UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WEDSON MARCELO CORDEIRO CAVALCANTI

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTO EM SUBESTAÇÃO SECCIONADORA DE 500 kV

Recife
2025

WEDSON MARCELO CORDEIRO CAVALCANTI

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTO EM SUBESTAÇÃO SECCIONADORA DE 500 kV

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cavalcanti, Wedson Marcelo Cordeiro.
Dimensionamento de Barramento em Subestação Seccionadora de 500 kV / Wedson Marcelo Cordeiro Cavalcanti. - Recife, 2025.
70 p. il., tab.

Orientador(a): Zanoni Dueire Lins
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.
Inclui referências.

1. Subestação. 2. Barramento. 3. Dimensionamento. 4. Dimensionamento de Barrramento. 5. Critérios de dimensionamento Elétrico. I. Lins, Zanoni Dueire. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

WEDSON MARCELO CORDEIRO CAVALCANTI

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTO
EM SUBESTAÇÃO SECCIONADORA DE 500 kV

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 13/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr Zanoni Dueire Lins (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Prof. Dr. Artur Muniz Szpak Furtado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Eng. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

A todos que persistem.

AGRADECIMENTOS

Desde pequeno, quando fui instruído na religião, sempre foi pontuada a importância de agradecer. E ao chegar no fim deste grande ciclo, percebi que essa jornada não poderia ser feita de forma solitária. Dito isto, gostaria de registrar aqui, de forma permanente, todos que tiveram grande impacto em minha vida acadêmica e que me fizeram ser quem sou hoje.

Agradeço Enormemente aos meus pais Iracy e Marcelo e a minha irmã Tauana. Que sempre me incentivaram e apoiaram de todas as formas cabais para que eu pudesse dar prosseguimento a minha graduação e ser a pessoa que sou hoje, amo vocês.

Deixo aqui, também, o nome de duas pessoas maravilhosas em minha vida. Duas pessoas incríveis que eu tive o prazer e honra de encontrar durante minha graduação, Rogenilton Vieira e Alex Ferraz. Os agradeço por todas as experiências vividas e por todos os ciclos que me ajudaram a encerrar, sendo este o maior deles.

Gostaria de agradecer ao grupo sonho de valsa com tufinho (wha), que é o grupo de pessoas mais únicas que encontrei dentro da universidade, o que torna impossível não amar cada um. Obrigado pela preocupação, ajuda, e conselhos tanto na faculdade quanto na vida.

Agradeço grandemente a liderança do meu setor, setor eletromecânico, da INTEREST Engenharia. Obrigado pela confiança em mim e por me proporcionar um local para que eu pudesse adquirir todo o conhecimento necessário para ser o profissional que sou hoje. Tudo que aprendi e aprendo dentro do escritório é fruto da paciência de vocês, e principalmente de Isa belinha, minha líder direta, que me deu a ideia do tema e me auxiliou para que eu pudesse dar início ao trabalho. Obrigado por ser a pessoa e líder que você é.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer ao professor Zanoni, que me auxiliou tanto em cadeiras muito importantes durante graduação como também no meu TCC. Você foi incrível durante todo o desenvolvimento do meu TCC professor! obrigado pelos conselhos e pela orientação.

RESUMO

As subestações são de fundamental importância dentro do Sistema Elétrico Nacional visto que fornecem confiabilidade tratando a energia do sistema e conseguem ter rápida atuação perante contingências e operações de chaveamentos de curta duração. Nesse contexto o barramento, que é o elemento que auxilia no escoamento da energia na subestação, fazendo ligação entre todos os equipamentos, deve ser capaz de suportar todos os horizontes de atuação da subestação – favoráveis e desfavoráveis. Este trabalho traz as ferramentas necessárias para dimensionar um barramento de forma confiável e segura. A partir do estudo de caso que tem por base um problema real identificado em projeto é demonstrada a teoria e as considerações tomadas para elaboração das tabelas de cálculo, que tem por objetivo definir uma configuração adequada de barramento para a subestação que será ampliada. O barramento atual pode ser reutilizado caso atenda aos critérios de dimensionamento frente as versões mais atuais das normas aplicáveis, e caso não, novas configurações devem ser propostas até que se encontre um barramento que possa ser utilizado.

Palavras-chave: Subestação; barramento; dimensionamento; dimensionamento de barramento; critérios de dimensionamento elétrico.

ABSTRACT

Substations are of fundamental importance within the National Electric System, since they provide reliability by handling the system's energy and are able to act quickly in the face of contingencies and short-duration switching operations. In this context, the busbar, that is the element that assists in the flow of energy in the substation, connecting all the equipment, must be capable of withstanding all operational scenarios of the substation – favorable and unfavorable. This work brings the necessary tools to find a bus arrangement in a reliable and safe way. Based on a case study that is grounded on a real problem identified in a project, the theory and considerations taken for the development of the calculation tables are shown, aiming to define an appropriate busbar configuration for the substation that will be expanded. The current busbar can be reused if it meets the sizing criteria according to the most recent versions of the applicable standards, and if not, new configurations must be proposed until a bus arrangement that can be used is found.

Keywords: Substation; busbar; sizing; bus arrangement; blectrical design criteria.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo da estrutura de um SEP. 20
Figura 2 – Funcionalidade das subestações no SEP. 22
Figura 3 – Subestação 13,8 kV ao tempo. 24
Figura 4 – Exemplo da composição de um cabo de média tensão unipolar. 26
Figura 5 – Forma construtiva de um cabo nu. 27
Figura 6 – Barramento de cabos nus com dois subcondutores por fase em uma SE de EAT. 27
Figura 7 – Cabos nus ancorados em estruturas de concreto. 29
Figura 8 – utilização de condutores rígidos numa SE. 29
Figura 9 – Circulação do fluido devido a convecção forçada 34
Figura 10 – Ondas de calor provocadas pela irradiação. 37
Figura 11 – Adaptação da tabela H.4 da IEEE Std 738. 39
Figura 12 – Barramento com um subcondutor por fase. 46
Figura 13 – Exemplo de um barramento com mais de um subcondutor por fase. 47
Figura 14 –Tensão mínima para início e extinção de corona visual. 48
Figura 15 – Fluxograma para dimensionamento de barramentos. 50
Figura 16 – Corte da subestação Master Alpha. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões mais gerais encontradas no Brasil. 23
Tabela 2 – Condutores utilizados em barramento. 28
Tabela 3 – Limite de temperatura na superfície dos condutores. 32
Tabela 4 – Correntes de curto mínimas por nível de tensão. 41
Tabela 5 – Adaptação da Tabela 1 da IEEE Std 80. 43
Tabela 6 – Valores para a constante m. 45
Tabela 7 – Valores para a constante g. 48
Tabela 8 – Corrente nos barramentos da SE em estudo. 53
Tabela 9 – Dados da subestação. 53
Tabela 10 – Dados do cabo Manaus conforme [20] e [21]. 54
Tabela 11 – Cálculo de ampacidade para dois cabos Manaus em operação continua. 57
Tabela 12 – Ampacidade para dois cabos Manaus em condição de operação continua. 57
Tabela 13 – Cálculo de ampacidade para dois cabos Manaus em operação de curta duração. 58
Tabela 14 – Capacidade de condução de corrente dos condutores frente as condições de contorno. 59
Tabela 15 – Cálculo de curto-circuito para dois cabos Manaus. 59
Tabela 16 – Corrente de curto máxima suportada pelos condutores frente as condições de contorno. 59
Tabela 17 – Desempenho frente ao efeito corona para dois cabos manaus. 60
Tabela 18 – Desempenho do barramento frente ao efeito corona. 60
Tabela 19 – Dados do cabo Rail conforme [20] e [21]. 61
Tabela 20 – Cálculo de ampacidade para quatro cabos Rail em operação continua. 62
Tabela 21 – Ampacidade para quatro cabos Rail em condição de operação continua. 62
Tabela 22 – Cálculo de ampacidade para quatro cabos Rail em operação de curta duração. 63
Tabela 23 – Cálculo de ampacidade para quatro cabos Rail em operação de curta duração. 64
Tabela 24 – Cálculo de curto-circuito para quatro cabos Rail. 64
Tabela 25 –Corrente de curto máxima suportada pelos condutores frente as condições de contorno. 64
Tabela 26 – Desempenho frente ao efeito corona para quatro cabos Rail. 65
Tabela 27 – Desempenho do barramento frente ao efeito corona. 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
EAT	Extra alta tensão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ET	Especificação Técnica
LT	Linha de transmissão
MT	Média tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
SPCS	Sistema de Proteção, Controle e Supervisão

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{high}	Alta temperatura média do condutor para a qual a resistência é especificada, valor tabelado de setenta e cinco graus Celsius
h	Altura do condutor em relação ao solo
φ	Ângulo de incidência do vento no condutor
θ	Ângulo efetivo de incidência dos raios solares
A'	Área projetada do condutor por unidade de comprimento
T_{low}	Baixa temperatura média do condutor para a qual a resistência é especificada, valor tabelado de vinte graus Celsius
$TCAP$	Capacidade térmica por unidade de volume
α_r	Coeficiente térmico de resistividade na temperatura de referência T_r
K_f	Condutividade térmica do ar à temperatura T_{film}
C	Constante empírica, 0,301 centímetro elevado a menos um
E_0	Constante empírica, denominada por valor de Peek
g	Constante relacionada a quantidade de sub condutores por fase
I	Corrente máxima suportada pelo barramento
I_{scd}	Corrente suportável de curta duração (rms)
ρ_f	Densidade do ar
D_a	Densidade relativa do ar
D_0	Diâmetro externo do condutor
D	Distância entre fases
s	Distância entre subcondutores
h_e	Distância equivalente do centro do condutor ao solo
t_c	Duração da corrente
H	Elevação do condutor acima do nível do mar em metros
A	Elevação do condutor acima nível do mar em quilômetros
ε	Emissividade
α	Fator de absorção solar
K_{angle}	Fator de direção do vento
m	Fator de irregularidade do condutor
q_s	Ganho de calor solar
E_c	Gradiente máximo admissível
E_m	Gradiente máximo de tensão na superfície do condutor
E_a	Gradiente médio de tensão na superfície do condutor

K_0	Igual a 1/αr – T_r
N_{Re}	Número de Reynolds
n	Número de subcondutores por fase
q_c	Perda de calor por convecção
q_r	Perda de calor por radiação
P	Pressão do ar ambiente
P_0	Pressão na determinação das constantes empíricas C e E_0
r_c	Raio do condutor
r_e	Raio equivalente do feixe de subcondutores
ρ_r	Resistividade do condutor de aterramento na temperatura de referência T_r
$R(T_{high})$	Resistência em corrente alternada de alta temperatura
$R(T_{low})$	Resistência em corrente continua de baixa temperatura
$R(Tc)$	Resistência na temperatura de operação do condutor
ρ_r	Resistividade do condutor de aterramento na temperatura de referência T_r
A_{mm^2}	Seção transversal do condutor
Q_{se}	Taxa de irradiação do fluxo de calor solar corrigido pela altitude
T_a	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura da superfície do condutor
T_r	Temperatura de referência para as constantes do material
T_m	Temperatura máxima permitida
T_{film}	Temperatura média da camada limite do condutor
$V1$	Tensão mínima, fase-terra, para início e extinção de corona visual
T_0	Valor adotado como temperatura base, sendo 25 graus Celsius
V_w	Velocidade do fluxo de ar no condutor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 OBJETIVOS 18

1.1.1 Geral 18

1.1.2 Específicos 18

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 18

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20

2.1 SUBESTAÇÕES 20

2.1.1 Função no SEP 21

2.1.1.1 Transformadora 21

2.1.1.2 Seccionadora 22

2.1.2 Nível de tensão 22

2.1.3 Tipo de instalação 23

2.1.3.1 Abrigadas 23

2.1.3.2 Ao tempo 24

2.2 BARRAMENTOS 25

2.2.1 Condutores flexíveis 25

2.2.1.1 Cabos isolados 25

2.2.1.2 Cabos nus 26

2.2.2 Condutores rígidos 29

3 METODOLOGIA DO PROJETO 31

3.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO 31

3.1.1 Capacidade de Condução de Corrente 32

3.1.1.1 Perda de calor por convecção (q_c) 33

3.1.1.2 Perda de calor por radiação (q_r) 36

3.1.1.3 Ganho de calor solar (q_s) 38

3.1.1.4 Resistência elétrica do condutor. 39

3.1.2 Curto-circuito 41

3.1.3 Efeito Corona 44

3.2 INFORMAÇÕES DA SUBESTAÇÃO 49

3.3 PARÂMETROS PARA CÁLCULO 52

3.3.1 Dados da subestação 52

3.3.2 Dados do cabo 54

3.4 ESTUDO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS 55

4 ESTUDO DE CASO 56

4.1 CABO MANAUS 56

4.1.1 Ampacidade - condição de operação continua 56

4.1.2 Ampacidade - condição de operação de curta duração 58
4.1.3 Curto-circuito 59
4.1.4 Efeito Corona 60
4.2 CABO RAIL 61
4.2.1 Ampacidade - condição de operação contínua 61
4.2.2 Ampacidade - condição de operação de curta duração 63
4.2.3 Curto-circuito 64
4.2.4 Efeito Corona 65
5 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 67
REFERÊNCIAS 68

1 INTRODUÇÃO

A facilidade com que a energia elétrica pode ser transformada em outras formas de energia de forma rápida e não poluente levou a humanidade a sua gigantesca utilização, a tal ponto que atualmente a energia elétrica é considerada vital para o desenvolvimento de qualquer país. Porém após mais de um século de exploração, as fontes de energia mais próximas dos centros de consumo já se encontram em utilização plena, ou quase isso, o que implica na busca de potenciais energéticos cada vez mais distantes [1, 2].

