

SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

TIPOS, EQUIPAMENTOS,
PROTEÇÃO E SEGURANÇA



UMARACI NASCIMENTO

SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

TIPOS, EQUIPAMENTOS,
PROTEÇÃO E SEGURANÇA

Produção e Direitos Autorais

Este e-book foi produzido em parceria entre **Trecon Treinamentos e Stella Digital Agência de Publicidade**. Todo o conteúdo aqui presente foi desenvolvido com o objetivo de fornecer informações detalhadas e práticas sobre segurança elétrica na indústria, seguindo as melhores práticas e regulamentações brasileiras.

Todos os direitos reservados © 2026. Este material não pode ser reproduzido, distribuído ou utilizado sem a devida autorização dos detentores dos direitos autorais.



UMARACI NASCIMENTO

Prof. Umaraci Nascimento é um renomado especialista na área de treinamentos industriais, atuando como coordenador e instrutor principal na Trecon Treinamentos. Com mais de 30 anos de experiência na formação e qualificação profissional, ele é reconhecido por sua expertise em elétrica industrial e por sua habilidade em transformar complexos conceitos técnicos em conhecimentos acessíveis e aplicáveis.

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	05
Capítulo 1: Conceituação e Classificação das Subestações Elétricas	06
Capítulo 2: Níveis de Tensão e Tipos de Subestações	12
Capítulo 3: Equipamentos de uma Subestação Industrial	18
Capítulo 4: Sistema de Proteção em Subestações	24
Capítulo 5: Aterramento Elétrico	30
Capítulo 6: Segurança do Trabalho: EPI, EPC e Ferramentas	35



APRESENTAÇÃO

Este ebook foi elaborado para fornecer uma base sólida e educativa sobre as Subestações Elétricas Industriais, abordando desde os conceitos fundamentais até os aspectos práticos de projeto, operação e segurança. O conteúdo é direcionado a estudantes e profissionais das áreas de Engenharia Elétrica, Técnica em Eletrotécnica e correlatas.

A obra está organizada em seis capítulos que se complementam:

- Capítulo 1 – Conceituação e Classificação das Subestações Elétricas
- Capítulo 2 – Níveis de Tensão e Tipos de Subestações
- Capítulo 3 – Equipamentos de uma Subestação Industrial
- Capítulo 4 – Sistema de Proteção em Subestações
- Capítulo 5 – Aterramento Elétrico
- Capítulo 6 – Segurança do Trabalho: EPI, EPC e Ferramentas

O estudo das subestações elétricas é essencial para qualquer profissional que atua no setor de energia, pois esses sistemas são responsáveis pela confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica em indústrias, comércio e residências.



Capítulo I: Conceituação e Classificação das Subestações Elétricas

1.1 O que é uma Subestação Elétrica?

Uma Subestação Elétrica pode ser definida como o conjunto de instalações elétricas que compreendem equipamentos instalados em ambiente abrigado ou ao tempo, destinados à transformação da tensão, distribuição de energia, seccionamento de linhas de transmissão e, em alguns casos, à conversão de frequência ou conversão de tensão alternada em tensão contínua (Vca em Vcc).

De forma mais abrangente, também podemos definir uma subestação como o conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas.

CONCEITO-CHAVE: A subestação elétrica é o nó de conexão entre a fonte geradora de energia e o consumidor final, garantindo que a energia chegue em condições adequadas de tensão, corrente e confiabilidade.

1.2 Importância das Subestações Elétricas

As subestações elétricas desempenham papel fundamental no sistema elétrico de potência. Sem elas, seria impossível transportar energia gerada em usinas hidrelétricas, termelétricas ou fontes renováveis até os centros consumidores, sejam eles residências, comércios ou indústrias.

As principais funções de uma subestação elétrica são:

- Elevar ou reduzir níveis de tensão para transporte eficiente da energia
- Distribuir energia elétrica para diferentes consumidores ou redes
- Realizar o seccionamento de linhas de transmissão quando necessário
- Fornecer proteção ao sistema contra sobrecargas, curtos-circuitos e outros defeitos
- Permitir medição e controle das grandezas elétricas
- Converter frequência ou natureza da corrente quando necessário

1.3 Legislação Brasileira: Níveis de Tensão

No Brasil, a legislação que define os níveis de tensão a serem obedecidos nos sistemas elétricos está fundamentada no Decreto nº 73.080, de 05/11/1973. Este decreto estabelece a classificação das tensões em categorias que norteiam o projeto e a operação das subestações em todo o país.

Conforme esse marco legal, os níveis de tensão são organizados hierarquicamente, do ponto de vista das concessionárias de energia elétrica, em três grandes grupos:

CATEGORIA	DESCRIÇÃO E NIVEIS DE TENSAO
Distribuição Primária	13,8 kV 23 kV 34,5 kV – Rede das concessionárias para consumidores finais
Sub-Transmissão	69 kV 138 kV – Interligação entre subestações de transmissão e distribuição
Transmissão	230 kV 345 kV 460 kV 500 kV 750 kV 1050 kV – Rede Básica (ONS)

Os níveis de 230 kV a 500 kV são também denominados EAT (Extra Alta Tensão), enquanto os acima de 500 kV são chamados UAT (Ultra Alta Tensão). Alguns níveis, como 345 kV, 460 kV e 750 kV, não estão normalizados pelo Decreto nº 73.080.

1.4 Classificação das Subestações Elétricas

As subestações elétricas podem ser classificadas segundo diversas perspectivas. Cada critério de classificação oferece uma visão específica sobre a natureza e a função do sistema. Os principais critérios são:

- Quanto à relação entre os níveis de tensão de entrada e de saída
- Quanto ao fluxo de potência (se direcional)
- Quanto à sua função no sistema elétrico
- Quanto ao fluxo de potência entre a subestação e o sistema de transmissão
- Quanto ao tipo de instalação
- Quanto ao tipo construtivo
- Quanto à natureza dos parâmetros elétricos

1.4.1 Quanto à Relação entre Tensões de Entrada e Saída

Neste critério, as subestações são divididas em dois grandes tipos:

Subestação de Manobra: mantém o mesmo nível de tensão entre entrada e saída

Subestação Transformadora: muda o nível de tensão entre entrada e saída

As subestações de manobra não possuem transformador de potência principal, atuando apenas no seccionamento, proteção e roteamento da energia elétrica. As subestações transformadoras, por sua vez, utilizam transformadores de potência para adaptar o nível de tensão às necessidades dos consumidores.

