



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

ALICE MILET DO AMARAL MERCÊS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE UM PROJETO DE UMA SUBESTAÇÃO: FOCO NA
IMPORTÂNCIA E ENTENDIMENTO DO DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS
ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO DE UMA SUBESTAÇÃO DE 138/34,5KV**

Recife
2025

ALICE MILET DO AMARAL MERCÊS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE UM PROJETO DE UMA SUBESTAÇÃO: FOCO NA
IMPORTÂNCIA E ENTENDIMENTO DO DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS
ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO DE UMA SUBESTAÇÃO DE 138/34,5KV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

Recife
2025

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

Mercês, Alice Milet do Amaral.

Análise do processo de um projeto de uma subestação: foco na importância e entendimento do dimensionamento de barramentos através de um estudo de caso de uma subestação de 138/34,5kV / Alice Milet do Amaral Mercês. - Recife, 2025.

55p. : il., tab.

Orientador(a): Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. projeto. 2. subestação. 3. dimensionamento. 4. barramento. I. Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ALICE MILET DO AMARAL MERCÊS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE UM PROJETO DE UMA SUBESTAÇÃO: FOCO NA
IMPORTÂNCIA E ENTENDIMENTO DO DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS
ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO DE UMA SUBESTAÇÃO DE 138/34,5KV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 15/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Davidson da Costa Marques (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jeydson Lopes da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus, pois sem ele nada disso seria possível. Ele que, entre tantas dificuldades nessa trajetória, me deu a força e o discernimento necessário para que eu pudesse prosseguir da melhor forma no curso e adquirir cada vez mais conhecimento, resiliência e perseverança, moldando cada vez mais a profissional que quero me tornar.

Agradecer também a todos que, de alguma forma, cruzaram meu caminho nessa jornada e me somaram de forma significativa para que eu me desenvolvesse mentalmente e espiritualmente. E reconhecer todo apoio que tive da minha família e amigos.

Aos meus pais, Antônio Manoel do Amaral Mercês e Lucinda Milet do Amaral Mercês, toda gratidão do mundo por toda educação que me foi dada, permitindo meu ingresso nessa universidade tão prestigiada. Um agradecimento especial ao meu namorado, Raphael Aguiar Gouveia, que acompanhou o final do meu curso de perto sempre me incentivando e apoiando minha evolução.

E, por último, gostaria de agradecer ao Prof. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino que aceitou me orientar nesse trabalho de conclusão de curso, mesmo tendo uma agenda bastante corrida e ao meu chefe do estágio, Heitor Vilela, por todo conhecimento passado a mim, além da confiança e oportunidade de ter me colocar nesse projeto que foi tema deste trabalho de conclusão.

RESUMO

As subestações de energia elétrica são compostas por equipamentos que irão, em conjunto, transmitir, distribuir e transformar a tensão e corrente de modo que se adeque a energia elétrica necessária para um objetivo final, com um alto grau de continuidade e confiabilidade.

Para que isso aconteça, se tem a necessidade de uma coleta de dados da concessionária local para que se possa ser feito o projeto elétrico da subestação.

O trabalho desenvolvido tem o intuito de mostrar, brevemente, a elaboração de um projeto de uma subestação, dando ênfase no dimensionamento dos barramentos, além de provar, através de um estudo de caso de uma subestação de 138-34,5kV, o tema enfatizado.

O presente dimensionamento tem como referência o método disponibilizado pela IEEE 605 - *Guide for Bus Design in Air Insulated Substations*, amplamente utilizado no Brasil para o dimensionamento de barramentos para as subestações da rede básica.

Palavras-chave: projeto; subestação; dimensionamento; barramento.

ABSTRACT

Electrical substations are comprised of equipment that collectively transmit, distribute, and transform voltage and current to meet the electrical energy needs of a specific purpose, with a high degree of continuity and reliability.

For this to happen, local supply data must be collected so that the substation's electrical design can be developed.

This work aims to briefly demonstrate the development of a substation design, emphasizing busbar sizing. It also demonstrates the underlying theme through a case study of a 138-34.5kV substation.

This sizing is based on the method provided by IEEE 605 - Guide for Bus Design in Air-Insulated Substations, widely used in Brazil for sizing busbars for basic grid substations.

Keywords: design; substation; sizing; busbar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma lógico de dimensionamento do condutor.	27
Figura 2 – Densidade relativa do ar x altura do nível do mar.	30
Figura 3 – Planta baixa geral da SE Antas Norte.	45
Figura 4 – Corte do setor de 138 kV da SE Antas Norte.	46
Figura 5 – Fator psi para máxima tensão durante curto-circuito.	53
Figura 6 – Valor da variável V2 em função de V1 e K.	53
Figura 7 – Relação entre V3 e a razão As/Ds.	54
Figura 8 – Valor de Psi em relação a J e Est.	54
Figura 9 – Valor de N em função de J , Est e As/Ds.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes B1 e η em função de Re e Rf.	31
Tabela 2 – Valores da Constante Cth no SI.	37
Tabela 3 – Dados do condutor contemplado.	47
Tabela 4 – Resultados obtidos referentes à ampacidade de um condutor CAA Linnet 336 MCM.	47
Tabela 5 – Dados gerais da subestação Antas do Norte.	48
Tabela 6 – Resultados para os esforços mecânicos de um curto-circuito de 10kA no barramento com um condutor Linnet 336 MCM por fase.	49
Tabela 7 – Resultados para o barramento simples do setor de 138kV.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