Essa busca traz consigo os desafios de transportar grandes blocos de potência por longas distâncias. Devido a este motivo as subestações (SEs) são de suma importância dentro do Sistema Elétrico Nacional (SIN) dada a maior exigência de níveis de segurança e desempenho no sistema; são essenciais para seu bom desempenho e elevação da sua performance, tornando o crescimento do sistema confiável e seguro [3, 4, 5, 6].

As motivações para que as SEs sejam necessárias vão desde a necessidade da expansão do sistema, estabilidade e confiabilidade do sistema até necessidades relacionadas a grandes empreendimentos, como aumento na demanda de carga para grandes indústrias e qualidade de energia para otimização de processos [7, 8].

O universo das subestações é complexo, envolvendo 3 (três) grandes disciplinas, incluindo outras menos robustas, para que todo o projeto seja construído de forma efetiva e com segurança: eletromecânica, elétrica e civil; cada uma contendo seus projetos específicos [5, 8].

A disciplina civil traz consigo os projetos de estruturas, fundações, alvenaria e terraplenagem de toda a SE. Tem forte ligação com o setor eletromecânico, visto que são projetos relacionados a engenharia elétrica “visíveis” dentro da subestação, como disposição do arranjo de equipamentos, instalações elétricas do pátio e secundárias, sistema de proteção e descargas atmosféricas (SPDA), aterramento e outras infraestruturas gerais [5, 8]. Já o setor de Sistema de Proteção, Controle e Supervisão (SPCS) é relacionado a parte “não vista”, incluindo projetos de proteção, controle e supervisão [5].

As SEs podem ser dispostas de várias formas dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP), sendo internas ou externas, dependendo do nível de tensão e das isolações necessárias para sua utilização no sistema [7]. Contêm em seu arranjo uma gama de equipamentos relativos à medição, transformação, proteção e controle [3, 8, 9].

A interligação elétrica entre os equipamentos é feita através do uso de um ou de um conjunto de cabos denominados por barramento. Logo se vê a necessidade de que esse elemento seja confiável no escopo de um projeto executivo de uma subestação, visto que o barramento auxilia no escoamento de energia ao longo da SE [10].

Para que seja possível dimensionar esses cabos é necessário entender sua constituição, pois suas características elétricas e mecânicas se fazem fortemente presentes no dimensionamento do barramento da subestação. E além das características dos cabos, para que o processo de escolha do barramento possa ser feito de forma adequada existem normas, especificações e procedimentos, que são atualizadas com o passar do tempo, que indicam as diretrizes para realização do projeto [5, 11, 12, 13].

A empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê que o consumo de energia no Brasil em 2025 deverá crescer em média 3,5% em relação ao ano de 2024 – que apresentou uma carga de 78,899 mega watts. E a EPE prevê, ainda, um crescimento anual de 3,3% da carga até o ano de 2029. Essa demanda crescente gera a consequência do crescimento e expansão do SIN [14]. Oitenta e cinco (85) novas SEs estão previstas para entrar no sistema até 2033, com o projeto de mais oitenta a nove (89) unidades ainda sem data definida [6, 15, 16].

Visto o aumento da demanda e a necessidade das subestações dentro do SIN, o tema se encontra em expansão no meio acadêmico. Logo este trabalho vem como uma ferramenta de auxílio para difundir e auxiliar no dimensionamento de barramentos. Tanto na tomada de decisões ao se deparar com problemas em casos reais, quanto na unificação de todas as ferramentas necessárias para escolha do/dos cabos que irão compô-lo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Realizar estudo de caso de dimensionamento de barramento em ampliação de subestação seccionadora de 500 kV.

1.1.2 Específicos

- Demonstrar a teoria em conjunto com as considerações utilizadas para que o dimensionamento de barramento possa ser efetuado;
- Aplicação da metodologia teórica nos barramentos da ampliação da subestação existente para o adequado dimensionamento do barramento;
- Tomar decisões baseado nos resultados encontrados e propor solução, caso necessário.

1.2 Organização do Trabalho

Após o capitulo um onde estarão presentes a introdução e a motivação dada para que este trabalho fosse pensado e publicado, no capitulo dois uma contextualização inicial sobre o universo das subestações será feita: desde o que é uma subestação até suas funcionalidades e necessidades no sistema elétrico.

Logo após, ainda no capitulo dois, será abordado o que é um barramento, falando um pouco sobre suas possíveis configurações e os locais indicados para utilizá-los, trazendo maior foco nos barramentos aéreos dentro das subestações de alta e extra tensão que serão ponto chave do presente trabalho.

Todos esses elementos são necessários para desenvolvimento da metodologia utilizada no estudo de caso. No capítulo três será feita uma explicação de como aplicar a teoria de forma efetiva na prática e das referências utilizadas. Logo após, a

subestação do estudo de caso será descrita e suas principais características intrínsecas necessárias para o dimensionamento serão apresentadas.

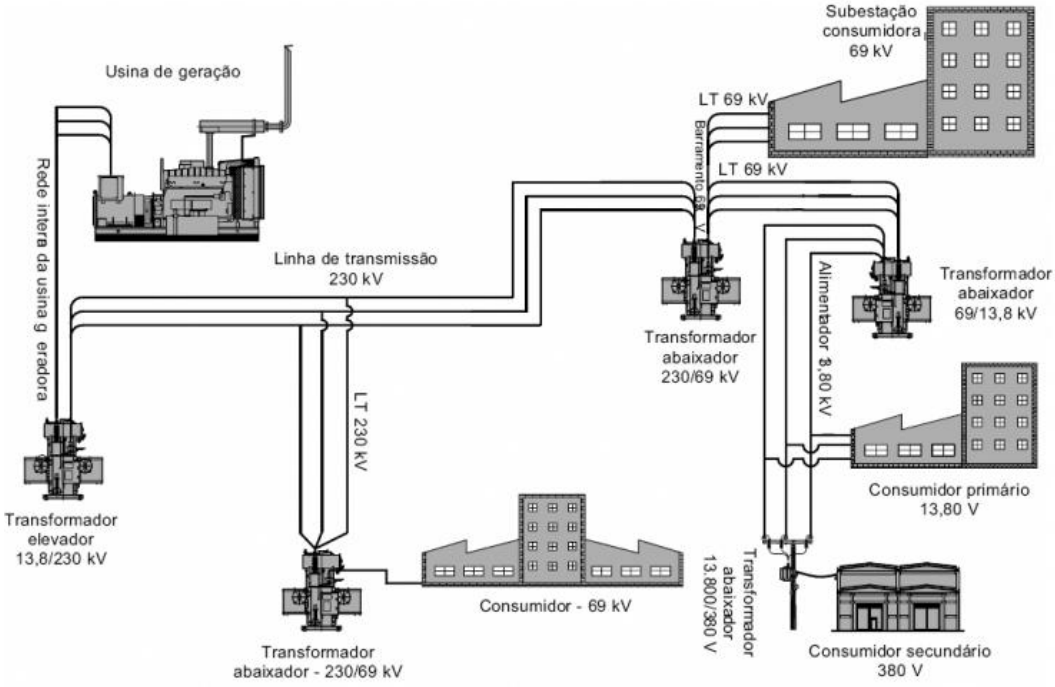
Após o dimensionamento, apresentado no capítulo, quatro será possível definir se o barramento encontrado atende aos critérios de dimensionamento elétrico, caso não, deve ser estudada a melhor solução a ser aplicada para o novo barramento. Por fim, no capítulo cinco serão feitas as considerações finais e sugestões para melhorias em trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Subestações

Como pode ser visto na Figura 1 o Sistema Elétrico de Potência é o conjunto de todas as instalações e equipamentos que compõem a geração, transmissão e distribuição de energia [1, 6].

Figura 1 – Exemplo da estrutura de um SEP.



Fonte: Retirado de [5].

Para que a energia seja gerada, transmitida e distribuída com segurança é necessário que exista uma subestação para reduzir ou elevar a tensão em diferentes níveis [5].

Portanto, uma SE é um conjunto de equipamentos de manobra e/ou transformação usados para dirigir o fluxo de energia em um sistema de potência e possibilitar a sua diversificação através de rotas alternativas. São de grande relevância devido ao fato de possuírem dispositivos de proteção capazes de detectar

os diferentes tipos de faltas que ocorrem no sistema e de isolar esses trechos protegendo a integridade física do sistema e das pessoas [4, 5, 15].

Dentro do SEP as subestações tem sua classificação conforme [15], sendo:

- função dentro do sistema elétrico;
- nível de tensão;
- tipo de instalação.

Vale salientar que no presente trabalho informações diversas sobre SEs serão apresentadas, porém sempre com foco nas subestações de alta e extra alta tensão, sendo esta última abordada diretamente no estudo de caso.

2.1.1 Função no SEP

No que tange a funcionalidade, as SEs podem ser transformadoras ou seccionadoras [3].

2.1.1.1 Transformadora

Podem ser do tipo elevadora e abaixadora. Se encontram na geração e distribuição do SEP e têm basicamente a função de transformar energia, convertendo a tensão de suprimento para um nível diferente [3, 5, 16].

- As elevadoras são mais encontradas próximo a centros de geração, hidrelétricas, térmicas, eólicas, fotovoltaicas etc. Elevam o nível de tensão gerado e distribuem a potência associada para as linhas de transmissão (LTs) [3, 5].
- As abaixadoras são mais encontradas no final de um sistema de transmissão, próximo aos centros de carga. Reduzem o nível de tensão recebido e distribuem a potência associada para as redes de distribuição aéreas ou subterrâneas, também podem alimentar subestações com menor nível de tensão [3, 5].

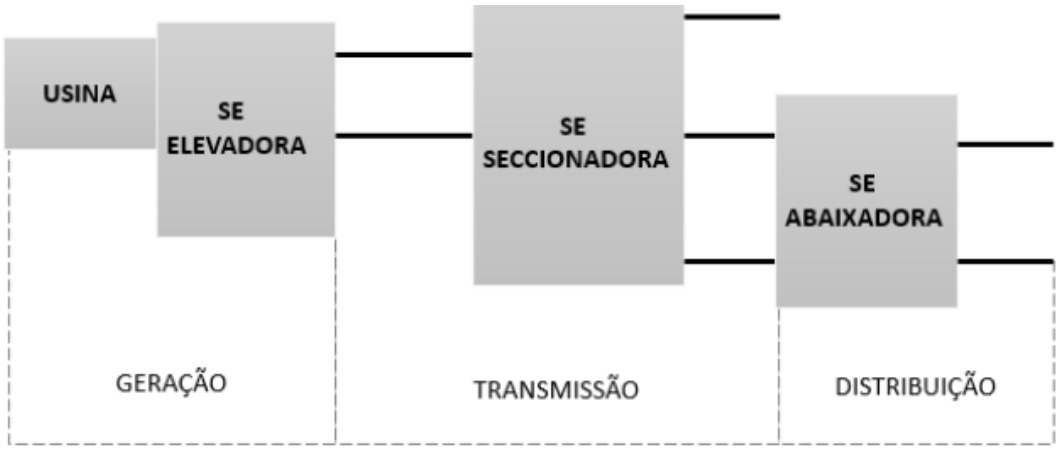
2.1.1.2 Seccionadora

As subestações seccionadoras, por sua vez, podem ser amplamente encontradas na parte da transmissão do SEP, quase sempre na rede básica, mas podendo operar em outros níveis de tensão [3, 4, 16].