1.4.2 Quanto ao Fluxo de Potência (Se Direcional)

As subestações transformadoras se subdividem em:

TIPO	CARACTERISTICA
Elevadora	A tensão de saída é superior à de entrada – utilizada nas saídas de usinas geradoras
Abaixadora	A tensão de saída é inferior à de entrada – a mais comum no sistema elétrico

As subestações elevadoras são típicas de usinas hidrelétricas e termelétricas, onde a energia gerada em baixa tensão (geralmente 11 a 20 kV) precisa ser elevada para centenas de quilovolts, a fim de ser transmitida com menor perda pelas linhas de transmissão. Já as subestações abaixadoras são encontradas ao longo de toda a cadeia de distribuição, até o consumidor final.

1.4.3 Quanto à Função no Sistema Elétrico

TIPO	FUNÇÃO
SE de Transmissão	Ligada a Linhas de Transmissão (LT's); responsável pelo transporte de energia entre subestações, normalmente sem derivações
SE de Sub-Transmissão	Ligada a Linhas de Sub-Transmissão ; transporta energia das SEs de transmissão para as SEs de distribuição, com ramificações e anéis
SE de Distribuição	Recebe energia das linhas de sub-transmissão e a distribui para redes de distribuição, geralmente com abaixamento de tensão



1.4.4 Quanto ao Fluxo de Potência entre a SE e o Sistema de Transmissão

TIPO	DESCRIÇÃO
Subestação Transmissora	O sentido do fluxo de potência sempre parte da subestação para o sistema
Subestação Seccionadora	Subestação de manobra inserida numa Linha de Transmissão do sistema de potência
Subestação Receptora	O sentido do fluxo de potência parte sempre do sistema para a subestação

1.4.5 Quanto ao Tipo de Instalação

TIPO	DESCRIÇÃO
Subestação Externa	Instalada ao tempo (céu aberto), em locais amplos ao ar livre
Subestação Abrigada	Protegida das intempéries por um teto ou estrutura coberta
Subestação Interna	Instalada no interior de uma edificação
Subestação Móvel	Montada sobre um veículo para deslocamento rápido

1.4.6 Quanto ao Tipo Construtivo

TIPO	DESCRIÇÃO
Convencional	Equipamentos são construtivamente independentes uns dos outros e interligados na montagem
Cabine Metálica	Com todos os equipamentos e interligações executados em fábrica (unitária)
Blindada	Barramentos e equipamentos principais dotados de invólucro e isolamento específico (GIS)
Subterrânea	Equipamentos e conexões instaladas abaixo do nível do piso

1.4.7 Quanto à Natureza dos Parâmetros Elétricos

TIPO	DESCRIÇÃO
SE de Corrente Alternada	Sem alteração de frequência e do número de fases – a mais comum
SE Conversora de Frequência	Destina-se a converter a energia de uma determinada frequência para outra
SE Conversora de Fases	Destina-se a converter energia de um número de fases para outro diferente
SE Retificadora	Converte energia de corrente alternada para corrente contínua (sem retorno)
SE Alternadora	Converte energia de corrente contínua para corrente alternada (sem retorno)
SE Mutadora	Converte energia de corrente alternada para contínua e vice-versa

RESUMO DO CAPÍTULO 1:

As subestações elétricas são sistemas complexos que vão além da simples transformação de tensão. Elas englobam manobra, proteção, medição e controle, sendo classificadas por múltiplos critérios que refletem sua função, instalação e construção.



Capítulo 2: Níveis de Tensão e Tipos de Subestações

2.1 Tipos Usuais de Subestações no Brasil

No contexto do sistema elétrico brasileiro, existem dois grandes grupos de subestações que atendem a finalidades distintas:

1. Subestações de Concessionárias de Serviço de Energia Elétrica
2. Subestações Industriais

As subestações de concessionárias são de responsabilidade das empresas distribuidoras e transmissoras de energia, como a CHESF, Eletrobrás, COELBA, CEMIG, entre outras. Já as subestações industriais são de propriedade e responsabilidade do próprio consumidor industrial, que recebe a energia da concessionária e a distribui internamente em sua planta.

2.2 Subestações de Concessionárias por Nível de Tensão

2.2.1 Subestações no Nível de Distribuição (1 a 34,5 kV)

As subestações de distribuição operam nos níveis de tensão entre 1 kV e 34,5 kV. São planejadas, projetadas e construídas conforme as normas ABNT NBR-14039, relatórios da ABRADDE (Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica) e Resoluções da ANEEL.

Além dessas normas, devem obedecer às exigências específicas das próprias distribuidoras, expressas nas ND's (Normas de Distribuição).

Essas subestações caracterizam-se pelo fornecimento de energia a consumidores com demandas na faixa de 75 a 2.500 kW, atendendo:

- Condomínios e conjuntos residenciais
- Hospitais e unidades de saúde
- Pequenos estabelecimentos industriais
- Setor público (escolas, prefeituras, órgãos governamentais)
- Comércio em geral

2.2.2 Subestações no Nível de Sub-Transmissão (34,5 kV a 138 kV)

As subestações de sub-transmissão operam em níveis entre 34,5 kV e 138 kV, sendo planejadas e construídas conforme as Resoluções da ANEEL e das distribuidoras de energia, através de manuais de instruções específicos para grandes consumidores.

Um aspecto importante: em alguns casos, o nível de 138 kV pode ser atendido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), dependendo da localização e topologia da subestação. O ONS é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Brasil.