F^1	Força eletromagnética
I_{k3}	Curto-circuito trifásico simétrico
I_c	Distância entre isoladores
l	Comprimento do vão
a	Distância entre fases
F_g	Força gravitacional
n	Número de condutores
m	Massa específica do condutor
g	Gravidade (9,81m/s ²)
d	Comprimento da flecha
δk	Direção da força resultante
T	Período de oscilação do condutor
T_{res}	Período de oscilação do condutor durante o curto-circuito
δk	Balanço entre cabos
T_{k1}	Período de oscilação do condutor durante curto-circuito
δm	Máximo ângulo de balanço
T_{k1}	Período de oscilação do condutor durante curto-circuito
δm	Máximo ângulo de balanço
N	Flexibilidade normal do sistema
K_{eq}	Rigidez equivalente
K_c	Rigidez axial do vão
E_s	Módulo de Young do Alumínio
A_s	Secção do condutor
S	Valor constante 10 ⁵ n/m
z	Fator de Stress
$\emptyset$	Parâmetro de carga
Ψ	Fator de carga
F_t	Máxima tensão mecânica durante curto-circuito
F_f	Máxima tensão mecânica após curto-circuito
E_{elas}	Deformação elástica
C_{th}	Constante do material
CD	Incrementação elástica
CF	Incrementação térmica
a_{min}	Distância mínima entre fases

B_h	Deslocamento relativo dos condutores
F_V	Força da corrente de curto-circuito
f	Frequência do sistema
k	Fator da corrente de pico
E_{st}	Deformação elástica pela tensão mecânica
E_{pi}	Deformação elástica pelo efeito pincelada
F_{pi}	Tensão mecânica exercida pelo efeito pincelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	GERAL	15
2.2	ESPECÍFICOS.....	15
3	SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO: FUNÇÃO, PROJETO E DIRETRIZES REGULATÓRIAS.....	16
3.1	FUNÇÃO ESTRATÉGICA E CRITÉRIOS TÉCNICOS DE PROJETO	16
3.2	ASPECTOS ECONÔMICOS E REGULATÓRIOS.....	19
3.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE ESFORÇOS MECÂNICOS EM BARRAMENTOS.....	20
3.4	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS EMPREGADOS EM BARRAMENTOS.....	21
3.5	CONFIGURAÇÕES DE BARRAMENTOS: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES	23
3.5.1	Condutores flexíveis	24
3.5.2	Dimensionamento de barramentos flexíveis.....	26
3.5.3	Ampacidade.....	27
3.5.4	Esforços mecânicos durante a após curto-circuito	31
3.5.5	Efeito corona	40
3.5.5.1	<i>Análise Comparativa entre Arranjos de Barramentos.....</i>	<i>42</i>
3.5.6	Barramentos em Subestações de Alta Tensão	43
4	ESTUDO DE CASO – SUBESTAÇÃO ANTAS NORTE 138/34,5KV	45
5	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	ANEXOS - GRÁFICOS DE APOIO PARA O GUIA DE DIMENSIONAMENTO.....	53

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, associada à necessidade de confiabilidade e segurança operacional, exige que as infraestruturas do sistema elétrico de potência sejam projetadas com elevado rigor técnico. Dentro desse contexto, as subestações exercem um papel fundamental ao interligar diferentes níveis de tensão e permitir a conexão entre fontes geradoras, centros de carga e sistemas de transmissão e distribuição.

A regulação do setor elétrico brasileiro, conduzida pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), define responsabilidades quanto às instalações e reforços de redes de transmissão, incluindo os barramentos das subestações. Em especial, as regras de conexão estabelecem critérios técnicos que visam garantir a segurança e a eficiência dessas estruturas. Embora a norma brasileira NBR 5356 trate de aspectos gerais relacionados ao projeto de subestações de alta tensão, ela não fornece diretrizes detalhadas para o dimensionamento térmico e mecânico dos barramentos. Do mesmo modo, outras diretrizes existentes, como a NBR 14039, aplicam-se principalmente à média tensão, deixando os profissionais sem referência específica e abrangente para aplicações em alta tensão. Esse cenário leva os projetistas a adotarem referências internacionais, como as normas IEEE Std 605 e IEEE Std 738, amplamente reconhecidas e utilizadas. A ausência de normatização nacional específica, aliada à crescente demanda por projetos robustos e eficientes, reforça a necessidade de disseminação de métodos de cálculo confiáveis, consistentes e adaptáveis à realidade brasileira.

Nesse contexto, diversos trabalhos acadêmicos têm buscado suprir essa lacuna. Estudos como "Metodologia para dimensionamento elétrico de barramentos em subestações de alta tensão isoladas a ar" (Borges et al., 2024), disponível no repositório da CAPES, demonstram a atualidade e relevância do tema, indicando a necessidade de consolidação de boas práticas nacionais no dimensionamento de barramentos.

