar a interoperabilidade entre equipamentos e

reduzir a variabilidade operacional. Diferentemente do simples cumprimento normativo, a padronização eficaz organiza práticas, decisões e interfaces, funcionando como memória técnica institucional (IEC, 2010).

Quando aplicada de forma criteriosa, a padronização contribui para a previsibilidade do desempenho e para a redução de falhas associadas à heterogeneidade excessiva de soluções. A literatura de confiabilidade evidencia que sistemas padronizados tendem a apresentar menor taxa de erro e maior facilidade de manutenção ao longo do tempo (Billinton; Allan, 1996).

7.3 Formação profissional e competência técnica continuada

A formação profissional representa eixo estruturante da sustentação técnica dos sistemas elétricos, uma vez que decisões, operações e intervenções dependem diretamente da competência dos profissionais envolvidos. A engenharia elétrica, por lidar com sistemas complexos e de alto risco, exige capacitação contínua, atualização técnica e adesão a princípios éticos rigorosos (IEEE, 2020).

A literatura sobre erro humano em sistemas complexos demonstra que falhas operacionais estão frequentemente associadas a lacunas de formação, comunicação inadequada ou ausência de padronização de procedimentos. Nesse sentido, a formação continuada atua como mecanismo de mitigação de riscos e preservação da segurança operacional (Reason, 1990).

7.4 Sustentação técnica dos sistemas elétricos

A sustentação técnica dos sistemas elétricos pode ser compreendida como a capacidade de manter desempenho, confiabilidade e segurança ao longo de todo o ciclo de vida, desde o projeto até a desativação. Essa perspectiva incorpora decisões de

engenharia, práticas operacionais, manutenção e atualização tecnológica de forma integrada (IEC, 2010).

A abordagem de ciclo de vida reforça que a eficiência técnica não se limita ao desempenho imediato, mas envolve durabilidade, adaptabilidade e gestão racional de ativos. A literatura sobre gestão de ativos técnicos destaca que sistemas sustentados de forma estruturada apresentam maior resiliência e previsibilidade operacional (ISO, 2014).

7.5 Responsabilidade técnica ao longo do ciclo de vida

A responsabilidade técnica não se encerra com a conclusão do projeto ou a entrada em operação da subestação. Ela se estende à documentação, à rastreabilidade das decisões e à avaliação contínua do desempenho do sistema. Normas técnicas estabelecem requisitos mínimos, mas não substituem o julgamento técnico do engenheiro diante de condições específicas e não previstas (IEC, 2010).

A manutenção de registros técnicos, relatórios e justificativas de decisão constitui prática essencial para a sustentação técnica e para a responsabilidade profissional, assegurando transparência, auditabilidade e aprendizado organizacional (IEC, 2009).

7.6 Integração final dos eixos do manual

Os capítulos anteriores abordaram fundamentos, normas, arquitetura, segurança, equipamentos e sistemas de proteção de forma progressiva e articulada. A integração desses eixos evidencia que a excelência técnica emerge da coerência sistêmica entre decisões de projeto, práticas normativas, capacitação profissional e gestão ao longo do tempo (Kundur, 1994).

A padronização organiza, a formação qualifica e a sustentação técnica preserva. Esses três elementos, quando integrados, consolidam sistemas elétricos capazes de responder às exigências

operacionais, normativas e sociais com previsibilidade e responsabilidade (Stevenson Jr., 1982).

7.7 Síntese

Este manual estruturou-se a partir de uma lógica técnica progressiva, iniciando nos fundamentos dos sistemas elétricos de potência e culminando na integração entre engenharia, operação e responsabilidade profissional. Ao longo dos capítulos, evidenciou-se que a qualidade dos sistemas elétricos depende menos de soluções isoladas e mais da coerência entre decisões técnicas sustentadas ao longo do tempo.

A consolidação da padronização, o investimento na formação profissional e a adoção de uma perspectiva de sustentação técnica constituem, portanto, os pilares para a maturidade e a confiabilidade dos sistemas elétricos contemporâneos. Essa síntese encerra o manual reafirmando o papel da engenharia como prática técnica responsável, contínua e comprometida com a segurança e o desempenho sistêmico.

7.8 Checklist técnico

- ✓ Padronização tratada como estratégia técnica
- ✓ Formação profissional reconhecida como eixo estruturante
- ✓ Sustentação técnica vinculada ao ciclo de vida
- ✓ Responsabilidade técnica compreendida de forma continuada
- ✓ Integração sistêmica dos capítulos assegurada

7.9 Glossário técnico

Padronização, Formação Profissional e Sustentação Técnica dos Sistemas Elétricos

Padronização Técnica

Estratégia de engenharia que estabelece uniformidade de critérios, soluções e procedimentos, visando coerência sistêmica, interoperabilidade entre equipamentos e previsibilidade operacional ao longo do ciclo de vida dos sistemas elétricos.

Formação Profissional

Processo contínuo de aquisição, atualização e consolidação de competências técnicas, éticas e operacionais necessárias ao exercício responsável da engenharia elétrica em sistemas complexos.