2.2.3 Subestações no Nível de Transmissão (acima de 138 kV)

As subestações de transmissão operam acima de 138 kV – incluindo os níveis de 230 kV, 345 kV, 500 kV e 750 kV. Esses níveis de tensão compõem a chamada Rede Básica, que é administrada pelo ONS.

Além das exigências do ONS, essas subestações se subordinam às Resoluções da ANEEL e devem seguir rigorosas normas de projeto, construção e operação, dado o impacto que qualquer falha nesse nível pode ter sobre o sistema elétrico nacional.



2.3 Subestações Industriais

As subestações industriais são instalações elétricas de propriedade do consumidor industrial. Elas são responsáveis por receber a energia fornecida pela concessionária, adaptá-la e distribuí-la internamente em toda a planta industrial.

Uma subestação industrial típica é composta por dois elementos principais:

2.3.1 Subestação Receptora (SE Principal)

A SE Receptora, também conhecida como SE Principal, tem sua tensão de operação definida pelo fornecedor da energia (Concessionária ou ONS). Essa definição leva em conta:

- A topologia do sistema elétrico local – se é rede básica ou não
- A demanda de energia contratada pela indústria
- O local geográfico onde será instalada

Em alguns casos, o consumidor industrial pode ser auto-produtor, ou seja, pode dispor de geração própria (solar, eólica, cogeração etc.). Mesmo nessa situação, deve-se obedecer às exigências da ANEEL ou do ONS, onde aplicável.

2.3.2 Subestações de Distribuição Interna

As SEs de distribuição são subestações internas à planta industrial, com a finalidade de fornecer alimentação às cargas em nível de tensão adequado. Usualmente, esses níveis de tensão situam-se entre 2,4 kV e 34,5 kV, podendo também incluir barramentos em baixa tensão (380/220 V).

Essas subestações são estrategicamente posicionadas próximas aos centros de carga, minimizando as perdas nas instalações e os custos com condutores elétricos.

2.4 Características de uma Subestação Industrial

Uma subestação industrial bem projetada deve atender a uma série de requisitos técnicos e de segurança, baseados em normas nacionais e internacionais:

NORMA	DESCRIÇÃO
NEC	National Electrical Code – norma americana de instalações elétricas
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – padrões de engenharia elétrica
NEMA	National Electrical Manufacturer's Association – padrões de equipamentos
IEC	International Electrotechnical Commission – normas internacionais
ANSI	American National Standard Institute – normas americanas gerais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas – normas brasileiras

Além das normas, uma subestação industrial deve possuir:

- Espaço seguro para o trabalho com aterramento adequado dos equipamentos
- Sistema de proteção que garanta completa segurança em regime normal e em curto-circuito
- Equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC)
- Procedimentos documentados de operação e manutenção
- Sistema de emergência seguro e eficaz



2.5 Componentes da Construção de uma Subestação Industrial

A construção de uma subestação industrial envolve três grandes grupos de serviços:

2.5.1 Obras Civas

- Serviços Preliminares e Finais
- Terraplanagem e preparo do terreno
- Urbanização e pavimentação
- Drenagem pluvial e sanitária
- Bases de equipamentos, dutos e canaletas
- Edificações (sala de controle, almoxarifado, banheiros)

2.5.2 Montagem Eletromecânica e Estruturas

- Serviços preliminares e finais de montagem
- Montagem dos equipamentos externos
- Montagem dos equipamentos internos
- Estruturas de concreto e metálicas
- Barramentos e acessórios
- Malha de aterramento e acessórios
- Iluminação externa e tomadas
- Eletrodutos e acessórios
- Cabos isolados de potência e controle

2.5.3 Equipamentos Principais

- Para-raios e protetores de surto
- Transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC)
- Seccionadoras e chaves de manobra
- Disjuntores de alta e média tensão
- Transformadores de força (principal)
- Transformadores de serviços auxiliares
- Painéis de controle e proteção

RESUMO DO CAPÍTULO 2:

O sistema elétrico brasileiro é estruturado em níveis hierárquicos de tensão. A subestação industrial é o ponto de transição entre a rede da concessionária e o sistema de distribuição interno da fábrica, devendo atender tanto às normas do fornecedor quanto às exigências de segurança e operacionalidade da própria planta.



Capítulo 3: Equipamentos de uma Subestação Industrial

3.1 Visão Geral

Os equipamentos de uma subestação elétrica industrial podem ser organizados em quatro grandes grupos funcionais: equipamentos de transformação, equipamentos de manobra, equipamentos de compensação reativa e equipamentos de proteção e medição. Cada grupo é essencial para o funcionamento seguro e eficiente da instalação.

Cada equipamento possui função específica dentro da subestação e deve ser selecionado, instalado e mantido conforme as normas técnicas aplicáveis. A seguir, são apresentados os principais grupos e seus equipamentos.

3.2 Equipamentos de Transformação

3.2.1 Transformador de Potência (Força)

O transformador de potência é o equipamento central de qualquer subestação transformadora. Sua função é alterar o nível de tensão da energia elétrica, mantendo aproximadamente constante a potência (descontadas as perdas). Na subestação industrial, ele tipicamente reduz a tensão recebida da concessionária (69 kV, 138 kV etc.) para níveis utilizáveis internamente (13,8 kV, 4,16 kV, 480 V, 380 V, 220 V).