Interligam circuitos de suprimento sob o mesmo nível de tensão, para que esses longos trechos sucessivos possam ser partidos em menor comprimento, fazendo chaveamento de LTs, isolando sistemas e interligando subestações de distribuição com as centrais de transmissão [3, 4, 16].

Na Figura 2 é possível ver de forma mais direta o local ótima que os SEs exercem duas funções dentro do SEP.

Figura 2 – Funcionalidade das subestações no SEP.



Fonte: Retirado de [4].

2.1.2 Nível de tensão

São ramificadas em quatro tipos: baixa tensão (BT), media tensão (MT) e alta (AT) e extra alta tensão (EAT) [4].

As SEs de BT são aquelas que tem nível de tensão abaixo de 2,3 kV. As de MT, por sua vez, tem nível de tensão acima de 2,3 kV e menor ou igual a 34,5 kV, sendo de maior predominância as subestações na tensão de 13,8 kV encontradas

em todo norte-nordeste, utilizadas em redes de distribuição, e 34,5 kV, utilizadas na geração em parques solares, eólicos e usinas hidrelétricas [15, 16].

As de SEs de AT têm nível de tensão acima de 34,5 kV e menor ou igual 230 kV. Normalmente são subestações presentes na distribuição, reduzindo a extra alta tensão para que a energia possa ser encaminhada aos consumidores, com 230 kV sendo um caso especial, visto que é encontrada na parte de transmissão de energia e pertencente a rede básica. As SEs de EAT são as que têm nível de tensão maior que 230 kV, pertencentes à rede básica. Tipicamente são encontradas na transmissão e regidas pelos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) [4, 5, 13]. A Tabela 1 traz as tensões mais gerais que podem ser encontradas no Sistema Elétrico de Potência brasileiro.

Tabela 1 – Tensões mais gerais encontradas no Brasil.

Tensões nominais (kV)	Categoria
2,4 13,8 15 34,5	Média Tensão
69 88 138 230	Alta Tensão
345 440 500 750	Extra alta Tensão

Fonte: adaptado [5, 17].

2.1.3 Tipo de instalação

Podem ser abrigadas ou construídas ao tempo [7].

2.1.3.1 Abrigadas

Têm sua funcionalidade em ambientes com alto índice de poluição, seja por contaminantes salinos ou proximidade ao litoral ou indústriais. Nesse tipo de SE

todos os equipamentos são abrigados: instalados no interior de edificações feitas normalmente de concreto armado ou em câmaras subterrâneas. Apresentam um custo elevado de construção, porém tem maior tempo de vida útil. São comumente encontradas nos níveis de tensão inferiores a 69 kV [3, 5, 7, 18].

2.1.3.2 Ao tempo

Os equipamentos são instalados ao tempo, portanto estão sujeitos a todas as condições atmosféricas desfavoráveis, como temperatura, chuva, poluição, vento etc.; logo, são fabricados para suportar essas intempéries [9].

Normalmente são uma solução de baixo custo, ainda que necessitem de manutenção mais frequente. E devido as distâncias necessárias entre fases de barramento, esses tipos de subestações abrem espaço para uma grande gama de topologias de arranjo, vide Figura 3. A grande maioria das SEs com tensão igual ou acima de 69 kV são de construção ao tempo, ocorrendo casos especiais onde podem ser abrigadas [3, 4, 5, 7].

Figura 3 – Subestação 13,8 kV ao tempo.

Fonte: Próprio autor.

2.2 Barramentos

O barramento é o conjunto de condutores (das três fases) que transportam a energia através da instalação, mas entende-se que barramento também pode significar apenas uma das fases. Esse conjunto de condutores, ou condutor, que pode ser arranjado em diferentes formatos e conter variados materiais em sua composição, se conectam tanto aos circuitos de entrada, injetando potência na SE, como nos circuitos que escoam essa potência no sentido da carga [5, 10].

A título de esclarecimento no decorrer do trabalho, será feita a distinção entre cabo e condutor, onde condutor é o elemento que transporta a corrente elétrica e cabo é um conjunto de condutores [11].

Para que essas ligações sejam feitas, é necessário escolher o tipo de barramento que melhor se enquadra no projeto. Nesse contexto, o barramento poderá ser rígido ou flexível [11].

2.2.1 Condutores flexíveis

Encontrados na forma de cabos isolados ou nus.

2.2.1.1 Cabos isolados

São cabos de cobre ou alumínio revestidos de isolantes. Normalmente são utilizados quando há necessidade de mais segurança na instalação. Em subestações esses cabos são podem ser encontrados na BT, nas instalações elétricas, projetos de iluminação e tomadas de pátio. Já na MT, para encaminhamentos de média tensão e alimentação dos serviços auxiliares. Em raros casos esse tipo de cabo é encontrado na AT [5, 11, 19].

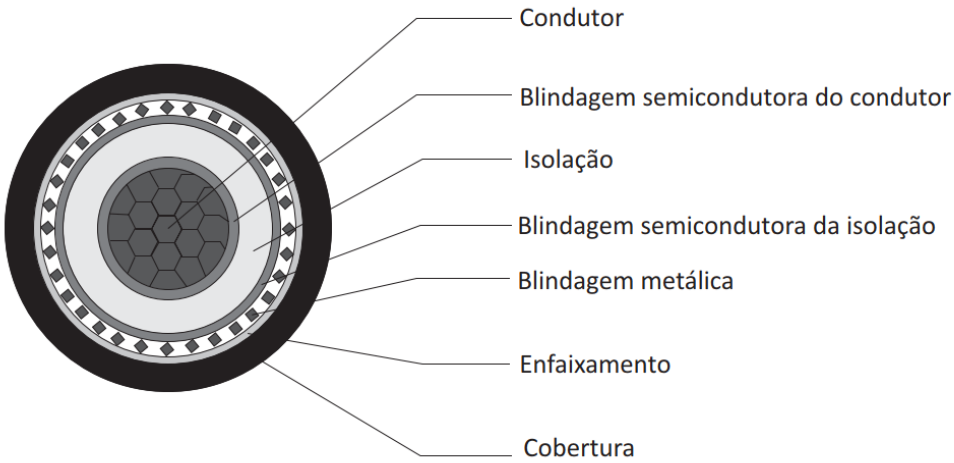
A principal diferença entre os cabos isolados de BT e MT, é que os cabos de MT apresentam em sua composição blindagem metálica, pois como cabos de média tensão são normalmente encaminhados dentro de dutos enterrados próximos a canaletas, a blindagem serve para proteger o cabo de interferências que possam

ocorrer devido aos cabos de proteção e controle que são encaminhados dentro da canaleta [5, 11, 19].

Como pode ser visto na Figura 4 a blindagem semicondutora serve para evitar interferências eletromagnéticas no cabo. A blindagem metálica por sua vez possui um ponto especifico de aterramento para escoar correntes parasitas quando há falha na isolação semicondutora, permitindo a criação dessas correntes parasitas devido a campos eletromagnéticos externos. [5, 11, 19].

Cabos isolados de MT são utilizados, normalmente, quando se deseja diminuir a distância entre fases, na utilização de redes subterrâneas e em ambientes fechados, podendo ser abertos tendo sua respectiva medida de segurança [5].

Figura 4 – Exemplo da composição de um cabo de média tensão unipolar.



Fonte: Retirado de [11].

2.2.1.2 Cabos nus

Um condutor sem qualquer isolação ou cobertura é conhecido como cabo nu. Embora dentro das SEs existam cabos nus para aterramento, são principalmente usados na composição dos barramentos, suas características construtivas são diversas, desde os matérias que podem ser utilizados a forma que esses materiais os constituem [11].

Figura 5 – Forma construtiva de um cabo nu.

Fonte: Retirado de [20].

Podem ser encontrados em cobre, alumínio e suas respectivas ligas. Compostos por um único material, como pode ser visto na Figura 5, ou materiais variados conforme apresentado na Tabela 2. Cabos nus, quando utilizados em barramentos de alta tensão, normalmente podem ser arranjados de diferentes formas. Na Figura 6, podemos ver um barramento em uma SE de AT com dois subcondutores, cabos nus, por fase. Porém existem barramentos que podem ter até 4 subcondutores por fase, conforme ampacidade demandada pela SE. [5, 20, 21]

Figura 6 – Barramento de cabos nus com dois subcondutores por fase em uma SE de EAT.

Fonte: Próprio autor.

Para SEs e LTs de alta tensão, normalmente são utilizadas condutores com materiais compostos por ligas de alumínio e aço, sendo os mais utilizados encontrados na Tabela 2 [11, 20, 21].

Tabela 2 – Condutores utilizados em barramento.

Sigla	Condutor
CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
ACAR	Condutores de Alumínio reforçado com Alma de Alumínio
CAL	Condutores de Liga de Alumínio

Fonte: Próprio autor.

Cabos nus possuem alguns pontos negativos que têm grande influência nos projetos nos quais podem ser encontrados [10]. Estão sujeitos as mesmas intempéries que os equipamento instalados ao tempo, como indicado em [9], por isso precisam ter resistência mecânica mais elevada [11].

Considerando a maleabilidade dos cabos nus, a distância entre fases precisa ser maior devido ao balanço provocado pelo vento e por condições adversas como o curto-circuito. Ainda existem as dificuldades relacionadas as flechas dos condutores, que a depender da temperatura de operação, influenciam nas distâncias em relação ao solo ou aos circuitos instalados acima ou abaixo deste [10, 22]. Entretanto, o fato de ser preciso apenas duas estruturas para prender os cabos em cada ponta, vide Figura 7, os torna versáteis para cobrir longas distâncias, o que é usual em SEs de AT e EAT, proporcionando um uso menor de estruturas [10, 22]. O fato de não necessitarem de uma camada de isolamento os torna de menor custo [11].

Figura 7 – Cabos nus ancorados em estruturas de concreto.

Fonte: Próprio autor.

As características elétricas e mecânicas desses cabos podem ser encontradas em catálogos de fabricantes, vide [20, 21]. Adiante, esses valores serão utilizados como parâmetros no dimensionamento de barramento.

2.2.2 Condutores rígidos

Barramentos rígidos podem ser fabricados em vários formatos, sendo o tubular o mais empregado para conduzir energia dentro das SEs [10, 22]. A diferença entre os barramentos rígidos pode ser encontrada no diâmetro e nas espessuras das paredes internas ou *"schedule"* (sh).

Figura 8 – utilização de condutores rígidos numa SE.

Fonte: Próprio autor.

Os condutores rígidos fornecem alta condutibilidade, diminuem a área necessária para disposição do arranjo, pois, como visto na Figura 8, demandam menor espaço para conexão entre os equipamentos e apresentam oscilação pouco significativa quando expostos a incidência de vento [10, 22].

As estruturas de suporte para os condutores rígidos são de menor porte, porém, devido a estudos de deflexão e fibra condutora, que definem a distância mínima entre apoios para barramentos rígidos, a quantidade de suportes necessários para sustentar o barramento tende a aumentam consideravelmente [10, 22, 23].

3 METODOLOGIA DO PROJETO

3.1 Metodologia de Cálculo

Para o dimensionamento do barramento em uma SE é necessário conhecimento de algumas variáveis que são influenciadas diretamente por características intrínsecas a subestação e pelo local onde será construída.