Diante disso, o presente trabalho busca apresentar e aplicar um roteiro técnico para o dimensionamento térmico e mecânico de barramentos elétricos, com base em critérios normativos internacionais, por meio de um estudo de caso aplicado à uma

Subestação de 138/34,5 kV. A abordagem adotada visa não apenas validar a metodologia sob condições realistas de projeto, mas também contribuir para o desenvolvimento de referências técnicas aplicáveis ao contexto brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver e aplicar critérios técnicos baseados em normas internacionais para o dimensionamento térmico e mecânico de barramentos rígidos em subestações de alta tensão, com base em uma aplicação real de projeto, visando validar sua consistência prática e contribuir com a adoção de procedimentos padronizados no setor elétrico brasileiro.

2.2 Específicos

- Levantar os principais conceitos técnicos relacionados aos barramentos utilizados em subestações de alta tensão, incluindo aspectos construtivos, operacionais e funcionais;
- Apresentar os fundamentos normativos aplicáveis ao dimensionamento térmico e mecânico de barramentos, com ênfase nas normas IEEE Std 605 e IEEE Std 738;
- Estabelecer um procedimento de cálculo para a definição da seção dos barramentos com base nos critérios térmicos e nas forças eletromecânicas atuantes;
- Aplicar o procedimento a um projeto real de subestação de alta tensão, determinando os parâmetros dimensionais do barramento;
- Avaliar a adequação dos resultados obtidos de acordo com as exigências técnicas e operacionais, destacando os principais fatores de influência no processo de dimensionamento.

3 SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO: FUNÇÃO, PROJETO E DIRETRIZES REGULATÓRIAS

Para embasar de forma sólida o desenvolvimento de projetos de subestações de alta tensão, é necessário compreender não apenas os componentes físicos e funcionais dessas instalações, mas também os critérios técnicos e regulatórios que orientam suas decisões de engenharia. A diversidade de arranjos possíveis e a complexidade técnica envolvida nesse tipo de projeto exigem uma análise cuidadosa sobre o comportamento dos barramentos, a confiabilidade sob diferentes contingências, a flexibilidade operacional e as condições de manutenção.

Embora diferentes configurações atendam a funções semelhantes, tais como permitir manobras e conectar circuitos e garantir a continuidade do fornecimento, elas variam significativamente quanto à capacidade de suportar falhas, facilitar intervenções programadas e acomodar futuras expansões. Portanto, o estudo de tais alternativas não deve se restringir apenas à análise do custo inicial, mas considerar uma abordagem integrada, que envolva aspectos técnicos, operacionais, normativos e econômicos.

Além disso, é essencial compreender o papel das exigências regulatórias, como aquelas impostas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), que frequentemente determinam arranjos mínimos, índices de confiabilidade e critérios de expansão compatíveis com o planejamento da rede elétrica nacional. Assim, a presente seção se dedica a apresentar uma fundamentação técnico-científica sobre os principais tópicos que norteiam o projeto de subestações, com ênfase nos arranjos de barramentos e nos critérios que justificam sua escolha em função das exigências do sistema elétrico moderno.

3.1 Função estratégica e critérios técnicos de projeto

As subestações desempenham uma função estratégica no Sistema Elétrico de Potência (SEP), operando como pontos de conexão entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição. Elas têm como função primária a transformação dos níveis de tensão, viabilizando a integração técnica e econômica entre os diversos segmentos do sistema elétrico, e assegurando o fornecimento confiável de energia aos centros

de carga. Além da transformação de tensão, as subestações também concentram funções de proteção, controle, medição e manobra, o que as torna componentes centrais para a operação segura e flexível do sistema elétrico como um todo (MAMEDE, 2021).

A escolha adequada da configuração física, elétrica e operacional de uma subestação impacta diretamente a confiabilidade, a flexibilidade de operação, a facilidade de manutenção e os custos de implementação e expansão. A norma brasileira NBR 5460 (ABNT, 1992) define a subestação como uma instalação centralizada que agrega condutores, equipamentos de manobra, transformação, proteção e controle, além das estruturas civis necessárias à sua operação. Essa norma ainda propõe classificações por função — como abaixadora, elevadora, de manobra ou conversora — e por tipo construtivo — como ao tempo, abrigada, blindada e móvel. Tais classificações ajudam a orientar as escolhas de projeto conforme as restrições técnicas, operacionais e espaciais do empreendimento.

Em complemento a essa definição normativa, as subestações podem ser ainda classificadas de acordo com a função que desempenham nos sistemas de potência:

- Subestação de manobra: realiza seccionamento de circuitos e redistribuição da carga, sem transformar os níveis de tensão (MAMEDE, 2021);
- Subestação abaixadora: transforma a tensão de um nível mais elevado para um mais baixo (MAMEDE, 2021);
- Subestação elevadora: eleva a tensão de um nível mais baixo para um mais alto (MAMEDE, 2021);
- Subestação conversora: promove a conversão entre corrente alternada e corrente contínua ou vice-versa (MAMEDE, 2021).