Principais características do transformador de potência:

- Potência nominal em kVA ou MVA
- Tensão nominal primária e secundária
- Grupo de ligação (Dyn11, Yny0, etc.)
- Tensão de curto-circuito ($I_{cc}\%$)
- Tipo de resfriamento (ONAN, ONAF, ONAN/ONAF)
- Nível de isolamento (BIL – Basic Insulation Level)
- Tap (derivadas) – permite ajuste fino da tensão secundária

3.2.2 Transformadores para Instrumentos

Os transformadores para instrumentos são equipamentos que reduzem as grandezas elétricas (tensão e corrente) a níveis seguros e padronizados para alimentar medidores, relés de proteção e outros instrumentos. São de dois tipos fundamentais:

TIPO	DESCRIÇÃO
Transformador de Corrente (TC)	Reduz a corrente do circuito primário a valores padronizados de 1A ou 5A no secundário, isolando os instrumentos da alta tensão
Transformador de Potencial (TP)	Reduz a tensão do circuito primário a valores padronizados de 115V ou 120V no secundário, isolando os instrumentos da alta tensão

Os TCs e TPs são elementos críticos para a proteção e medição precisas. Um TC com o secundário aberto pode gerar altas tensões perigosas; por isso, nunca deve operar sem carga ou sem curto-circuito no secundário.

3.3 Equipamentos de Manobra

3.3.1 Disjuntores

O disjuntor é o principal dispositivo de manobra e proteção de uma subestação. Sua função é interromper ou estabelecer a passagem de corrente elétrica em condições normais de operação e, principalmente, interromper correntes de defeito (curto-circuito) com segurança.

Principais tipos de disjuntores segundo o meio extintor do arco elétrico:

- A óleo – utiliza o óleo mineral como meio extintor (mais antigo, menos utilizado)
- A ar comprimido – utiliza jato de ar sob pressão para extinguir o arco
- A SF₆ (hexafluoreto de enxofre) – excelente capacidade de ruptura, pouco volume
- A vácuo – muito utilizado em média tensão (5 a 36 kV), compacto e confiável

3.3.2 Seccionadoras (Chaves Seccionadoras)

As seccionadoras são dispositivos de manobra que permitem isolar eletricamente partes do circuito, mas não têm capacidade de interromper corrente em carga (diferente dos disjuntores). Devem ser operadas somente após a abertura do disjuntor associado.

Tipos comuns de seccionadoras:

- Tipo faca (giratória) – mais simples, usada em média tensão
- Pantográfica – usada em alta tensão, movimento vertical
- Rotatória – abertura por rotação dos contatos
- Com chave de aterramento incorporada – garante segurança durante manutenção

3.4 Equipamentos de Compensação Reativa

A compensação reativa é fundamental para manter o fator de potência do sistema dentro dos limites exigidos pela ANEEL (fator de potência $\geq 0,92$ indutivo). O consumo excessivo de potência reativa aumenta as perdas no sistema e pode resultar em cobranças adicionais na fatura de energia.

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO
Reator (derivação)	Consome potência reativa capacitiva; usado para controlar sobretensões em linhas longas
Reator (série)	Limita correntes de curto-circuito; usado para proteger equipamentos
Banco de Capacitores	Fornecer potência reativa indutiva; melhora o fator de potência
Compensador Síncrono	Máquina síncrona operando sem carga mecânica; controle contínuo de reativo
Compensador Estático (SVC)	Compensação dinâmica com tiristores; resposta rápida

3.5 Equipamentos de Proteção

3.5.1 Para-Raios

Os para-raios são dispositivos de proteção contra sobretensões de origem atmosférica (descargas elétricas atmosféricas) ou de manobra. Funcionam como uma válvula: em condições normais, apresentam altíssima resistência, não interferindo no circuito. Na ocorrência de uma sobretensão, conduzem a corrente para a terra, limitando a amplitude da sobretensão e protegendo os demais equipamentos.

Os para-raios modernos são do tipo ZnO (óxido de zinco, sem centelhador), apresentando desempenho superior e menor manutenção.

3.5.2 Relés de Proteção

Os relés de proteção são dispositivos que monitoram continuamente as grandezas elétricas do sistema e, ao detectar uma situação anormal (sobrecorrente, sobretensão, falta de fase, curto-circuito), enviam sinais de trip para os disjuntores, provocando a abertura do circuito defeituoso de forma seletiva e rápida.

Os relés podem ser eletrônicos, eletromecânicos ou digitais (microprocessados). Os modernos relés digitais concentram inúmeras funções de proteção em um único equipamento, facilitando a parametrização e o registro de ocorrências.



3.5.3 Fusíveis

Os fusíveis são elementos de proteção simples e de baixo custo que interrompem o circuito quando a corrente excede um valor predeterminado. São amplamente utilizados em ramais de distribuição, transformadores de instrumentos e pequenos transformadores de força.

3.6 Equipamentos de Medição

Os equipamentos de medição são utilizados para quantificar as grandezas elétricas do sistema, tanto para fins de faturação (medição fiscal) quanto para monitoramento operacional. Os principais equipamentos são:

- Voltímetros e transdutores de tensão
- Amperímetros e transdutores de corrente
- Wattmetros e vatímetros (potência ativa e reativa)
- Registradores digitais de eventos (RDEs)
- Contadores de energia ativa e reativa (kWh e kVarh)
- Medidores de qualidade de energia

3.7 Codificação dos Equipamentos e Diagrama Unifilar

Para facilitar a identificação e a comunicação técnica, os equipamentos de uma subestação são codificados conforme normas ANSI/IEEE. Os códigos são números associados a cada função de proteção (por exemplo, RELÉ 51 = sobrecorrente de fase, RELÉ 87 = proteção diferencial).

O Diagrama Unifilar é a representação gráfica de uma fase do sistema elétrico, mostrando todos os equipamentos, suas interligações e funções. É o documento de referência fundamental para o projeto, operação e manutenção de qualquer subestação elétrica.

RESUMO DO CAPÍTULO 3:

Os equipamentos de uma subestação industrial formam um sistema integrado onde cada componente tem função específica. O transformador de potência é o coração da subestação, enquanto disjuntores, relés, para-raios e medidores garantem operação segura e confiável.



Capítulo 4: Sistema de Proteção em Subestações Elétricas

4.1 Conceito e Importância da Proteção Elétrica

O sistema de proteção elétrica tem como objetivo fundamental detectar condições anormais de operação (faltas, sobrecargas, sobretensões etc.) e isolar a parte afetada do sistema de forma seletiva, rápida e confiável, minimizando os danos aos equipamentos e garantindo a continuidade do fornecimento para o restante do sistema.