Características no local do empreendimento como velocidade de vento, temperatura média e máxima, incidência dos raios solares etc., muitas vezes, dependem de diferentes medições, quase sempre durando meses, para que seja possível obtenção de valores precisos [23, 24]. Então para que seja possível padronizar trâmites e características mais gerais do projeto, transmissoras e distribuidoras criam suas próprias Especificações Técnicas (ETs).

Visando segurança para as instalações a serem projetadas, as ETs balizam os projetos, tornando possível padroniza-los permitindo, assim, sua aceleração. Para desenvolver a metodologia de cálculo deste trabalho será utilizada a Especificação Técnica: Projetos Eletromecânicos de Subestações [25], procedimento de rede Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para Subestações e seus equipamentos [13] e normas especificas voltadas para o dimensionamento de barramentos: IEEE std-80 – Guide fo Safety in AC Substation Graunding [12], IEEE 605 – Guide for Bus Design in Air Insulated Substation [23], IEEE 738 – Standards for Calculating the Current-Temperature [24], as quais fornecem informações necessárias para os cálculos.

Características que dependem diretamente da SE a ser estudada e ao do local do empreendimento serão fornecidas posteriormente na metodologia de projeto.

Os seguintes aspectos devem ser considerados para se dimensionar um barramento, conforme [12]:

- Capacidade de Condução de corrente;
- Curto-Circuito;
- Efeito Corona;
- Dimensionamento mecânico do barramento rígido.

A SE utilizada no estudo de caso não possui utilização de barramentos rígidos. Como ampliações de SEs devem seguir os padrões do projeto existente conforme estabelecido no procedimento de rede Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para Subestações e seus equipamentos [13].

3.1.1 Capacidade de Condução de Corrente

Denominada usualmente como ampacidade, a capacidade de condução de corrente é a propriedade de um condutor de transportar energia elétrica limitada pelo seu aquecimento devido a corrente que flui em seu meio. É importante que o barramento apresente boa performe frente a esse critério de dimensionamento visto que o dimensionamento errôneo da ampacidade pode levar a degradação das características mecânicas e elétricas de um condutor [23, 26].

O critério de determinação da ampacidade consiste em um comparativo entre valores calculados com algumas condições de contorno. Essas condições serão definidas para os cabos do barramento atuando em regime de operação continua e de curta duração [13, 25].

É importante entender que a temperatura do barramento deve ser limitada pela temperatura dos terminais dos equipamentos com os quais o barramento tem ligação [23]. Em sua maioria, os terminais de equipamentos de alta tensão são feitos de alumínio ou de alguma liga relacionada [27] e, conforme [28], a temperatura máxima que pode ser considerada para esses terminais é de 75 °C.

A partir dessas premissas em conjunto com [25], as considerações de temperatura onde os cabos estarão atuando são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Limite de temperatura na superfície dos condutores.

Operação Contínua	Curta Duração
75°C	90°C

Fonte: adaptado de [20, 25].

O balanço térmico do condutor influencia diretamente na ampacidade. Pois, como pode ser visto nas Equações (3.1) e (3.2) a ampacidade é uma relação direta entre a perda de calor por convecção, a perda de calor por radiação ao ganho de calor pelo condutor devido ao sol e inversamente proporcional a resistência o condutor operando em uma determinada temperatura [23, 24].

$$I^2R(T_c) + q_s = q_c + q_r \tag{3.1}$$

Ou

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(Tc)}} \tag{3.2}$$

Onde:

- *I* é a ampacidade máxima suportada pelo barramento, A;
- q_c é a perda de calor por convecção, W/m;
- q_r é a perda de calor por radiação, W/m;
- q_s é o ganho de calor solar e, W/m;
- $R(Tc)$ é a resistência na temperatura de operação do condutor, Ω/m.

3.1.1.1 Perda de calor por convecção (q_c)

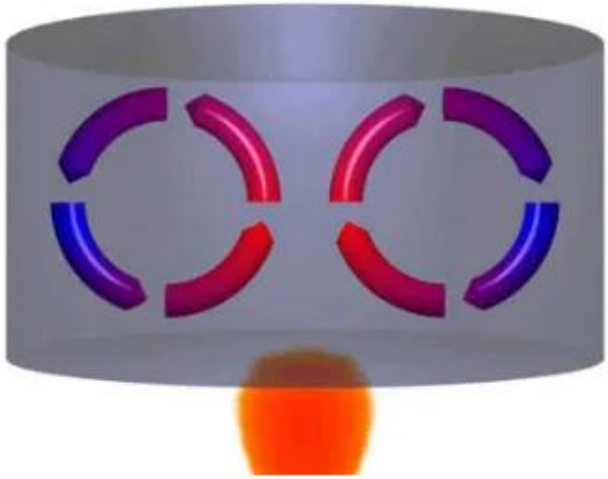
A variável q_c traz a relação com que o condutor perde calor para o ambiente por meio da convecção, sendo uma função direta:

- Da diferença entre a temperatura ambiente e do condutor;
- Do diâmetro do condutor;
- Da altura do condutor em relação ao nível do mar;
- Da velocidade e direção do vento.

A convecção pode ser forçada ou natural. A primeira acontecendo pelo processo contÍnuo do ar frio em volta do condutor que esquenta, fica mais leve, sobe e uma nova massa de ar frio, mais densa, tomar seu lugar, procedimento que pode ser observado na Figura 9 onde o ar circula devido ao calor recebido pela chama. Já

a forçada ocorre quando o ar em movimento passa pelo condutor resfriando-o [24, 29].

Figura 9 – Circulação do fluido devido a convecção forçada



Fonte: adaptado de [29].

O cálculo de q_c leva em consideração a comparação entre os valores individuais encontrados da convecção forçada e natural. Sendo a última comparada a primeira em grandeza com velocidades de vento muito próximas a zero (0,2 m/s) [24]. Para este trabalho, onde a velocidade do vento não é próxima a zero, não será considerado o cálculo para a convecção natural.

Um número adimensional de extrema importância para o cálculo de q_c é o número de Reynolds, que determina os principais parâmetros que correlacionam o comportamento viscoso dos fluidos newtonianos [30].

O número de Reynolds é dado por [24]:

$$N_{Re} = \frac{D_0 \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \tag{3.3}$$

Em que:

- N_{Re} é o número de Reynolds, adimensional;
- D_0 é o diâmetro externo do condutor, m;

- ρ_f é a densidade do ar, kg/m³;
- V_w é a velocidade do fluxo de ar no condutor, m/s;
- μ_f é a viscosidade absoluta (dinâmica) do a, kg/m-s;

Onde a densidade do ar é dada por [24]:

$$\rho_f = \frac{1{,}293 - 1{,}525 \times 10^{-4} \times H + 6{,}379 \times 10^{-9} \times H^2}{1 + 0{,}00367 \times T_{film}} \tag{3.4}$$

A viscosidade absoluta é dada por [24]:

$$\mu_f = \frac{1{,}458 \times 10^{-6} \times \left(T_{film} + 273\right)^{1{,}5}}{T_{film} + 383{,}4} \tag{3.5}$$

E T_{film} [24]:

$$T_{film} = \frac{T_a + T_c}{2} \tag{3.6}$$

Sendo:

- H é a elevação do condutor acima nível do mar, m;
- T_{film} é a Temperatura média da camada limite do conduto, °C;
- T_a é a temperatura ambiente, °C;
- T_c é a temperatura da superfície do condutor, °C, conforme Tabela 3.

É importante notar que quão maior é o vento incidindo no condutor maior a perda de calor para o ambiente. Conforme [24] a utilização de um metro por segundo como velocidade de fluxo de vento no condutor é um valor conservador ao passo que também é realista.

A consideração da elevação do condutor acima de nível do mar (H) será feita na metodologia de projeto.

A consideração de T_c será conforme apresentado na Tabela 3, sendo as respectivas temperaturas utilizadas para o regime de operação considerado no cálculo.

Para a utilização das equações referentes ao cálculo da convecção forçada, que será apresentado a seguir, o número de Reynolds têm influência direta e como pode ser visto nas equações (3.7) e (3.8) é diretamente proporcional ao valor de q_c.

Em baixas velocidades de vento é utilizada a equação (3.7), que retorna resultados corretos para convecção forçada subestimando as altas velocidades; já a equação (3.8) é utilizada em altas velocidades subestimando as baixas velocidades. Será calculado os valores de q_c para as duas equações e utilizado o maior valor encontrado para a equação (3.2) [24].

$$q_{c1} = K_{angle} \times \left[1{,}01 + 1{,}35 \times N_{Re}^{0{,}52}\right] \times k_f \times (T_c - T_a) \tag{3.7}$$

$$q_{c2} = K_{angle} \times \left[0{,}754 \times N_{Re}^{0{,}6}\right] \times k_f \times (T_c - T_a) \tag{3.8}$$

onde:

$$K_{angle} = 1{,}194 - cos\,\varphi + 0{,}194\,cos\,2\varphi + 0{,}368\,sin\,2\varphi \tag{3.9}$$

E

$$k_f = 2{,}424 \times 10^{-2} + 7{,}477 \times 10^{-5} \times T_{film} - 4{,}407 \times 10^{-9} \times {T_{film}}^2 \tag{3.10}$$

Em que:

- q_{c1} e q_{c2} são os respectivos cálculos da convecção forçada, W/m;
- K_{angle} é fator de direção do vento, adimensional;
- K_f é condutividade térmica do ar à temperatura T_{film}, W/(m-°C);
- φ ângulo de incidência do vento no condutor, adimensional.

O ângulo de incidência do vento no condutor é variável. Para efeitos de cálculo a IEEE 605 [24] considera incidência perpendicular em todo condutor. Portanto, com o valor de φ igual a 90 graus a equação (3.9) retorna o valor de um [24].

3.1.1.2 Perda de calor por radiação (q_r)

Quando um condutor é aquecido a uma temperatura maior que a de seus arredores, como mostrado na Figura 10, ocorre o fenômeno de transferência de

energia por irradiação para o ambiente, para que haja o balanço de temperatura [23, 24].

Figura 10 – Ondas de calor provocadas pela irradiação.

Fonte: adaptado de [31].

Essa perda de calor é dada em função da [23, 24]:

- Diferença absoluta de temperatura do condutor e do ambiente que o cerca;
- Emissividade da superfície do condutor;
- Área da superfície do condutor.

Essa perda é dada por:

$$q_r = 17{,}8 \times D_0 \varepsilon \times \left[\left(\frac{T_c + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4\right] \quad (3.11)$$

Sendo:

- q_r é a perda de calor por radiação, W/m;
- ε é a emissividade, adimensional.

O fator de emissividade é a habilidade do condutor de emitir calor para o ambiente. Depende do grau de oxidação do condutor, sua dureza e torção. Para novos condutores considera-se o valor de 0,3 enquanto que em condutores com

muitos anos de uso, considera-se o valor de 0,9 [23]. Neste trabalho, conforme indicado na IEEE 605 [24], será utilizado o valor de 0,8.

3.1.1.3 Ganho de calor solar (q_s)

Diferente dos anteriores, o ganho de calor solar é a energia que o condutor ganha devido ao sol. Tendo relação com a:

- Irradiação solar;
- Altitude do barramento;
- Dinâmica entre o condutor e a forma como os raios solares incidem no mesmo.

Essa relação pode ser vista de forma mais direta na equação (3.12) [24]:

$$q_s = \alpha \times Q_{se} \times sin\,\theta \times A' \tag{3.12}$$

Onde:

- q_s é o ganho de calor sola, W/m;
- α é o fator de absorção solar, adimensional;
- Q_{se} é a taxa de irradiação fluxo de calor solar corrigido pela altitude, W/m²;
- A' é a área projetada do condutor por unidade de comprimento, m²/m;
- θ é Ângulo efetivo de incidência dos raios solares, °.

Tanto para a área de incidência dos raios solares quanto para os próprios raios solares em si será considerada a condição mais severa, onde a incidência é perpendicular em toda a superfície do condutor. Assim tornando A' igual a D_0 a nova equação encontrada é:

$$q_s = \alpha \times Q_{se} \times D_0 \times 10^{-3} \tag{3.13}$$

Valores para Q_{se} podem ser encontrados na Figura 11, que é o calor total recebido por uma superfície a nível do mar pelos raios solares incidentes em função da altitude solar. A atmosfera em ambientes de subestações normalmente é limpa, e neste trabalho será utilizado o valor mais conservador de 1040 W/m², ou seja, o valor que oferece a condição mais desfavorável em absorção de energia pelo condutor.