Além da função exercida no sistema, o tipo construtivo é outro critério fundamental na caracterização das subestações:

- Ao tempo: equipamentos instalados ao ar livre, diretamente expostos (MAMEDE, 2021);
- Abrigadas: equipamentos instalados em galpões ou salas técnicas (MAMEDE, 2021);

- Blindadas: subestações modulares e compactas, geralmente em invólucros metálicos aterrados (MAMEDE, 2021);
- Móveis: montadas sobre reboques ou contêineres, para instalações temporárias ou emergenciais (MAMEDE, 2021).

A escolha entre os tipos construtivos deve considerar aspectos como disponibilidade de espaço, custo de implementação, facilidade de expansão futura, condições ambientais e requisitos de segurança. Em subestações de grande porte, é comum o uso de instalações ao tempo devido à necessidade de espaço físico amplo e maior facilidade para ampliação e manutenção. Já em áreas urbanas adensadas ou ambientes industriais agressivos, opta-se por subestações abrigadas ou blindadas. As subestações móveis são indicadas para situações de emergência, manutenção programada ou atendimento provisório a cargas (MAMEDE, 2021).

Com o avanço das tecnologias e da automação, atualmente, independentemente do tipo construtivo, a maioria das subestações de alta tensão conta com operação remota por meio de sistemas supervisórios digitais. A presença física de operadores é cada vez menos comum, sendo reservada a situações de comissionamento, inspeção e manutenção corretiva. Nesse cenário, o arranjo da subestação deve ser concebido considerando não apenas sua operação em condições normais, mas também sua resposta a contingências e sua capacidade de manutenção sob condições energizadas (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).

A correta classificação funcional e construtiva de uma subestação é essencial para que o projeto atenda aos requisitos técnicos e normativos, ao mesmo tempo em que oferece a melhor relação custo-benefício diante das condições específicas da aplicação considerada (MAMEDE, 2021). Esses fundamentos constituem a base conceitual para a análise técnico-econômica dos diferentes arranjos de subestações, especialmente no que diz respeito à escolha dos barramentos. Na próxima subseção, serão discutidos os aspectos econômicos e regulatórios que influenciam diretamente o dimensionamento, a seleção de configurações e os investimentos em projetos de subestações.

3.2 Aspectos econômicos e regulatórios

O desenvolvimento e a implantação de subestações de alta tensão estão fortemente condicionados a aspectos econômicos e regulatórios, que impactam desde a concepção do projeto até sua operação contínua. A decisão por determinada configuração de barramento, por exemplo, não depende apenas de critérios técnicos, mas também de fatores como custo de implementação, disponibilidade orçamentária, política de investimentos e exigências estabelecidas por órgãos reguladores (MONTEIRO; MIRANDA, 2021).

Do ponto de vista econômico, os arranjos com maior complexidade, como barra com disjuntor e meio ou barra dupla com duplos disjuntores, geralmente implicam em custos iniciais mais elevados devido à necessidade de maior número de equipamentos e maior área física. No entanto, essas configurações podem oferecer benefícios operacionais, como maior confiabilidade, redundância e menor tempo de indisponibilidade durante manutenções. Assim, a análise de viabilidade econômica deve considerar não apenas o investimento inicial, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo do ciclo de vida da subestação (FRONTIN; JARDINI; GABAGLIA, 2013).

Sob a ótica regulatória, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece diretrizes para o planejamento e a expansão dos sistemas elétricos, incluindo critérios de qualidade, continuidade e confiabilidade no suprimento de energia elétrica. A Resolução Normativa nº 901/2020, por exemplo, estabelece os Procedimentos de Rede, que devem ser seguidos pelas empresas de transmissão e distribuição em projetos de novas subestações ou ampliações. Esses procedimentos impactam diretamente o projeto elétrico e físico das subestações, influenciando na escolha de arranjos e na configuração de equipamentos (ANEEL, 2020). Além disso, o setor elétrico brasileiro adota o modelo de tarifa regulada e incentiva investimentos com base na remuneração da base de ativos. Assim, projetos que representem maior confiabilidade e disponibilidade podem ser favorecidos em análises regulatórias, desde que justificados tecnicamente e compatíveis com o planejamento da expansão do sistema (OLIVEIRA; LIMA; CAMPOS, 2019).

Portanto, a escolha do arranjo de barramentos mais adequado a uma subestação envolve um equilíbrio entre desempenho técnico, exigências normativas

e viabilidade econômica, sendo imprescindível que o projeto esteja alinhado às diretrizes dos órgãos reguladores e às políticas de investimento da concessionária responsável.

3.3 Considerações sobre Esforços Mecânicos em Barramentos

Durante a ocorrência de faltas em sistemas elétricos, como os curtos-circuitos, surgem correntes de elevadas magnitudes que podem causar esforços mecânicos significativos nos condutores e suportes dos barramentos. Esses esforços devem ser devidamente considerados no projeto das subestações, especialmente nos componentes de conexão, barramentos e estruturas de suporte, a fim de garantir a integridade física e operacional do sistema mesmo sob condições extremas.