Os principais requisitos de um bom sistema de proteção são:

- Seletividade: isolar apenas o elemento defeituoso, mantendo em operação o restante do sistema
- Rapidez: atuar no menor tempo possível, limitando os danos causados pelo defeito
- Sensibilidade: detectar até os menores defeitos que possam ser prejudiciais ao sistema
- Confiabilidade: atuar sempre que necessário e nunca atuar desnecessariamente
- Economia: custo compatível com a importância do elemento protegido

4.2 Relés de Proteção

Os relés são os elementos inteligentes do sistema de proteção. Eles recebem os sinais de tensão e corrente dos transformadores de instrumento (TC e TP), processam esses dados conforme a parametrização e, quando identificam uma situação anormal, enviam um comando de trip ao disjuntor, que abre o circuito.

Os relés podem ser:

- Eletromecânicos: os mais antigos, robustos e simples, com bobinas e contatos mecânicos
- Eletrônicos: baseados em circuitos eletrônicos analógicos
- Digitais (microprocessados): tecnologia atual; múltiplas funções num único equipamento

4.3 Zonas de Proteção

O conceito de zonas de proteção é fundamental para o projeto de um sistema de proteção seletivo. O sistema elétrico é dividido em zonas de proteção que se sobrepõem ligeiramente. Cada zona possui seu próprio sistema de proteção, que deve atuar apenas quando o defeito está dentro da sua zona.

A sobreposição entre as zonas garante que não exista nenhum ponto do sistema elétrico desprotegido. As zonas são delimitadas pelos transformadores de corrente (TCs), que são os pontos de medição do sistema de proteção.

4.4 Funções de Proteção

4.4 Funções de Proteção

A proteção de sobrecorrente é a mais fundamental e amplamente utilizada. Atua quando a corrente no circuito protegido ultrapassa um valor de ajuste (pickup). Pode ser de dois tipos:

TIPO	CARACTERÍSTICA
Tempo Definido (RELE 50)	Atua após um tempo fixo, independente da magnitude da corrente de falta
Tempo Inverso (RELÉ 51)	Quanto maior a corrente de falta, menor o tempo de atuação (característica inversa)

A coordenação entre diferentes relés de sobrecorrente em série é essencial para garantir a seletividade. O relé mais próximo do defeito deve atuar primeiro; caso não o faça, o relé anterior (backup) atua com um retardo de tempo adicional.

4.4.2 Proteção Direcional (RELÉ 67)

A proteção direcional é utilizada em sistemas com múltiplas fontes de alimentação ou em configurações em anel. Ela só atua quando a corrente de falta flui em um determinado sentido, evitando atuações indevidas em defeitos fora de sua zona de responsabilidade.

O relé direcional mede o ângulo entre a corrente e uma grandeza de referência (tensão de polarização), determinando assim o sentido do fluxo de potência e, conseqüentemente, a localização do defeito.

4.4.3 Proteção Diferencial (RELÉ 87)

A proteção diferencial é considerada a mais seletiva e rápida para elementos específicos como transformadores, geradores e linhas de transmissão. Seu princípio de operação é baseado na Lei de Kirchhoff das correntes (LKC):

A soma das correntes que entram em um nó deve ser igual à soma das correntes que saem. Em condições normais, a corrente diferencial é zero (ou muito próxima de zero). Na presença de defeito interno, surge uma corrente diferencial significativa, que comanda o trip do disjuntor.

A proteção diferencial de transformador (87T) é uma das funções mais importantes em subestações industriais, pois o transformador de potência é um equipamento de alto valor e de operação crítica para a planta.

4.5 Coordenação de Proteção

A coordenação de proteção é o processo de ajustar os parâmetros dos relés e fusíveis de um sistema de forma que, em caso de defeito, apenas o dispositivo imediatamente acima (ou ao lado) do ponto de defeito atue, preservando o restante do sistema em operação.

O estudo de coordenação envolve:

- Cálculo de curtos-circuitos (3ϕ , bifásico, monofásico e bifásico-terra)
- Determinação das curvas de tempo-corrente dos dispositivos de proteção
- Verificação das sobreposições entre curvas (seletividade)
- Ajuste de pickup e temporização dos relés
- Elaboração das curvas de coordenação TCC (Time Current Curves)

4.6 Aspectos de Projeto para Proteção

No projeto de uma subestação industrial, os seguintes aspectos de proteção devem ser considerados:

4.6.1 Tensão nos Equipamentos

Os equipamentos devem ser selecionados com nível de isolamento compatível com a tensão nominal do sistema, acrescido de margens de segurança para sobretensões transitórias. O nível básico de isolamento (BIL) define a amplitude máxima de impulso que o equipamento suporta sem deterioração.

4.6.2 Corrente de Curto-Circuito

Todos os equipamentos devem ser capazes de suportar e, no caso dos disjuntores, de interromper a corrente de curto-circuito máxima prevista no ponto de instalação. O cálculo correto da corrente de curto-circuito é um dos passos mais importantes do projeto.

4.6.3 Sistemas de Alarme e Sinalização

Além da proteção automática, o projeto deve prever sistemas de alarme e sinalização que alertem os operadores sobre situações anormais antes que evoluam para defeitos. Isso inclui alarmes de sobrecarga, temperatura elevada no transformador, baixo nível de óleo, entre outros.

4.6.4 Religamento Automático

Em muitos casos, especialmente em redes de distribuição, as faltas são transitórias (passagem de animal, galho de árvore etc.). O relé de religamento automático (RELÉ 79) permite que o disjuntor tente religar automaticamente após uma abertura, restaurando o fornecimento sem intervenção humana.



RESUMO DO CAPÍTULO 4:

O sistema de proteção é o guardião da subestação. A combinação de diferentes funções de proteção (sobrecorrente, diferencial, direcional) com a correta coordenação entre elas garante a seletividade e a continuidade operacional do sistema elétrico industrial.