Sustentação Técnica

Capacidade de manter o desempenho, a confiabilidade e a segurança dos sistemas elétricos ao longo do tempo, integrando projeto, operação, manutenção e atualização tecnológica.

Confiabilidade Sistêmica

Probabilidade de um sistema elétrico desempenhar suas funções de forma contínua e previsível, dentro dos limites especificados, ao longo de determinado período.

Ciclo de Vida do Sistema Elétrico

Conjunto de fases que compreende concepção, projeto, implantação, operação, manutenção, modernização e desativação de sistemas elétricos.

Responsabilidade Técnica Continuada

Dever profissional do engenheiro de responder tecnicamente pelas decisões tomadas ao longo de todas as fases do ciclo de vida do sistema, e não apenas no momento do projeto ou da implantação.

Julgamento Técnico

Capacidade profissional de interpretar normas, avaliar riscos e tomar decisões fundamentadas quando situações reais extrapolam cenários normativos padronizados.

Memória Técnica Organizacional

Conjunto de registros, documentos e decisões técnicas acumuladas ao longo do tempo, que subsidiam a continuidade, a rastreabilidade e a evolução dos sistemas elétricos.

Gestão de Ativos

Abordagem estruturada para maximizar valor, desempenho e vida útil de ativos técnicos, considerando riscos, custos e confiabilidade ao longo do ciclo de vida.

CONCLUSÃO

A construção, a operação e a manutenção de sistemas elétricos de potência exigem mais do que soluções técnicas isoladas ou o cumprimento pontual de normas. Ao longo deste manual, evidenciou-se que a excelência técnica decorre da integração coerente entre fundamentos teóricos, critérios normativos, decisões de engenharia, práticas operacionais e responsabilidade profissional continuada.

O percurso desenvolvido demonstrou que sistemas elétricos confiáveis resultam da articulação entre arquitetura adequada, segurança operacional, especificação criteriosa de equipamentos, sistemas de proteção consistentes e supervisão eficiente. Contudo, tais elementos somente se mantêm eficazes quando sustentados por padronização técnica, formação profissional permanente e gestão consciente do ciclo de vida dos sistemas.

Nesse sentido, a padronização emerge como instrumento de coerência e previsibilidade, a formação profissional como condição estruturante da segurança e da qualidade técnica, e a sustentação técnica como expressão da maturidade da engenharia aplicada. A responsabilidade do engenheiro, portanto, não se limita ao projeto inicial, mas se estende à preservação da confiabilidade e da integridade dos sistemas ao longo do tempo.

Ao encerrar este manual, reafirma-se a engenharia elétrica como prática técnica, ética e continuada, comprometida com a segurança, o desempenho e a durabilidade dos sistemas elétricos contemporâneos. Tal perspectiva consolida a obra como referência acadêmico-profissional, orientada à formação qualificada e à tomada de decisão responsável no campo dos sistemas elétricos de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039: instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BILLINTON, Roy; ALLAN, Ronald N. **Reliability evaluation of power systems.** 2. ed. New York: Plenum Press, 1996.

BLACKBURN, J. Lewis; DOMIN, Thomas J. **Protective relaying: principles and applications.** 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES. **Technical brochures.** Paris: CIGRÉ, 2018.

GRAINGER, John J.; STEVENSON JR., William D. **Power system analysis.** New York: McGraw-Hill, 1994.

IEC. **IEC 60076-1: Power transformers – Part 1: General.** Geneva: International Electrotechnical Commission, 2011.

IEC. **IEC 60076-3: Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air.** Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013.

IEC. IEC 60099-4: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.

IEC. IEC 61850-6: Communication networks and systems for power utility automation – Configuration description language. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.

IEC. IEC 61869-1: Instrument transformers – Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

IEC. IEC 61936-1: Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: Common rules. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

IEC. IEC 62271-1: High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.

IEC. IEC 62271-100: High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.

IEC. IEC 62271-102: High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.

IEC. IEC Guide 104: The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

IEEE. **IEEE C37.010: Application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis.** New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016.

IEEE. **IEEE C57.12.00: Standard for general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers.** New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015.

IEEE. **IEEE Code of Ethics.** New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1588: standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems.** New York: IEEE, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 80: guide for safety in AC substation grounding.** New York: IEEE, 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C37.111: standard for common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems.** New York: IEEE, 2013.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Power system reliability and security guidelines.** New York: IEEE, 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60870-5: telecontrol equipment and systems – transmission protocols.** Geneva: IEC, 2000.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850-1: communication networks and systems for**

power utility automation – Part 1: introduction and overview. Geneva: IEC, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.
IEC 61850-6: communication networks and systems for power utility automation – Part 6: configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs. Geneva: IEC, 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.
IEC 61850-8-1: communication networks and systems for power utility automation – Part 8-1: specific communication service mapping (SCSM) – mappings to MMS (ISO/IEC 9506-1 and ISO/IEC 9506-2). Geneva: IEC, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.
IEC 61936-1: power installations exceeding 1 kV AC – Part 1: common rules. Geneva: IEC, 2010.