Os esforços mecânicos atuam, principalmente, de duas formas sobre os barramentos: forças de repulsão entre condutores paralelos percorridos por correntes de sentido contrário e forças de atração entre condutores com correntes de mesmo sentido. A intensidade dessas forças depende diretamente da magnitude da corrente de falta e da distância entre os condutores, conforme descrito por Monteiro e Miranda (2021). O cálculo desses esforços é essencial para garantir que os espaçadores, isoladores e suportes tenham resistência mecânica adequada para suportar os esforços dinâmicos resultantes. A equação que representa essa força eletrodinâmica entre condutores paralelos é apresentada a seguir:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{I_{k3}^2 l_c}{a l} \quad (1.1)$$

Onde, no sistema internacional de unidades (SI):

μ_0 – Permeabilidade magnética dada por $1.257 \cdot 10^{-6} \text{ V.s/A.m}$;

I_{k3}^2 – Valor RMS do curto – circuito trifásico simétrico (A)no condutor;

a – Distância entre os pontos médios centrais dos condutores;

l – Vão do condutor, em metros;

l_c – Distância entre os dois suportes, em metros.

Em subestações de alta tensão, onde os barramentos podem ter grandes vãos livres e suportar correntes elevadas, o dimensionamento mecânico dos condutores e de suas estruturas de fixação é particularmente crítico. Além das forças instantâneas durante a falta, deve-se considerar também os esforços térmicos de curta duração, decorrentes do aquecimento repentino dos condutores, o que pode causar dilatações e solicitações adicionais sobre os apoios (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).

A NBR 5356 (ABNT, 1997), que trata do projeto mecânico de instalações elétricas, estabelece critérios para o cálculo das forças eletrodinâmicas e recomenda o uso de coeficientes de segurança apropriados para suportar os esforços provocados por curtos-circuitos. Esses parâmetros devem ser aplicados tanto no dimensionamento de condutores nus como nas estruturas metálicas de suporte, considerando a rigidez, deformações admissíveis e efeitos dinâmicos transitórios. A referida norma estabelece os critérios e as formulações matemáticas para esse dimensionamento, que devem ser aplicados para garantir a rigidez e a segurança dos componentes.

Ignorar os esforços eletromecânicos em barramentos pode comprometer a estabilidade estrutural da subestação, acarretando falhas em suportes, colapsos de barramentos e danos em equipamentos conectados. Por esse motivo, os estudos de curto-circuito devem estar integrados ao processo de projeto mecânico das subestações, garantindo que todos os componentes sejam especificados com base nos níveis máximos de corrente presumida e nos esforços a que estarão submetidos em caso de falha. Portanto, o conhecimento dos esforços mecânicos e térmicos associados a condições de curto-circuito é imprescindível para o projeto seguro e eficiente de barramentos em subestações. Essa abordagem multidisciplinar, que alia engenharia elétrica e engenharia estrutural, assegura a robustez do sistema frente a eventos extremos, contribuindo para a continuidade do fornecimento de energia e para a proteção dos ativos da instalação.

3.4 Características dos Materiais Empregados em Barramentos

A seleção adequada dos materiais empregados em barramentos é fator determinante para a eficiência, segurança e durabilidade das instalações em subestações de alta tensão. Os principais materiais utilizados são o alumínio e o

cobre, que apresentam boas propriedades elétricas e mecânicas, além de elevada resistência à corrosão quando empregados com os tratamentos superficiais corretos.

O alumínio é amplamente empregado devido ao seu baixo peso específico, o que facilita o manuseio e a instalação dos barramentos. Apesar de possuir condutividade elétrica inferior à do cobre, seu menor custo e densidade favorecem seu uso em grandes vãos e estruturas suspensas. Além disso, apresenta boa resistência à corrosão quando anodizado, o que o torna adequado para ambientes externos e agressivos. O cobre, por sua vez, apresenta elevada condutividade elétrica, sendo especialmente recomendado para aplicações em que há limitação de espaço físico ou necessidade de elevada eficiência de condução elétrica. Entretanto, seu peso elevado e maior custo restringem seu uso a aplicações específicas, como barramentos em painéis ou em ambientes abrigados com restrições dimensionais. As características térmicas dos materiais também devem ser consideradas. Tanto o alumínio quanto o cobre suportam variações térmicas significativas, porém apresentam diferentes coeficientes de dilatação térmica. Esse fator influencia diretamente no dimensionamento de suportes, espaçadores e conexões, especialmente em barramentos com grandes extensões. O projeto deve prever folgas de dilatação e suportes deslizantes para absorver esses efeitos, evitando esforços mecânicos excessivos sobre os componentes estruturais e elétricos.

Outro aspecto relevante é a compatibilidade eletroquímica entre materiais. A conexão entre condutores de materiais diferentes, como alumínio e cobre, pode causar efeitos de corrosão galvânica se não forem utilizados elementos de interface adequados, como conectores bimetálicos ou graxas anticorrosivas. A norma NBR 16384 (ABNT, 2015) estabelece critérios para a escolha dos materiais e para a execução de conexões elétricas seguras em sistemas de potência.

Além das propriedades elétricas e mecânicas, a facilidade de manutenção, a disponibilidade no mercado e o histórico de desempenho em campo também devem ser considerados na escolha dos materiais dos barramentos. Dessa forma, o projeto deve equilibrar aspectos técnicos e econômicos, de modo a garantir a confiabilidade da instalação ao longo de sua vida útil, minimizando falhas por fadiga mecânica, aquecimento excessivo ou corrosão prematura.