Capítulo 5: Aterramento Elétrico em Subestações

5.1 O que é o Aterramento Elétrico?

O aterramento elétrico é a conexão intencional de um ponto do sistema elétrico, ou de partes metálicas de equipamentos e estruturas, ao solo (terra). Trata-se de uma das medidas de proteção mais importantes em qualquer instalação elétrica, sendo imprescindível em subestações.

O aterramento cumpre papel duplo:

- Aterramento funcional (do neutro): necessário para o funcionamento do sistema elétrico, estabilizando os potenciais de fase em relação à terra
- Aterramento de proteção: liga as partes metálicas dos equipamentos ao solo, garantindo que, em caso de fuga de corrente, o trabalhador ou usuário não seja submetido a tensão perigosa

5.2 Objetivos do Aterramento

Os principais objetivos do sistema de aterramento em uma subestação elétrica são:

- Proporcionar uma baixa resistência de aterramento para escoamento seguro de correntes de falta
- Manter os valores de tensão carcaça-terra e estrutura-terra dentro do nível de segurança para o pessoal
- Proporcionar um caminho de escoamento para descargas atmosféricas e sobretensões de manobra
- Permitir a atuação rápida dos equipamentos de proteção (fusíveis, disjuntores)
- Diminuir os valores de tensão fase-terra, fixando a tensão de isolamento a valores determinados
- Proporcionar o escoamento da eletricidade estática gerada por equipamentos ou por indução

5.3 Requisitos para um Bom Aterramento

Um sistema de aterramento eficiente deve atender a três requisitos básicos:

REQUISITO	DESCRIÇÃO
Capacidade de Condução de Corrente	Os condutores e eletrodos de aterramento devem suportar as correntes de falta previstas sem danos térmicos
Segurança	As tensões de passo e de toque devem ser mantidas abaixo dos limites seguros para o ser humano
Estabilidade	A resistência de aterramento deve ser estável ao longo do tempo, não sendo severamente afetada por variações de umidade e temperatura do solo

5.4 Fatores que Influenciam no Aterramento

A eficiência do sistema de aterramento é fortemente influenciada pelas características do solo onde é instalado. Os principais fatores são:

- Tipo de solo (granito, argila, areia, etc.) – cada tipo apresenta resistividade específica
- Mistura de diversos tipos de solo
- Estratificação do solo em camadas com profundidades e materiais diferentes
- Teor de umidade – solos mais úmidos conduzem melhor a eletricidade
- Temperatura – temperaturas muito baixas aumentam a resistividade
- Compactação e pressão
- Composição química dos sais dissolvidos na água retida no solo



5.5 Resistividade do Solo

A resistividade do solo (ρ) é a grandeza que caracteriza a dificuldade do solo em conduzir corrente elétrica. É medida em $\Omega \cdot m$ (ohm-metro). Quanto menor a resistividade, melhor o desempenho do sistema de aterramento.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot m$)
Solo pantanoso / turfas	1 a 100
Argilas e argilas arenosas	10 a 300
Areia fina	100 a 2000
Areia grossa e cascalho	200 a 3000
Rocha fragmentada	500 a 10.000
Granito	1.000 a 50.000
Gelo	10.000 a 100.000

A resistividade varia significativamente com a umidade e a temperatura. Por isso, as medições de resistividade devem ser realizadas em diferentes estações do ano e os projetos devem ser baseados na pior condição esperada.

5.6 Medida da Resistividade do Solo

A medida da resistividade do solo é realizada por métodos de campo, sendo o método de Wenner (ou método dos 4 eletrodos) o mais utilizado. Neste método:

- 4 eletrodos são cravados no solo em linha reta, igualmente espaçados a uma distância 'a'
- Os eletrodos externos injetam corrente, os internos medem a tensão
- A resistividade aparente é calculada por: $\rho_a = 2\pi a \times (V/I)$
- A medição é repetida com diferentes espaçamentos, traçando-se a curva $\rho_a \times a$

A análise das curvas permite determinar a estratificação do solo em camadas, fornecendo os parâmetros necessários para o projeto da malha de aterramento.

5.7 Estratificação do Solo

Na prática, o solo raramente é homogêneo. Geralmente, ele é constituído de duas ou mais camadas com resistividades distintas. A análise de estratificação permite modelar o solo como equivalente de duas camadas, com parâmetros ρ_1 (camada superior), ρ_2 (camada inferior) e h (profundidade da interface).

O fator de reflexão k_f é calculado por:

$$k_f = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$$

O valor de k_f varia entre -1 e +1:

- k_f próximo de -1: segunda camada muito condutora (favorável para aterramento)
- k_f próximo de +1: segunda camada muito resistiva (desfavorável)
- $k_f = 0$: solo homogêneo

5.8 Malha de Aterramento

A malha de aterramento é a estrutura de condutores enterrados no solo que compõe o eletrodo de aterramento de uma subestação. É formada por um conjunto de condutores de cobre nu, dispostos em grade, e eletrodos verticais (hastes) cravados no solo.

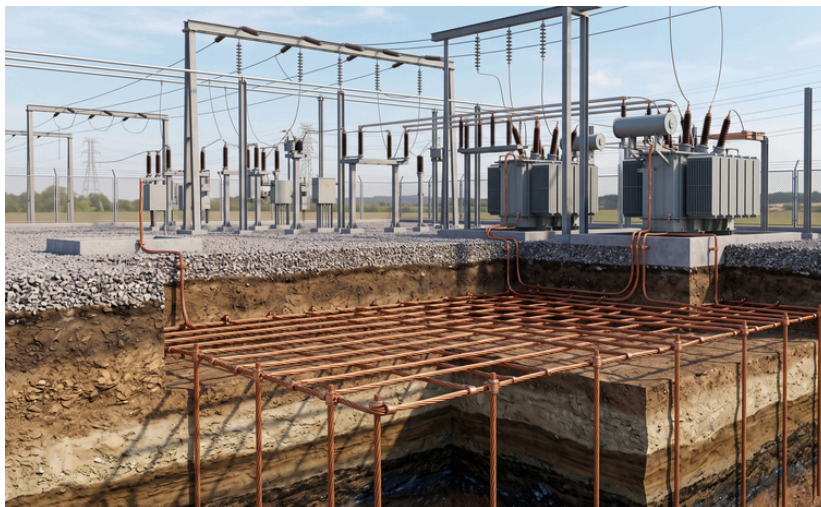
O projeto da malha visa garantir:

- Resistência de aterramento abaixo de $1 \, \Omega$ para subestações de alta tensão
- Tensão de toque (entre a mão e o pé) abaixo de limites seguros
- Tensão de passo (entre os dois pés) abaixo de limites seguros

Os limites de tensão de toque e de passo dependem da resistividade da camada superficial do solo, do tempo de atuação da proteção e do peso do corpo humano, conforme as normas IEEE 80 e NBR 15751.

RESUMO DO CAPÍTULO 5:

O aterramento elétrico é a base da segurança em subestações. Um projeto cuidadoso da malha de aterramento, baseado em medições reais de resistividade do solo, garante que as tensões de toque e passo estejam dentro dos limites seguros para os trabalhadores, mesmo durante condições de falta.



Capítulo 6: Segurança do Trabalho: EPI, EPC e Ferramentas

6.1 Introdução à Segurança em Subestações Elétricas

O trabalho em subestações elétricas envolve riscos elevados, principalmente relacionados ao choque elétrico, arcos voltaicos, queda em altura e inalação de gases. A segurança do trabalho nessas instalações é regulamentada, no Brasil, principalmente pela NR-10 (Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade), que estabelece os requisitos mínimos para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que interagem com instalações elétricas.

CONCEITO FUNDAMENTAL: Nenhum serviço em subestação deve ser iniciado sem que os trabalhadores estejam devidamente treinados, com os EPIs adequados e o aterramento temporário instalado nos trechos em manutenção.

6.2 Equipamentos de Proteção Individual (EPIs)

Os EPIs são todo dispositivo ou produto individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção contra riscos suscetíveis de ameaçar sua segurança e saúde no trabalho. Todos os EPIs devem possuir o Certificado de Aprovação (CA) emitido pelo INMETRO.

6.2.1 EPI para Proteção do Corpo

- **Vestimenta de Segurança:** protege o corpo contra arcos voltaicos e agentes mecânicos. Pode ser um conjunto (calça + blusão), jaqueta ou macacão.
- **Vestimenta Condutiva para Linha Viva:** protege o trabalhador contra o campo elétrico em serviços ao potencial. É composta de macacão de tecido aluminizado, luvas, gorro e calçados do mesmo material.

6.2.2 EPI para a Cabeça

- Capacete de Segurança: protege contra impactos de objetos e isola contra choques elétricos de até 600V. Deve ser usado com a correnteia bem ajustada e jugular sob o queixo.
- Óculos de Proteção: protegem os olhos contra projeção de partículas e radiações nocivas. Podem ser incolores (impactos) ou coloridos (luminosidade).

6.2.3 EPI para Membros Superiores

As luvas são EPIs críticos em trabalhos elétricos. As principais classes de luvas isolantes são:

CLASSE	TENSÃO MÁXIMA DE TRABALHO
Classe 00	500 V CA / 750 V CC
Classe 0	1.000 V CA / 1.500 V CC
Classe 1	7.500 V CA / 11.250 V CC
Classe 2	17.000 V CA / 25.500 V CC
Classe 3	26.500 V CA / 39.750 V CC
Classe 4	36.000 V CA / 54.000 V CC

Além das luvas isolantes, são utilizados:

- Luvas de pelica: usadas sobre as luvas isolantes para proteção contra perfurações e cortes
- Luvas de raspa de couro: proteção contra agentes abrasivos e escoriações
- Mangas isolantes: protegem braços e antebraços com nível de isolamento de até 20 kV

6.2.4 EPI para Membros Inferiores

- Calçados de segurança: de couro, com solado de borracha ou poliuretano, sem componentes metálicos. Isolados para tensões até 1 kV.
- Calçados condutivos: usados em serviços de linha viva, com condutor metálico conectado à vestimenta condutiva.
- Perneiras isolantes: protegem coxas e pernas com nível de isolamento de até 20 kV. Devem ser usadas com calçado elétrico apropriado.

6.3 Equipamentos de Proteção Coletiva (EPCs)

Os EPCs são dispositivos, sistemas fixos ou móveis de abrangência coletiva, destinados a preservar a integridade física e a saúde dos trabalhadores e terceiros que se encontrem nas proximidades dos locais de trabalho. Exemplos:

- Cestas Aéreas: confeccionadas em PVC revestido com fibra de vidro, acopladas a guindaste (munck). Utilizadas principalmente em linha viva.
- Guindastes e Plataformas: equipamentos para levantamento e posicionamento de trabalhadores e materiais em altura.
- Cadeira de Acesso ao Potencial: auxilia no transporte do trabalhador até a cesta ou andaime.
- Escadas Isolantes: indispensáveis para trabalhos em altura em redes aéreas e postes.
- Plataformas Isolantes para Escadas: oferecem maior conforto e segurança ao trabalhador posicionado em escada.
- Tripé Trava-Quedas: utilizados para conduzir trabalhadores na entrada e saída de espaços confinados.

6.4 Detectores de Tensão

Os detectores de tensão são aparelhos de medição ou detecção que, após acoplados a uma vara de manobra isolante, servem para verificar a presença ou ausência de tensão no sistema elétrico. São obrigatórios antes de qualquer serviço de manutenção. Existem dois tipos principais:

TIPO	DESCRIÇÃO
Por Aproximação	Detecta campos elétricos sem contato direto. Faixa: 1 a 800 kV. Sinal sonoro e luminoso.
Por Contato	Requer contato com o condutor. Faixa: 1 a 170 kV. Sinal sonoro e luminoso.