Figura 11 – Adaptação da tabela H.4 da IEEE Std 738.

Ângulo de elevação solar	Atmosfera limpa		Atmosfera Industrial	
	Q_S (W/m^2)	Q_S (W/ft^2)	Q_S (W/m^2)	Q_S (W/ft^2)
5	234	21.7	136	12.6
10	433	40.2	240	22.3
15	583	54.2	328	30.5
20	693	64.4	422	39.2
25	770	71.5	502	46.6
30	829	77.0	571	53.0
35	877	81.5	619	57.5
40	913	84.8	662	61.5
45	941	87.4	694	64.5
50	969	90.0	727	67.5
60	1000	92.9	771	71.6
70	1020	95.0	809	75.2
80	1030	95.8	833	77.4
90	1040	96.4	849	78.9

Fonte: adaptado de [24].

Para a absorção solar é sempre uma boa prática utilizar o mesmo valor da emissividade, pois conforme [23] e [24] é considerado uma boa aproximação.

3.1.1.4 Resistência elétrica do condutor.

A resistência do condutor varia conforme as listadas:

- Seção do condutor;
- Frequência;

- Corrente fluindo em seu meio;
- Temperatura.

O cálculo da resistência do condutor é ajustado linearmente conforme a temperatura da sua superfície já que os valores fornecidos pelo fabricante do condutor já levam em conta o efeito *skin* nas resistências para temperaturas tabuladas [20, 21, 24]. Esse cálculo é feito como:

$$R(Tc) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}}\right] \times (T_c - T_{low}) + R(T_{low}) \tag{3.14}$$

Para:

- $R(T_c)$ sendo a resistência elétrica do condutor à temperatura desejada, Ω/m;
- $R(T_{high})$ sendo a resistência em corrente alternada de alta temperatura, Ω/m;
- $R(T_{low})$ sendo a resistência em corrente contínua de baixa temperatura, Ω/m;
- T_{low} sendo a baixa temperatura média do condutor para a qual a resistência é especificada, valor tabelado 20 °C, conforme [20, 21];
- T_{high} sendo a alta temperatura média do condutor para a qual a resistência é especificada, valor tabelado 75 °C, conforme [20, 21].

3.1.2 Curto-circuito

A condição normal de operação no SEP é quando o sistema opera em regime permanente. Entretanto, a ocorrência de defeitos na subestação independente de quão bem feito seja o projeto. Esses defeitos, que causam sobretensões e/ou sobrecorrentes no sistema, levam o mesmo a um estado transitório de curta duração denominado curto-circuito [1].

Devido ao fato de os SEP's estarem sujeitos a curtos-circuitos, mesmo que por um curto período de tempo, todos os equipamentos devem estar dimensionados para atender essa condição transitória [1, 9]. Como o barramento faz a ligação entre todos os componentes da subestação, é necessário que ele também atenda a esse critério de dimensionamento.

O procedimento de rede Submódulo 2.6 [13] define as correntes máximas permitidas de curto-circuito para os níveis de tensão de operação da rede básica. Para subestações que não pertencerem a rede básica é uma boa prática utilizar a Especificação Técnica (ET) da Eletrobras [25]

Para que ocorra o atendimento dessa característica de dimensionamento elétrico, é necessário que o cabo suporte uma condição maior que a indicada na Tabela 4.

Tabela 4 – Correntes de curto mínimas por nível de tensão.

Nível de Tensão de Operação (kV)	Corrente de curto (kA)
≥ 345	50
= 230	40
= 138	31,5
= 69	31,5
= 34,5	25
= 13,8	25

Fonte: adaptado de [13, 25].

A equação (3.15) avalia a suportabilidade dos condutores escolhidos frente a corrente de curto-circuito [12].

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \times \alpha_r \times \rho_r}\right) \times ln\left(\frac{K_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)} \tag{3.15}$$

Sendo:

- I é acorrente suportável de curta duração (rms), kA;
- A_{mm^2} é a seção transversal do condutor, mm²;
- T_m é a temperatura máxima permitida, °C;
- T_r é a temperatura de referência para as constantes do material, °C;
- α_r é o coeficiente térmico na temperatura de referência T_r, conforme Tabela 5, 1/°C;
- ρ_r é a resistividade do condutor na temperatura de referência T_r, conforme Tabela 5, μΩ-cm;
- K_0 é igual a 1/ α_r – T_r conforme Tabela 5, °C;
- t_c é a duração da corrente, s;
- TCAP é a capacidade térmica por unidade de volume, conforme Tabela 5, J/(cm3·°C).

Quanto a temperatura máxima permitida, foi considerado que os condutores podem suportar até 180 graus Celsius em curto-circuito sem perda das suas características mecânicas [20]

O procedimento de rede Submódulo 2.6 indica que a duração da corrente de curto no sistema, ou seja, o tempo que leva para atuação da proteção, deve ser de 0,5 segundo [13].

Para os variados materiais que podem ser utilizados na composição de condutores, a referência [12] apresenta as características mecânicas, elétricas e térmicas relacionadas a cada tipo específico, e esses valores serão utilizados na equação (3.15) para encontrar a corrente de curto-circuito total suportada pelo condutor. Para efeitos de cálculo, quando da ocorrência de mais de um tipo de material no cabo utilizado, serão escolhidas, na Tabela 5, as características, que retornem o menor valor para a equação (3.15).

Tabela 5 – Adaptação da Tabela 1 da IEEE Std 80.

Descrição	Condutividade do material (%)	Fator α_t a 20°C (1/°C)	K_0 a 0°C (0°C)	Temperatura de fusão T_m (°C)	ρ_r a 20°C (μΩ·cm)	Capacidade térmica TCAP [J/(cm³·°C)]
Cobre, recozido e estirado	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre, comercial estirado	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Fio de aço revestido de cobre	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85
Fio de aço revestido de cobre	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Barra de aço revestida de cobre	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Alumínio, grau EC (condutor elétrico)	61	0,00403	228	657	2,86	2,56
Alumínio, liga 5005	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6
Alumínio, liga 6201	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6
Fio de aço revestido de alumínio	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58
Aço 1020	10,8	0,0016	605	1510	15,9	3,28
Barra de aço revestida de inox	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44
Barra de aço galvanizado	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93
Aço inoxidável 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03

Fonte: adaptado de [12].

3.1.3 Efeito Corona

Quando os condutores são submetidos a um gradiente de potencial que excede um determinado valor crítico de tensão disruptiva do ar, se inicia um processo de descargas elétricas no entorno desse volume de ar. Devido ao campo elétrico que se forma na circunvizinhança desse condutor, ocorre a ionização do ar que gera uma coroa luminosa no entorno do condutor [5, 23]. Com isso, o efeito corona apresenta uma descarga luminosa devido a ionização do ar ao redor de um condutor, causada por um gradiente de tensão que excede um determinado valor crítico [23].

É necessário enfatizar que não existe nenhuma lei física que sustenta uma tensão admissível que inibe o efeito corona. Logo, a ideia do atendimento deste critério é que o condutor exiba uma performance aceitável frente a sua ocorrência [23].

A formula de Peek aponta o gradiente de tensão que dá início ao aparecimento do efeito corona na superfície dos condutores, conhecido como gradiente máximo admissível, que pode ser visto na equação (3.16) [23]:

$$E_c = m * E_0 * D_a * (1 + \frac{C}{\sqrt{D_a * r_c}}) \tag{3.16}$$

Onde:

$$D_a = \left(\frac{273 + T_0}{273 + T_a}\right) * \frac{P}{P_0} \tag{3.17}$$

e

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 - \frac{A}{10}\right) \tag{3.18}$$

Em que:

- E_c é o Gradiente Máximo Admissível, kV/cm;
- E_0 é Constante empírica, denominada valor de Peek, 21,1 kV/cm, valor rms;
- C é uma Constante empírica, 0,301 cm^{-1};

- m é o fator de irregularidade do condutor, adimensional;
- D_a é a densidade relativa do ar, adimensional;
- r_c é o raio do condutor, cm;
- T_0 é o valor adotado como temperatura base, °C, sendo 25 °C conforme [23];
- P é a pressão do ar ambiente, kPa;
- P_0 é a pressão na determinação das constantes empíricas C e E_0, kPa;
- A é a elevação do condutor acima nível do mar, km.

O fator de irregularidade, m se dá conforme indicado na Tabela 6 [23].

Tabela 6 – Valores para a constante m.

Fator de irregularidade (adimensional)	valor
Cabo	0,85
Tubo polido	1
Tubo extrudado	1,12

Fonte: Adaptado de [23].

Assim como pontuado no tópico do critério da ampacidade, a consideração da elevação do condutor acima do nível do mar será feita na metodologia de projeto.

As características relativas ao condutor também serão apresentadas na metodologia de projeto.

Após determinação da tensão crítica para a ocorrência do Efeito Corona, ou seja, do Gradiente Máximo Admissível (E_c), é necessário calcular o valor de gradiente máximo de tensão na superfície do condutor. Este é relativo as características do condutor, e pode ser calculado para um ou mais subcondutores por fase [23].

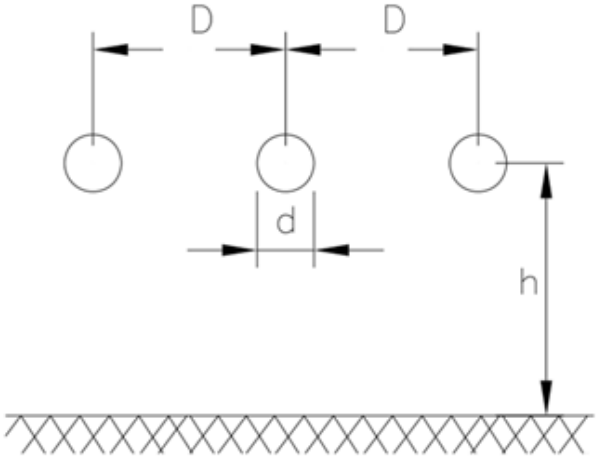
As equações (3.19) e (3.20) são utilizadas para encontrar o gradiente máximo na condição de um cabo por fase, que pode ser exemplificado pela Figura 12, em um barramento trifásico [23].

$$E_m = \frac{h_e}{h_e - \frac{d}{2}} * E_a \tag{3.19}$$

Sendo:

$$E_a = \frac{V_1}{\frac{d}{2} * ln\,(\frac{4h_e}{d})} \tag{3.20}$$

Figura 12 – Barramento com um subcondutor por fase.



Fonte: adaptado de [23].

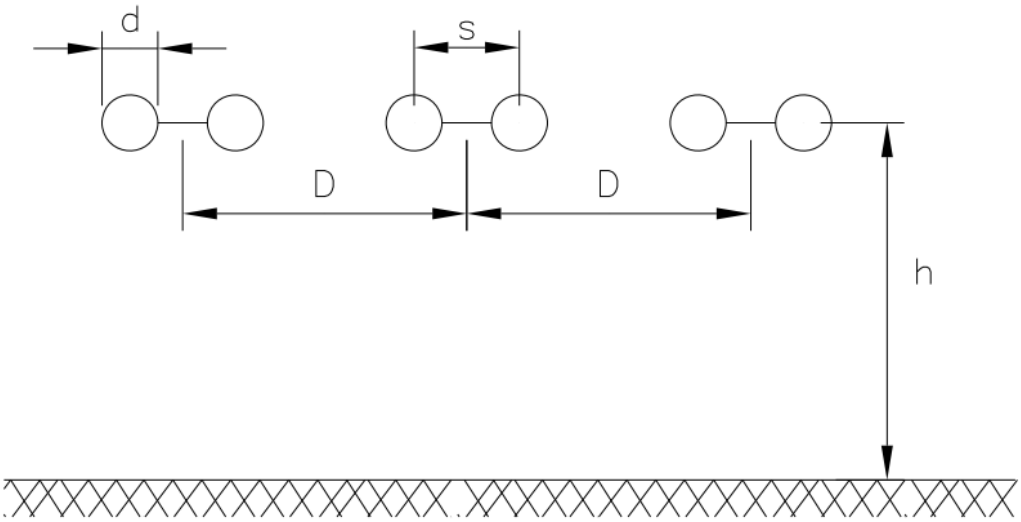
Para mais de um subcondutor por fase, vide Figura 13, serão adotadas as equações (3.21) e (3.22) [23].

$$E_m = \frac{h_e}{h_e - r_e} * E_a \tag{3.21}$$

Sendo:

$$E_a = \frac{V_1}{n * r_c * ln\,(\frac{2h_e}{r_e})} \tag{3.22}$$

Figura 13 – Exemplo de um barramento com mais de um subcondutor por fase.