ISO. **ISO 55000: Asset management – Overview, principles and terminology.** Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

ISO. **ISO 9001: Quality management systems – Requirements.** Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

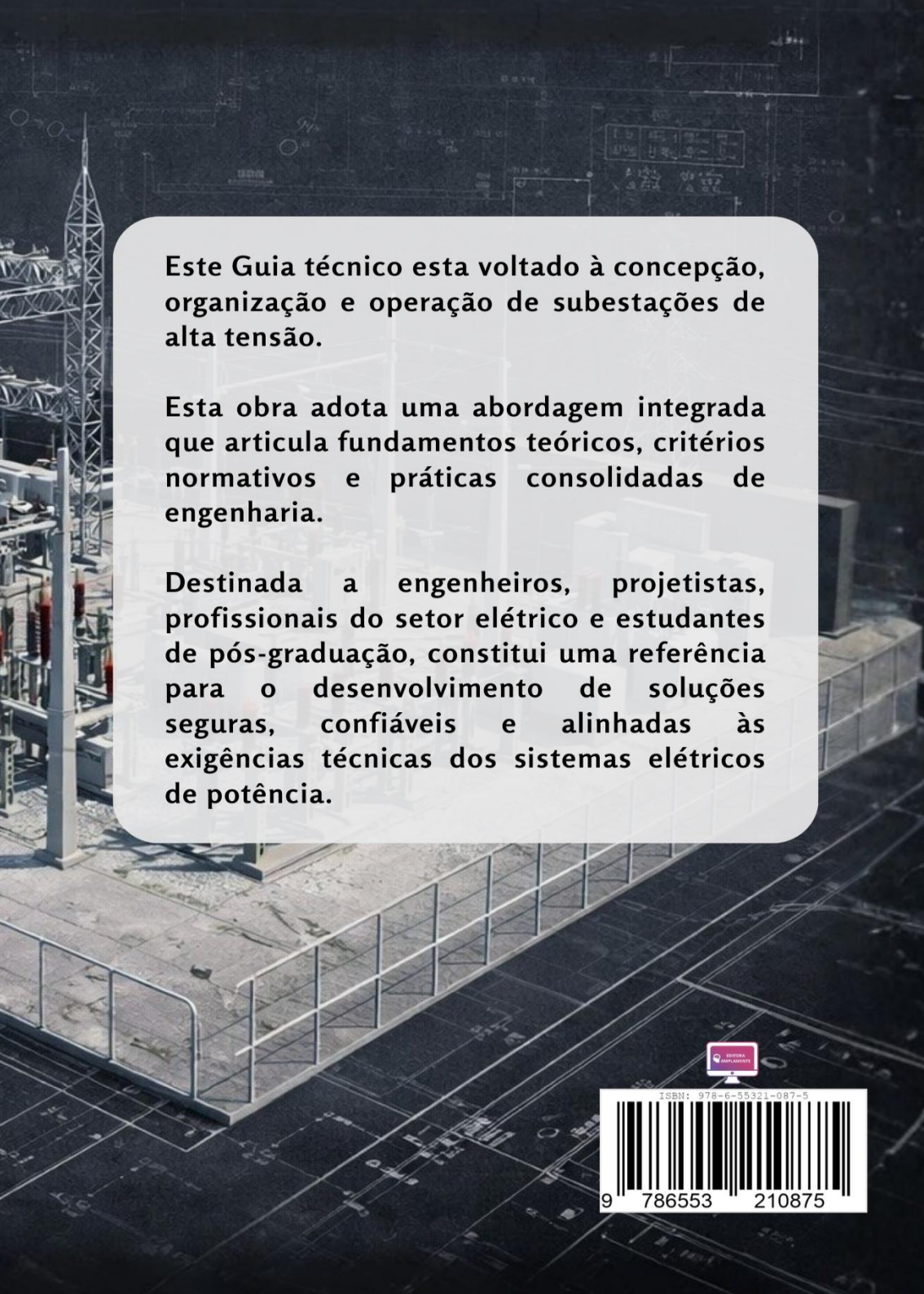
KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** 2. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 1997.

KUNDUR, Prabha. **Power system stability and control.** New York: McGraw-Hill, 1994.

MASON, Charles R. **The art and science of protective relaying.** New York: John Wiley & Sons, 1956.

REASON, James. **Human error**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

STEVENSON JR., William D. **Elements of power system analysis**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1982.



Este Guia técnico esta voltado à concepção, organização e operação de subestações de alta tensão.

Esta obra adota uma abordagem integrada que articula fundamentos teóricos, critérios normativos e práticas consolidadas de engenharia.

Destinada a engenheiros, projetistas, profissionais do setor elétrico e estudantes de pós-graduação, constitui uma referência para o desenvolvimento de soluções seguras, confiáveis e alinhadas às exigências técnicas dos sistemas elétricos de potência.



ISBN: 978-6-55321-087-5