3.5 Configurações de Barramentos: Características e Aplicações

Os arranjos de barramentos em subestações são concebidos para atender simultaneamente critérios de segurança, confiabilidade, flexibilidade operacional e viabilidade econômica. A seleção do tipo de configuração a ser adotada depende diretamente da função da subestação no sistema elétrico, do nível de tensão envolvido, da importância da instalação e das exigências operacionais e de manutenção previstas no ciclo de vida do empreendimento.

Entende-se por barramento de uma subestação um conjunto de condutores de cobre ou alumínio ao qual se conectam tanto os circuitos de entrada injetando potência na subestação, como os circuitos que ecoam essa potência no sentido da carga [1]. Os barramentos podem ser classificados como a seguir:

- Barramentos flexíveis: São constituídos de cabos, normalmente de alumínio, com capacidade definida pela corrente nominal do circuito, pela transferência de calor, pelos esforços mecânicos de tração etc. São normalmente utilizados em sistema de potência, subestações com tensão igual ou inferior a 230 kV.
- Barramentos rígidos nus: São constituídos de barras retangulares de cobre, normalmente utilizadas em cubículos de baixa e média tensões, de barras circulares de cobre, normalmente utilizadas em barramento de subestações de média tensão, e de tubos de alumínio, normalmente utilizados em subestações de alta tensão.
- Barramentos rígidos isolados: Os barramentos rígidos isolados são constituídos de barras circulares, normalmente de cobre, com nível de isolamento adequado às necessidades do projeto, o qual, para atender a várias situações a serem solucionadas por barramentos convencionais ou pela utilização de cabos isolados, seria extremamente complicado e oneroso. Uma das principais funções dos barramentos rígidos isolados é permitir a redução das distâncias entre fases. Também podem ser utilizados em ambientes fechados e abertos pelos quais podem circular somente pessoas autorizadas. Esse tipo de barramento é aplicado em situações especiais ou quando a sua utilização simplifica o projeto de forma a torná-lo econômico.

Normalmente nas subestações brasileiras da Rede Básica (RB), encontra-se o uso predominante de condutores flexíveis em subestações de alta tensão ao tempo [3]. E esse tipo de condutor é o que foi utilizado no estudo de caso que será apresentado mais a frente, portanto iremos aprofundar mais nesse tema a seguir.

3.5.1 Condutores flexíveis

Os condutores flexíveis possuem formação física de um feixe de fios do mesmo material e de diâmetros iguais, produzindo uma secção nominal característica. Desta forma, suas propriedades mecânicas se somam até gerar grandezas equivalentes a aquele determinado arranjo final. Popularmente tem-se composições já pré-definidas que podem ser encontradas no mercado com ampla cobertura, as mais tradicionais são:

- Cabos de Alumínio (CA):

Condutor encordoado concêntrico, composto de uma ou mais camadas de fios de alumínio 1350, podendo ser encontrado em diversas classes de encordoamento e têmperas para atender demandas diferentes de projeto. Seus códigos são classificados através de nomes de flores, como por exemplo o cabo 636 MCM Orchid (Orquídea). São bastante comuns em subestações de transmissão em linhas gerais. Dentro de um mesmo fabricante de cabos, é possível encontrar uma linha especial termorresiste (T-CA) que apresentam diferentes temperaturas de operação garantidas, que podem ser úteis para determinadas aplicações [4].

- Cabos de Alumínio com Alma de Aço(CAA):

O condutor CAA é do tipo concêntrico, agrupando uma ou mais camadas de 18 fios de alumínio 1350/H19 ao redor de uma alma de aço galvanizado. Por conta do efeito pelicular, onde a distribuição de corrente elétrica dá-se predominantemente na superfície dos condutores evitando a área central da seção transversal, usa-se a área uma alma de aço formada por um ou mais fios para aumentar as características mecânicas do condutor equivalente [4].

Os condutores CAA são amplamente encontrados em linhas de transmissão por conta dos seus grandes vão entre torres. É também aproveitado em algumas subestações por conta da aquisição do condutor no mercado, visto que em subestações com pouca metragem de cabos de alta tensão, o empreendimento acaba utilizando o mesmo condutor da linha para conectar os equipamentos e barramentos da instalação, uma vez que o condutor atende todos os critérios elétricos e mecânicos do sistema elétrico de potência. Seus códigos são classificados através de nomes de pássaros, como por exemplo o cabo 1510 MCM Parrot (Papagaio).

Da mesma forma que o T-CA, é possível encontrar uma linha especial termorresiste (T-CAA) que apresentam diferentes temperaturas de operação garantidas, que podem ser extremamente úteis para determinadas aplicações. Os cabos termorresistentes podem operar em regime de trabalho com temperaturas de até 150°C, sem que haja deterioração das características mecânicas, o que os possibilita conduzir correntes até 50% maiores que os condutores de AL 1350 de mesma bitola.

- Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga (ACAR - Aluminium Conductor Alloy Reinforced):

O condutor ACAR (Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga) é também de formação encordoada concêntrica, composta de uma ou mais camadas de fios de alumínio 1650, com um reforço no núcleo de fios de alumínio liga 6201-T81. Estes condutores também apresentam um melhoramento mecânico, comparado à liga simples de alumínio, porém seu destaque é a elevada resistência à corrosão. Podem atingir uma relação peso-resistência igual à do cabo CAA. Não existe um código específico para o condutor e normalmente é classificado diretamente pela sua numeração AWG/MCM [4].