Fonte: adaptado de [23].

Onde:

- E_m é o gradiente máximo de tensão na superfície do condutor, kV/cm;
- E_a é o gradiente médio de tensão na superfície do conduto, kV/cm;
- r_e é raio equivalente do feixe de subcondutore, cm;
- n é o número de subcondutores por fase, adimensional;
- s é a distância entre subcondutores, m;
- D é a distância entre fase, m;
- h é a altura do centro condutor em relação ao sol, m;
- h_e é a distância equivalente do centro do condutor ao sol, m;
- g é uma constante relacionada a quantidade de sub condutores por fase, adimensional;
- $V1$ é a tensão mínima, fase-terra, para início e extinção de corona visual, kV.

O valor de g depende da quantidade de condutores que compõem cada fase do barramento, valor que será apresentado na metodologia de projeto quando da descrição das configurações da subestação. A Tabela 7 mostra o valor de g para diversas quantidades de subcondutores por fase [23].

Tabela 7 – Valores para a constante g.

g (adimensional)	valor
1, 2 ou 3 subcondutores por fase.	1
4 subcondutores por fase	1,12

Fonte: Adaptado de [23].

A tensão fase terra mínima para início e extinsão de corona visual ($V1$) é regida pelo O procedimento de rede Submódulo 2.6 [13] para toda subestação pertencente a rede básica ou que se conecte diretamente a algum desses empreendimentos. A Figura 14 demonstra os valores.

Figura 14 –Tensão mínima para início e extinção de corona visual.

Tensão nominal (kV)	Tensão mínima (kV fase-terra, eficaz)
765	536
500 ou 525	350
440	308
345	242
230	161
138	97

Fonte: adaptado de [13].

As duas condições necessárias para que ocorra uma operação satisfatória do barramento frente ao efeito corona são: 1) O gradiente máximo admissível (E_c)

apresente valor maior que o gradiente máximo de tensão na superfície do condutor (E_m); e, 2) O valor de Peek (E_0) apresente maior valor que o gradiente máximo de tensão na superfície do condutor (E_m).

3.2 Informações da Subestação

Para dimensionar um barramento é necessário entendimento da SE a qual será aplicado. Como visto anteriormente, as configurações para representação de um barramento são diversas. A escolha dos cabos e quantidade de subcondutores dependem de características elétricas do sistema, do atendimento aos critérios de dimensionamento elétrico em conjunto com normas vigentes, em suas versões mais atualizadas, e do local onde a SE se encontra.

Levando em conta as considerações anteriores e pensando também no custo de investimento do empreendimento, que é um fator externo a cálculos e premissas, torna-se oneroso encontrar uma configuração satisfatória que atenda todos os tópicos propostos, cada qual com sua devida importância.

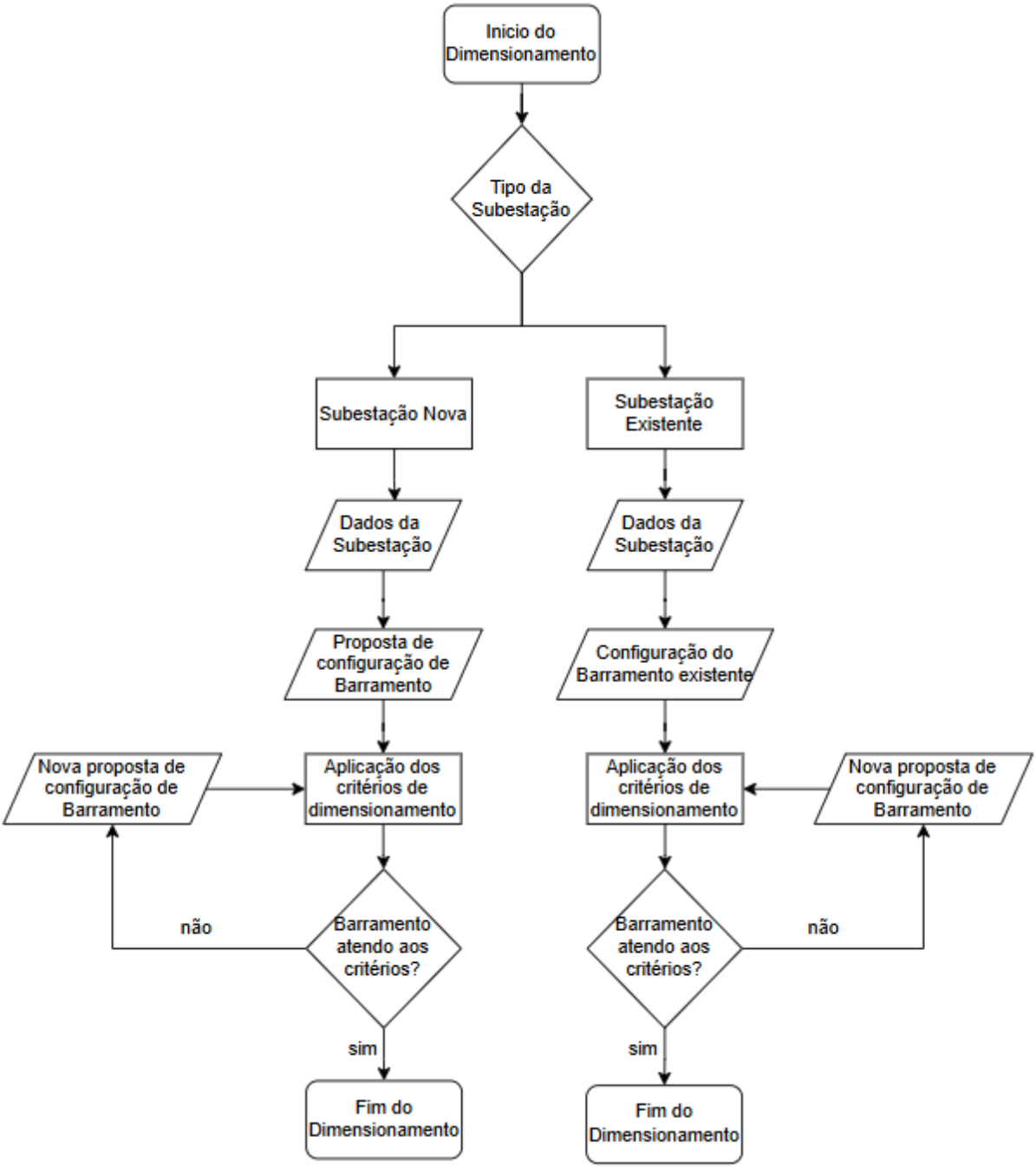
Por este motivo algumas rotinas são sempre utilizadas para reduzir o trabalho do projetista, onde: para novas subestações os projetos básicos de estudo de fluxo ou características elétricas da própria subestação (potência dos transformadores e tensão de operação), permitem encontrar com menos dificuldade os formatos de barramentos que podem ser utilizados. Visto que apresentam os dados da corrente em operação normal e de contingência da subestação em vários horizontes de estudo dentro da subestação.

Para ampliações, normalmente se valida o barramento existente para que esse possa ser reutilizado no novo vão da ampliação, conforme pode ser visto no procedimento de rede Submódulo 2.6 [13]; caso não atenda aos critérios, devem ser propostas novas configurações.

Quando é necessária a utilização de novos cabos no dimensionamento, uma boa prática é a comparação dos valores de ampacidade fornecidos nos catálogos dos fabricantes dos cabos com os valores de operação da SE. Os valores fornecidos em catálogos são encontrados em estudos feitos pelo fabricante com considerações especificas que provavelmente não serão iguais às encontradas no local de

construção da subestação. Entretanto, os valores de ampacidade podem fornecer um caminho inicial para o dimensionamento. Mesmo com todas as informações fornecidas, o dimensionamento do barramento pode exigir diversas tentativas até se chegar à configuração mais adequada. Esse processo pode ser descrito em forma de tomadas de decisões lógicas simples como demonstrado na Figura 15

Figura 15 – Fluxograma para dimensionamento de barramentos.

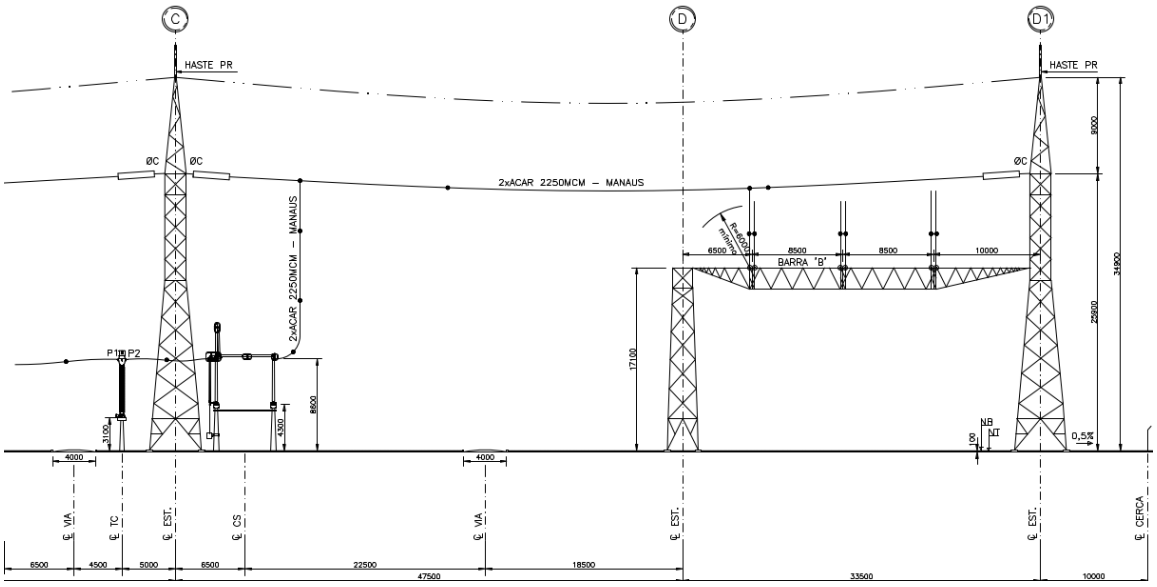


Fonte: Próprio autor

A Subestação Master Alpha é do tipo seccionadora 500 kV com isolação a ar e instalada ao tempo. Essa SE encontra-se no estado da Paraíba e é pertence a rede básica do SIN, logo é regida pelo procedimento de rede Submódulo 2.6 [13].

Essa SE tem disposição de arranjo do tipo disjuntor e meio e apresenta um barramento composto por 2 (dois) cabos do tipo ACAR – 2250 MCM – código Manaus, por fase, que aparece em 3 (três) níveis diferentes de barramento: o de interligação de equipamentos, que se encontra mais perto do nível do terreno; o principal, que recebe fluxo de todos os vãos da subestação; e, o barramento superior, que tem a maior altura dentre os três. Os níveis de altura em metros de cada barramento podem ser vistos na Figura 16

Figura 16 – Corte da subestação Master Alpha.



Fonte: adaptado de [13].

Será aplicado estudo para validar a reutilização dessa configuração de barramento em um novo vão em ampliação.

3.3 Parâmetros para Cálculo

Todos os dados externos a metodologia de cálculo estão presentes neste tópico. São grandezas com ligação direta com as características mecânicas e elétricas do condutor escolhido para composição do barramento ou relacionadas com as características físicas da subestação e o local escolhido para sua construção/ampliação.