A verificação de ausência de tensão deve ser feita imediatamente antes de iniciar qualquer serviço em equipo presumidamente desenergizado. Nunca se deve assumir que o equipamento está sem tensão sem a devida verificação.

6.5 Ferramentas Portáteis Isoladas e Isolantes

Para trabalhos em instalações elétricas, são utilizados dois tipos de ferramentas:

TIPO	DEFINIÇÃO
Ferramenta Portátil Isolada	Ferramenta manual revestida de material isolante. Protege o trabalhador contra contato elétrico e minimiza riscos de curto-circuito.
Ferramenta Portátil Isolante	Ferramenta fabricada integralmente em material isolante, com insertos metálicos incorporados. A parte ativa é produzida em material isolante.

As normas que regulam as ferramentas para trabalhos elétricos no Brasil incluem a NBR-5410 e a IEC-900. Essas normas estabelecem os requisitos de teste, marcação e uso dessas ferramentas.

6.6 Varas de Manobra e Bastões Isolantes

As varas de manobra e bastões isolantes têm por objetivo garantir a distância de segurança e o isolamento necessário nas intervenções em instalações elétricas. São, portanto, ferramentas e, ao mesmo tempo, equipamentos de segurança coletiva.

Características técnicas das varas de manobra:

- Tensão máxima: de 20 a 500 kV
- Comprimento total: de 1.250 a 6.450 mm
- Diâmetros: de 25 a 38 mm
- Material: fibra de vidro e epóxi (excelente isolamento)
- Construção modular: segmentos de ~1m que se somam conforme necessidade



Principais aplicações:

- Poda de árvores próximas à rede elétrica
- Manobras de chaves faca e chaves corta-circuito fusível
- Instalação e retirada de conjuntos de aterramento temporário
- Retirada e colocação de cartucho porta-fusível
- Detecção de tensão (com detector acoplado)
- Limpeza de rede

Cuidados importantes:

- As varas suportam até 100 kV por metro, mas sujeiras reduzem drasticamente o isolamento
- Antes do uso, devem ser limpas conforme procedimentos específicos
- O acondicionamento para transporte deve ser adequado para evitar danos
- Para tensões acima de 60 kV, devem ser testadas quanto à condutividade antes de cada uso

6.7 Procedimentos de Segurança para Serviços em Subestações

A NR-10 define a sequência de segurança para trabalhos em instalações elétricas. As 5 regras de ouro para trabalhos em instalações desenergizadas são:

- 1.DESENERGIZAR: Abrir todos os dispositivos de manobra (disjuntores e seccionadoras) que possam energizar o trecho em serviço.
- 2.BLOQUEAR E SINALIZAR: Instalar bloqueios nos dispositivos abertos e placas de aviso ("Não Energize - Homem Trabalhando").
- 3.VERIFICAR A AUSÊNCIA DE TENSÃO: Usar detector de tensão em todas as fases do trecho em serviço.
- 4.ATERRAR E CURTO-CIRCUITAR: Instalar o aterramento temporário em ambos os lados do trecho.
- 5.PROTEGER OS PONTOS ADJACENTES VIVOS: Isolar os pontos que permanecerem energizados próximos ao local de trabalho.

6.8 Distâncias de Segurança

A NR-10 define as distâncias mínimas que devem ser mantidas entre trabalhadores e partes vivas energizadas. Essas distâncias variam conforme o nível de tensão e garantem a segurança do trabalhador em caso de arcos voltaicos ou manobras inadvertidas.

FAIXA DE TENSÃO	DISTÂNCIA MÍNIMA
Até 1 kV	Trabalho com proteção adequada (EPIs)
Acima de 1 kV até 69 kV	0,70 m (distância de segurança)
Acima de 69 kV até 138 kV	1,05 m
Acima de 138 kV até 230 kV	1,45 m
Acima de 230 kV até 500 kV	2,05 m
Acima de 500 kV	A definir em procedimento específico

RESUMO DO CAPÍTULO 6:

A segurança em subestações elétricas depende da combinação de EPIs adequados, EPCs, detectores de tensão, varas de manobra e, acima de tudo, de procedimentos seguros e trabalhadores treinados e conscientes dos riscos envolvidos.



CONCLUSÃO

Este ebook buscou apresentar, de forma didática e abrangente, os principais conceitos relacionados às subestações elétricas industriais. Ao longo dos seis capítulos, percorremos desde a definição e classificação das subestações, passando pelos níveis de tensão da legislação brasileira, pelos equipamentos principais, pelo sistema de proteção, pelo aterramento elétrico e, finalmente, pela segurança do trabalho.

O setor elétrico está em constante evolução: novos materiais, equipamentos digitais, automatização e integração com fontes de energia renovável (solar, eólica) estão transformando o projeto e a operação das subestações. Por isso, o profissional da área deve manter-se permanentemente atualizado, buscando novos conhecimentos e acompanhando as revisões das normas técnicas.

Esperamos que o conteúdo aqui apresentado seja útil tanto para o estudo acadêmico quanto para a atuação profissional. O domínio dos conceitos apresentados neste material é o passo inicial para quem deseja trabalhar com segurança e competência no universo das subestações elétricas industriais.

Referências Bibliográficas

- ABNT. NBR 14039: Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. São Paulo: ABNT, 2005.
- ANEEL. Resoluções Normativas. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica.
- IEEE. Std 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Nova York: IEEE, 2013.
- IEEE. Std C37: IEEE Standards for Switchgear. Nova York: IEEE.
- IEC. 60909: Short-Circuit Currents in Three-Phase AC Systems. Genève: IEC.
- BRASIL. Decreto nº 73.080, de 05 de novembro de 1973. Regulamenta os níveis de tensão nos sistemas elétricos. Brasília, 1973.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: MTE.
- KINDERMANN, G. Curto-Circuito. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.
- MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- NASCIMENTO, Umaraci. Subestações Industriais: Tipos, Equipamentos e Proteção. Salvador: Trecon, 2024.



UMARACI NASCIMENTO