- Condutores de Alumínio Liga (CAL):

Composto de uma ou mais camadas de fios de liga 61601/6201-T81 ou liga 1120, os Condutores CAL foram desenvolvidos para atender a

necessidade de um condutor econômico com alta resistência mecânica comparado ao condutor de alumínio simples (CA). Possuem maior resistência à corrosão que o cabo de alumínio com alma de aço, porém uma relação peso-resistência mecânica maior e menor resistência elétrica. Esta característica garante uma vantagem para atmosfera agressiva, de alta poluição ou salinidade marítima, sendo altamente recomendados para áreas próximas ao mar [4]. Possuem 3 tipos de variações de códigos a depender da formação, sendo uma em AWG/MCM, outra com nome de cidades e a última com nome de elementos químicos.

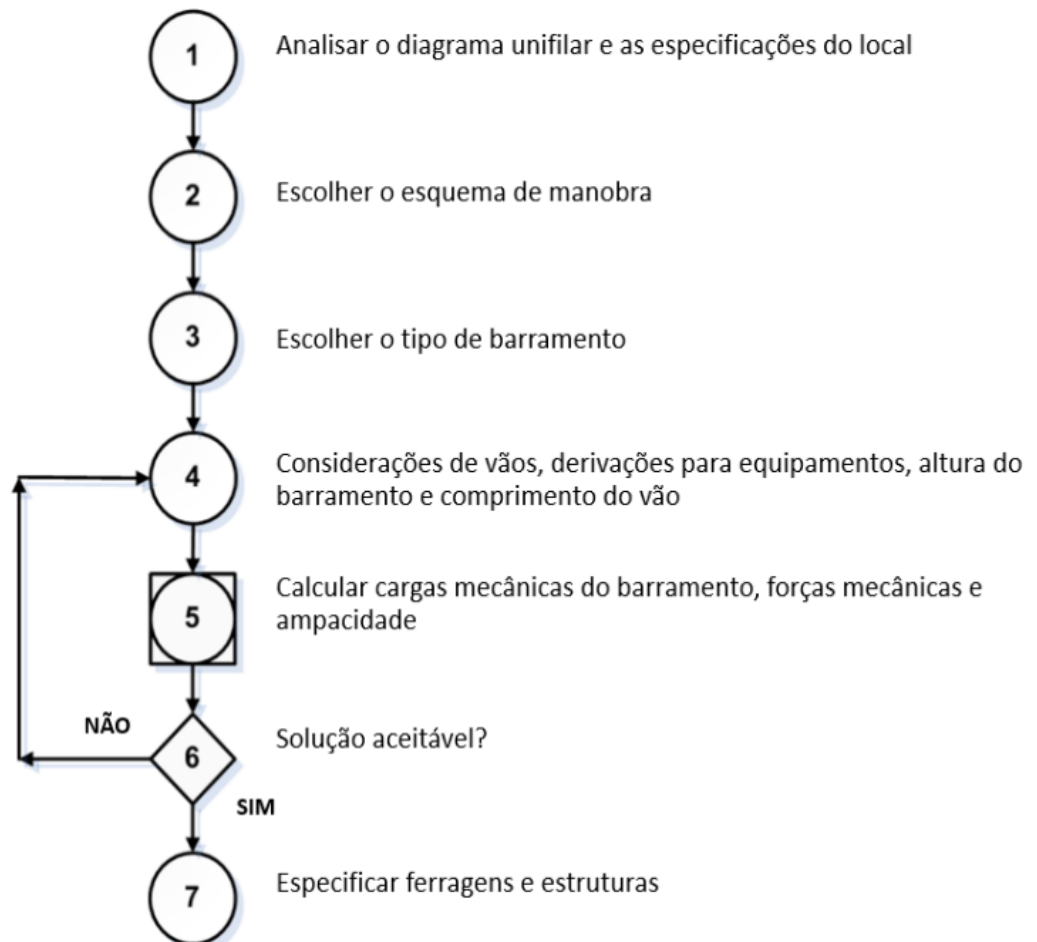
3.5.2 Dimensionamento de barramentos flexíveis

O dimensionamento de barramentos é uma parte fundamental do projeto de sistemas elétricos, especialmente em subestações. Os barramentos são condutores que conectam diferentes equipamentos elétricos permitindo a distribuição de energia elétrica, podendo ser feitos de cobre ou alumínio, onde essa escolha afetará sua seção transversal.

O dimensionamento adequado de barramentos em subestações é essencial para garantir a eficiência, confiabilidade e segurança do sistema elétrico. Um projeto feito de forma correta não apenas protege os equipamentos e usuários, mas também contribui para a operação econômica e ambiental, além de facilitar futuras expansões ou integrações de novos equipamentos. De acordo com algumas especificações técnicas das principais normas internacionais (IEEE-605: *Guide for Bus Design in Air Insulated Substation* (IEEE-605, 2008)), a subestação tem que atender a três aspectos fundamentais durante o dimensionamento:

- Ampacidade;
- Esforços mecânicos durante e após curto-circuito;
- Efeito corona.