Valores relacionados diretamente a SE quando não encontrados em ET, são disponibilizados diretamente pelas transmissoras ou distribuidoras responsáveis pelo empreendimento.

Valores relacionados aos cabos podem ser encontrados em catálogos de fabricantes. Se faz necessário que esses catálogos estejam em sua versão mais atualizada, pois as características podem mudar a depender da revisão.

3.3.1 Dados da subestação

Os valores, referentes a SE, necessários para cálculo dos critérios de dimensionamento elétrico são:

- Corrente nos barramentos em condição normal e sobrecarga em amperes;
- Distância entre fases em metros;
- Quantidade de subcondutores por fase;
- Distância entre subcondutores em metros;
- Altitude em metros;
- Altura de atuação dos barramentos em metros;
- Temperatura ambiente em graus celsius;

Os valores de contorno para cálculo da ampacidade podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Corrente nos barramentos da SE em estudo.

Setor 500 kV	Corrente Nominal (A)	Condição de Sobrecarga (A)
Barramentos principais (B1 e B2)	2271	4000
Barramento superior e dos equipamentos	2059	4000

Fonte: próprio autor.

A elevação do condutor acima do nível do mar é a soma da altitude da SE com a altura do barramento especificado para o cálculo. Para que a equação (3.4), utilizada no cálculo da ampacidade, tenha uma consideração mais severa, o H (elevação do condutor acima do nível do mar, em metros) deve ser a soma da altitude da subestação mais a altura do barramento superior. Já para o cálculo do Efeito Corona, onde utiliza-se a equação (3.18), o A (elevação do condutor acima do nível do mar, em quilômetros) deve ser a soma da altitude mais a altura do barramento de interligação dos equipamentos.

Sendo o barramento composto por dois subcondutores por fase, a contante g é dada conforme a Tabela 7, enquanto que a Tabela 9 apresenta os valores utilizados para as configurações da SE estudada.

Tabela 9 – Dados da subestação.

Parâmetro	valor
distância entre fases (m)	8
Altura mínima do condutor em relação ao solo (m)	8,7
Altura máxima do condutor em relação ao solo (m)	26,0
Quantidade de subcondutores por fase	2
g	1
distância entre os subcondutores (m)	0,457
Elevação do terreno (m)	536
Elevação do condutor acima do nível do mar (H) (m)	563
Elevação do condutor acima do nível do mar (A) (km)	0,546
Temperatura ambiente (°C)	30

Fonte: próprio autor.

3.3.2 Dados do cabo

A configuração existente para o barramento atualmente utilizado na SE em estudo é a de dois cabos ACAR – 2250 MCM – código Manaus, por fase. As características elétricas do condutor serão obtidas de [20, 21] em suas versões mais atualizadas.

- Diâmetro do conduto, mm;
- Seção do condutor, mm²;
- Resistência em corrente alternada de alta temperatura, Ω;
- Resistência em corrente contínua de baixa temperatura, Ω.

Visto que todos os cabos mais utilizados na composição de barramentos são feitos por alumínio, aço ou ambos, para consideração mais severa da equação (3.15), a título de segurança na instalação, todos os cabos utilizados para transporte de energia na em SEs de AT e EAT serão considerados de alumínio grau EC, ou seja, condutores elétricos de alumínio.

A Tabela 10 apresenta os valores para esses parâmetros.

Tabela 10 – Dados do cabo Manaus conforme [20] e [21].

Parâmetro	valor
Diâmetro externo do condutor (mm)	43,89
seção do condutor (mm²)	1137,83
Resistência em corrente alternada de alta temperatura (75°C) (Ω)	0,036
Resistência em corrente contínua de baixa temperatura (20°C) (Ω)	0,02712

Fonte: próprio autor.

3.4 Estudo dos Resultados Encontrados

Após aplicação da metodologia, os resultados serão estudados. Frisando que os critérios de dimensionamento elétrico são condições de contorno onde:

- As correntes encontradas para os valores de ampacidade de temperatura do condutor atuando em operação contínua e curta duração - Tabela 3 - devem ser maiores que os indicados na Tabela 8;
- A corrente de curto-circuito suportada pelo barramento deve ser maior que as apresentadas na Tabela 4, para o respectivo nível de tensão;
- O valor do máximo gradiente admissível deve ser menor que o gradiente máximo de tensão na superfície do condutor e que o valor de Peek.

No estudo dos resultados encontrados deve ser visto se o barramento atende aos três critérios apresentados. Caso não, outra configuração deve ser proposta para que seja feito um novo estudo.

Como foi afirmado, a validação de barramentos em SEs existentes não é simples. Com o tempo as normas tendem a ficar mais conservadoras, o que torna difícil a reutilização do barramento existente para o novo vão a ser ampliado.

A depender da mudança dos cabos e do aumento da quantidade de subcondutores por fase, os esforços aplicados nas estruturas, nos terminais dos equipamentos, a flecha relacionada aos cabos condutores e o peso das cadeias tendem a aumentar. Há também outras grandezas diretamente influenciadas pelos barramentos dentro da subestação, e todas essas variáveis devem ser levadas em conta em uma situação real de projetos.

Entretanto para este estudo de caso, será considerada apenas a aplicação da metodologia de cálculo e de projeto apresentadas, fornecendo uma configuração de barramento que atenda a todos os critérios elétricos de dimensionamento.

4 ESTUDO DE CASO

Inicialmente será estudado o barramento existente na subestação Master Alpha com uma configuração de dois cabos ACAR – 2250 MCM – código Manaus, por fase.

No estudo de caso serão aplicados os três critérios de dimensionamento, a saber: ampacidade (condição normal e contingência), curto-circuito e efeito Corona, nessa respectiva ordem.

Devido a simplicidade das equações apresentadas, se viu suficiência na utilização de tabelas geradas no Excel para realização dos cálculos. Os resultados serão apresentados nas seções a seguir.

4.1 Cabo Manaus

4.1.1 Ampacidade - condição de operação continua

Utilizando as equações (3.2) a (3.10), para perda de calor por convecção, a equação (3.11) para a perda de calor por radiação, a equação (3.13) para o ganho de calor solar e a equação (3.14) para a resistência elétrica do condutor à temperatura desejada. Utilizando ainda as informações encontradas na Tabela 3, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 10, foi feito o cálculo para ampacidade do condutor em condição de operação continua. Esse resultado pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 – Cálculo de ampacidade para dois cabos Manaus em operação continua.

Dados da Instalação	
Condutor	Manaus
Cálculos	
Perda de calor por radiação (q_r)	
q_r (W/m)	38,98
Ganho de calor solar (q_s)	
q_s (W/m)	36,52
Perda de calor por convecção (q_c)	
qc (W/m)	98,44
Resistência elétrica do condutor (R)	
R(Tc) (Ω/km)	0,03400
Resultado	
I (A)	3445,56

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreram as condições necessárias para atendimento do critério de dimensionamento elétrico de capacidade de condução de corrente em condição de operação contínua, onde a ampacidade máxima suportada pelo barramento foi maior que aquela demandada pela SE. O resultado pode ser visto na Tabela 12.Tabela 14

Tabela 12 – Ampacidade para dois cabos Manaus em condição de operação continua.

Condição de operação	Barra principal (B1 e B2)	Barramento superior e dos equipamentos	2 x ACAR - Manaus
Corrente Nominal (A)	2271	2059	3445,56

Fonte: próprio autor.

4.1.2 Ampacidade - condição de operação de curta duração

Utilizando as equações (3.2) a (3.10), para perda de calor por convecção, a equação (3.11) para a perda de calor por radiação, a equação (3.13) para o ganho de calor solar e a equação (3.14) para a resistência elétrica do condutor Utilizando ainda as informações encontradas na Tabela 3, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 10, foi feito o cálculo para ampacidade do condutor em condição de operação de curta duração. Esse resultado pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 – Cálculo de ampacidade para dois cabos Manaus em operação de curta duração.

Dados da Instalação	
Condutor	Manaus
Cálculos	
Perda de calor por radiação (q_r)	
q_r (W/m)	55,84
Ganho de calor solar (q_s)	
q_s (W/m)	36,52
Perda de calor por convecção (q_c)	
qc (W/m)	130,69
Resistência elétrica do condutor (R)	
R(Tc) (Ω/km)	0,03585
Resultado	
I (A)	4090,89

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreram as condições necessárias para atendimento do critério de dimensionamento elétrico de capacidade de condução de corrente em condição de operação de curta duração, onde a ampacidade máxima suportada pelo barramento foi maior que aquela demandada pela SE. Os resultados podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 – Capacidade de condução de corrente dos condutores frente as condições de contorno.

Condição de operação	Barra principal (B1 e B2)	Barramento superior e dos equipamentos	2 x ACAR - Manaus
Condição de Sobrecarga (A)	4000	4000	4090,89

Fonte: próprio autor.

4.1.3 Curto-circuito

Utilizando das equação (3.15), para cálculo da corrente de curto circuito suportada pelo cabo em conjunto com as informações encontradas na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 10, foi feito o cálculo para corrente de curto circuito suportada pelo barramento. Esse resultado pode ser visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Cálculo de curto-circuito para dois cabos Manaus.

Dados da instalação	
Tipo de condutor	Manaus
Corrente suportável de curta duração (I)	
I (kA)	325

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreu a condição necessária para atendimento do critério de dimensionamento elétrico de curto-circuito, onde o barramento apresentou uma corrente de suportabilidade maior que aquela apresentada na Tabela 4. O resultado pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 – Corrente de curto máxima suportada pelos condutores frente as condições de contorno.

Setor 500 kV	2 x ACAR - Manaus
50 kA	325 kA

Fonte: próprio autor.

4.1.4 Efeito Corona

Utilizando as equações (3.16) a (3.18) para cálculo do gradiente máximo admissível e as equação (3.21) e (3.22) para cálculo do gradiente máximo de tensão na superfície do condutor. Utilizando ainda as informações encontradas na Figura 14, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 10, foi feito o cálculo para definir se o barramento possui boa performance frente ao critério de dimensionamento elétrico do efeito corona. Esse resultado pode ser visto na Tabela 17.

Tabela 17 – Desempenho frente ao efeito corona para dois cabos manaus.

Dados da instalação	
Tipo de condutor	Manaus
Gradiente Máximo admissível (fórmula de Peek)	
Ec (kV/cm):	18,32
Gradiente máximo no condutor – dois cabos por fase	
Em (kV/cm):	19,14

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que pelo menos uma das condições necessárias não foi atendida. A configuração do barramento não apresenta boa performance frente ao critério de dimensionamento elétrico do efeito Corona, pois o gradiente máximo de tensão na superfície do condutor apresentou valor maior que o gradiente máximo admissível. O resultado pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18 – Desempenho do barramento frente ao efeito corona.

Gradiente máximo admissível (E_c) (kV/cm)	Gradiente máximo de tensão na superfície do condutor (E_m) (kV/cm)	Valor de Peek (E_0) (kV/cm)
18,32	19,14	21,1

Fonte: próprio autor.

Devido ao não atendimento de pelo menos um dos critérios de dimensionamento, o barramento não pode ser utilizado no novo vão de ampliação da Subestação Master Alpha.

A nova proposta de configuração para estudo é a de quatro cabos CAA 945 MCM – código Rail, por fase. Serão aplicados os critérios de dimensionamento elétrico para a nova configuração de barramento proposta. Os dados do cabo são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Dados do cabo Rail conforme [20] e [21].

Parâmetro	valor
Diâmetro externo do condutor (mm)	29,71
seção do condutor (mm²)	517,39
Resistência em corrente alternada de alta temperatura (75°C) (Ω)	0,0733
Resistência em corrente contínua de baixa temperatura (20°C) (Ω)	0,0597

Fonte: próprio autor.

Os resultados encontrados para a nova configuração são especificados nas seções seguintes:

4.2 Cabo Rail

4.2.1 Ampacidade - condição de operação contínua

Utilizando as equações (3.2) a (3.10), para perda de calor por convecção, a equação (3.11) para a perda de calor por radiação, a equação (3.13) para o ganho de calor solar e a equação (3.14) para a resistência elétrica do condutor à temperatura desejada. Utilizando ainda as informações encontradas na Tabela 3,

Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 19, foi feito o cálculo para ampacidade do condutor em condição de operação continua. Esse resultado pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 20 – Cálculo de ampacidade para quatro cabos Rail em operação continua.

Dados da Instalação	
Condutor	Rail
Cálculos	
Perda de calor por radiação (q_r)	
q_r (W/m)	26,39
Ganho de calor solar (q_s)	
q_s (W/m)	24,72
Perda de calor por convecção (q_c)	
qc (W/m)	78,84
Resistência elétrica do condutor (R)	
R(Tc) (Ω/km)	0,07330
Resultado	
I (A)	4192,02

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreram as condições necessárias para atendimento do critério de dimensionamento elétrico de capacidade de condução de corrente em condição de operação contínua, onde a ampacidade máxima suportada pelo barramento foi maior que aquela demandada pela SE. O resultado pode ser visto na Tabela 21.Tabela 14

Tabela 21 – Ampacidade para quatro cabos Rail em condição de operação continua.

Condição de operação	Barra principal (B1 e B2)	Barramento superior e dos equipamentos	4 x CAA - Rail
Corrente Nominal (A)	2271	2059	4192,02

Fonte: próprio autor.

4.2.2 Ampacidade - condição de operação de curta duração

Utilizando as equações (3.2) a (3.10), para perda de calor por convecção, a equação (3.11) para a perda de calor por radiação, a equação (3.13) para o ganho de calor solar e a equação (3.14) para a resistência elétrica do condutor Utilizando ainda as informações encontradas na Tabela 3, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 19, foi feito o cálculo para ampacidade do condutor em condição de operação de curta duração. Esse resultado pode ser visto na Tabela 24.

Tabela 22 – Cálculo de ampacidade para quatro cabos Rail em operação de curta duração.

Dados da Instalação	
Condutor	Rail
Cálculos	
Perda de calor por radiação (q_r)	
q_r (W/m)	37,80
Ganho de calor solar (q_s)	
q_s (W/m)	24,72
Perda de calor por convecção (q_c)	
qc (W/m)	105,03
Resistência elétrica do condutor (R)	
R(Tc) (Ω/km)	0,07701
Resultado	
I (A)	4953,69

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreram as condições necessárias para atendimento do critério de dimensionamento elétrico de capacidade de condução de corrente em condição de operação contínua, onde a ampacidade máxima suportada pelo barramento foi maior que aquela demandada pela SE. O resultado pode ser visto na Tabela 23.Tabela 14

Tabela 23 – Cálculo de ampacidade para quatro cabos Rail em operação de curta duração.

Condição de operação	Barra principal (B1 e B2)	Barramento superior e dos equipamentos	4 x CAA - Rail
Condição de Sobrecarga (A)	4000	4000	4953,69

Fonte: próprio autor.

4.2.3 Curto-circuito

Utilizando das equação (3.15), para cálculo da corrente de curto circuito suportada pelo cabo em conjunto com as informações encontradas na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 19, foi feito o cálculo para corrente de curto circuito suportada pelo barramento. Esse resultado pode ser visto na Tabela 24.

Tabela 24 – Cálculo de curto-circuito para quatro cabos Rail.

Dados da instalação	
Tipo de condutor	Rail
Corrente suportável de curta duração (I)	
I (kA)	295

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreu a condição necessária para atendimento do critério de dimensionamento elétrico de curto-circuito, onde o barramento apresentou uma corrente de suportabilidade maior que aquela apresentada na Tabela 4. O resultado pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25 –Corrente de curto máxima suportada pelos condutores frente as condições de contorno.

Setor 500 kV	4 x CAA - Rail
50 kA	295 kA

Fonte: próprio autor.

4.2.4 Efeito Corona

Utilizando as equações (3.16) a (3.18) para cálculo do gradiente máximo admissível e as equação (3.21) e (3.22) para cálculo do gradiente máximo de tensão na superfície do condutor. Utilizando ainda as informações encontradas na Figura 14, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e na Tabela 19, foi feito o cálculo para definir se o barramento possui boa performance frente ao critério de dimensionamento elétrico do efeito corona. Esse resultado pode ser visto na Tabela 26.

Tabela 26 – Desempenho frente ao efeito corona para quatro cabos Rail.

Dados da instalação	
Tipo de condutor	Rail
Gradiente Máximo admissível (fórmula de Peek)	
Ec (kV/cm):	17,81
Gradiente máximo no condutor – quatro cabos por fase	
Em (kV/cm):	17,67

Fonte: próprio autor.

Após aplicação dos cálculos, pode-se notar que ocorreu as condições necessárias para boa performance do barramento frente ao critério de dimensionamento elétrico do efeito Corona, onde o gradiente máximo de tensão na superfície do condutor é menor que ambos os valores encontrados para o gradiente máximo admissível e o valor de Peek. O resultado pode ser visto na Tabela 27.

Tabela 27 – Desempenho do barramento frente ao efeito corona.

Gradiente máximo admissível (E_c) (kV/cm)	Gradiente máximo de tensão na superfície do condutor (E_m) (kV/cm)	Valor de Peek (E_0) (kV/cm)
17,81	17,67	21,1

Fonte: próprio autor.

Pode ser concluído que a nova configuração atende aos três critérios de dimensionamento, logo um barramento composto por quatro cabos CAA – 954 MCM – código Rail, por fase, é uma configuração que pode ser utilizada na ampliação da subestação em estudo.

Caso essa configuração também não atendesse algum dos critérios de dimensionamento elétrico, um novo formato deveria ser proposto para o barramento. Vale salientar ainda que essa não é a única configuração que atende a todos os critérios de dimensionamento relativos a Subestação Master Alpha, entretanto a solução proposta foi considerada conclusiva dentro do empreendimento em questão.

5 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho teve como objetivo o dimensionamento de barramentos em subestações de alta e extra alta tensão utilizando fundamentação teórica em uma abordagem real de projetos. O estudo de caso foi aplicado a subestação Master Alpha, localizada no estado da Paraíba, pertencente a rede básica do Sistema Interligado Nacional.

Todo o arcabouço teórico necessário foi apresentado para que nos cálculos realizadas houvesse demonstração de como escolher o barramento frente aos critérios de dimensionamento elétrico em comparação a condições de contorno.

No decorrer do estudo de caso, um dos critérios de dimensionamento não foi atendido, onde o barramento atualmente utilizado na subestação não apresentou adequada performance frente ao Efeito Corona. A solução proposta, para a subestação estudada, foi a mudança da configuração do barramento para ser utilizado no novo vão de ampliação. Com a nova configuração proposta, os três critérios de dimensionamento: Capacidade de Condução de Corrente, Curto-circuito e Efeito Corona foram plenamente atendidos, logo possibilitando a utilização dessa nova configuração de barramento para o vão em ampliação.

Vale ressaltar que nem sempre, em subestações existentes, pode ser reutilizada a configuração atual do barramento, devido a novos estudos que alterem formulas ou constantes/equações empíricas conforme novas revisões de normas são apresentadas.

Como sugestões para trabalhos futuros, para uma maior abrangência no tema, é recomendado escolha de subestações que possuam barramentos rígidos para que essa metodologia seja demonstrada e aplicada.

Também é recomendado estudo das implicações na subestação existente frente a troca da configuração do barramento, tais como esforços em estruturas e terminais de equipamentos existentes devido a flecha e a esforços de curto-circuito, peso e vento dos novos cabos condutores.

O barramento é responsável pelo fluxo de corrente que percorre os equipamentos. Por ser um componente crucial dentro das subestações é importante que seu dimensionamento traga confiabilidade e segurança para o sistema.

REFERÊNCIAS

[1] “BICHELS, Arlei. Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução. Curitiba: Editora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.”.

[2] “ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. Fundamentos de sistemas elétricos de potência. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.”.

[3] MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe. Introdução à subestação e seus principais equipamentos. 1. ed. São José dos Pinhais: Seven Publicações, 2023..

[4] “MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe; MIRANDA, Jullia Mercedes. Arranjo de subestação: um estudo de revisão bibliográfica. Research, Society and Development, v. 10, n. 14, e287101421805, 2021.”.

[5] MAMEDE FILHO, João. Subestações d.e alta tensão. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021..

[6] “ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. Fundamentos de sistemas elétricos de potência. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.”.

[7] “MCDONALD, John D. (ed.). Electric Power Substations Engineering. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 784 p. (The Electric Power Engineering Handbook)”.

[8] “FRONTIN, Sergio de Oliveira (Org.). Equipamentos de alta tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013.,” [Online].

[9] “SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN, ET AL. Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. Brasília: Goya Editora, 2013.”.

[10] “FARIA, Hélder Jorge Duarte. Cálculo de barramentos em subestações. 2009. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009”.

[11] “PAULA, João José Alves de. Cabos elétricos de potência: dimensionamento. São Paulo: Blucher, 2023.”.

[12] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986). New York: IEEE, 2000.

[13] “ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. Procedimentos de Rede – Módulo 2: Critérios e Requisitos. Revisão 2022.08. Vigência a partir de 16 ago. 2022. Disponível em: http://www.on”.

[14] “EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS); CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). EPE, ONS e CCEE divulgam previsão de carga para o PLAN 2025-2029. Brasília, DF: EPE, 3 dez. 2024. Disponível em: https,” [Online].

[15] “CAMPOS, Luís Filipe Gonçalves de; ESTEVAM, Giuliano Pierre. A atuação das subestações no sistema elétrico de potência. Revista eSALENG – Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO, Araçatuba, v. 9, n. 1, p. 130-141, 2020.”.

[16] “ENGIE. Guia de subestações de energia. [S. l.]: ENGIE Brasil, 2022.”.

[17] “PAULO, L. R. et al. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão. 2ª. ed.,”

[Online].

[18] “KOCH, Hermann J. (Ed.). Gas insulated substations. 2. ed. Hoboken: IEEE Press; Wiley, 2022.”.

[19] “ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 102 p.”.

[20] “NEXANS. Aluminium cables – OHL AWG. São Paulo: Nexans Brasil, [s.d.]. Disponível em: https://www.nexans.com.br/pt/products/Transmission.and.Distribution/OHL.AWG.html. Acesso em: 5 jul. 2025.,” [Online].

[21] “ALUBAR CABOS ELÉTRICOS. Catálogo técnico: condutores elétricos de alumínio. Barcarena: Alubar Metais e Cabos, 2015.,” [Online].

[22] “LACERDA, Ana Karollina Soares; FRAGA, Fábio Nepomuceno. Projetos de barramentos aéreos: uma comparação entre barramentos rígidos e flexíveis para subestações 230 kV da Rede Básica. Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão – GSE, [S.l.]”.

[23] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations. IEEE Std 605-2008 (Revision of IEEE Std 605-1998). New York: IEEE, 2010.

[24] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE Std 738™-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006). New York: IEEE, 2013..

[25] COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. Especificação Técnica: Projetos Eletromecânicos de Subestações. 301-CHESF-ET-PJ-EM. Recife: CHESF, ago. 2022.

[26] NASCIMENTO, C. A. M.; CASTRO, A. C.; PAULINO, A. S.; MATOSO, H. M.; JUNIOR, M. D. G.; MARIANO, S. L. S.; FERBER, M.; FRANÇA, G. A. C.; VASCONCELOS, J. A. Controle e monitoramento de temperatura de condutores em linhas aéreas de alta tensão. Belo Horizonte.

[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 62271-1:2020 — Manobra e comando de alta tensão — Parte 1: Especificações comuns para equipamentos de manobra e comando em corrente alternada. Rio de Janeiro: ABNT, 2020..

[28] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62271-1: High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications. Geneva: IEC, 2007..

[29] “GOUVEIA, Rosimar. Convecção térmica: fundamentos, exemplos e aplicações práticas. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: https://www.todamateria.com.br/conveccao-termica/. Acesso em: 29 maio 2025,” [Online].

[30] “WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.,” [Online].

[31] “ASTH, Rafael C. Irradiação térmica: o que é, como ocorre, exemplos. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: https://www.todamateria.com.br/irradiacao-termica/. Acesso em: 08 jul. 2025.,” [Online].

[32] “STEVENSON JUNIOR, William D. Elementos de análise de sistemas de potência. 2.

ed. em português. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. Tradução e revisão técnica: Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansuj.”.