Figura 1 – Fluxograma lógico de dimensionamento do condutor.



Fonte: Adaptado de (IEEE605,2008).

Abaixo irão ser explicados, detalhadamente, esses três aspectos com uma descrição da metodologia (em formato de guia) para dimensionamento de barramentos.

3.5.3 Ampacidade

Por definição, ampacidade é a quantidade máxima de corrente elétrica (em amperes) que um condutor pode transportar de forma segura, sem que sua temperatura ultrapasse os limites especificados.

Tem influência sobre a ampacidade: o material condutor utilizado, bem como sua seção transversal, além da temperatura ambiente, o tipo de material isolante e o agrupamento dos condutores.

A exigência de ampacidade do condutor de barramento é geralmente determinada pelos requisitos do sistema elétrico ou pela ampacidade do equipamento conectado. A ampacidade do condutor é limitada pela temperatura máxima de operação do condutor. Temperaturas excessivas do condutor podem recozer o condutor, reduzindo sua resistência, ou podem danificar o equipamento conectado pela transferência de calor. Temperaturas excessivas também podem causar oxidação rápida do condutor de cobre. [5]

A ampacidade é um fator crítico no dimensionamento de cabos para instalações elétricas. Engenheiros e eletricitistas devem considerar a ampacidade no momento de projetar os circuitos e selecionar os condutores que atendam aos requisitos de carga elétrica. Dito isso, seguem sequenciadas as equações para cálculo de ampacidade de condutores utilizados em barramentos aéreos, conforme IEEE - 738 - *Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*.

- Aquecimento por efeito Joule (P_j)

$$P_j = k_j \cdot I^2 \cdot R_{cd} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (T_s - 20)], W/m \quad (3.1)$$

Onde:

k_j – Fator de efeito piel, $k_j = 1,0123$;

I – Corrente através do condutor, A;

R_{cd} – Resistência do condutor, Ω/m ;

T_s – Temperatura superficial do condutor, $^{\circ}C$;

α_{20} – Coeficiente de variação da resistência com a temperatura à $20^{\circ}C$.

- Aquecimento Solar (P_s)

$$P_s = \alpha_s \cdot S \cdot D, W/m \quad (3.2)$$

Onde:

S – Radiação solar, W/m^2 ;

D – Diâmetro externo do condutor, m.

- Resfriamento por convecção (P_c)

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot N_u, \text{ W/m} \quad (3.3)$$

Onde:

λ_f – Condutividade térmica do ar, W/mK;

T_a – Temperatura ambiente, °C;

$Nu_{\delta=90}$ – Número de Nusselt à 90°C.

Para encontrar a condutividade térmica do ar (λ_f), a temperatura do revestimento (T_f) e o número de Nusselt à 90°C, utilizam-se, respectivamente, as formulações abaixo:

$$\lambda_f = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot T_f, \text{ W/mK} \quad (3.4)$$

$$T_f = 0,5 \cdot (T_s + T_a), \text{ °C} \quad (3.5)$$

$$Nu_{\delta=90} = B_1 \cdot (Re)^\eta \quad (3.6)$$

O número de Reynolds (Re), necessário para o cálculo da fórmula (3.6) é encontrado através da equação (3.7).

$$Re = \frac{\rho_r \cdot V \cdot D}{\nu} \quad (3.7)$$

Onde:

ρ_r – Densidade relativa do ar;

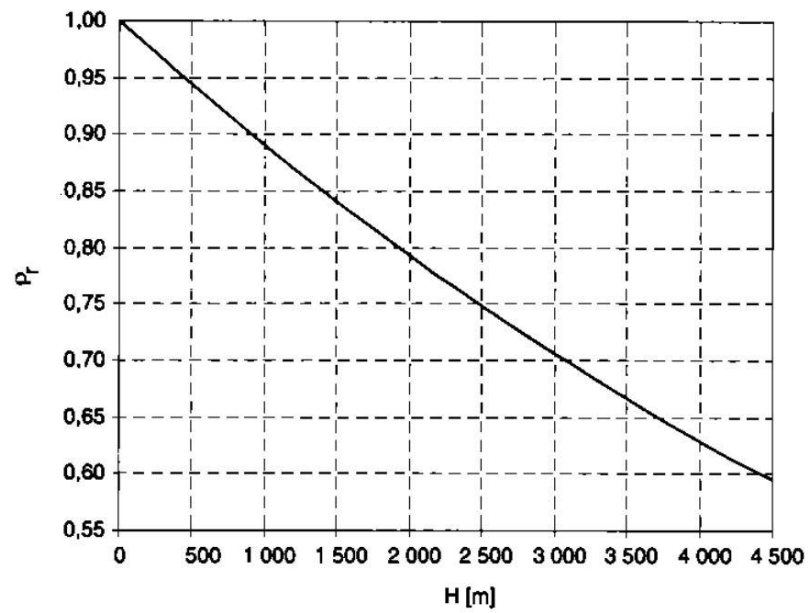
V – Velocidade do vento, m/s;

ν – Viscosidade cinemática do ar, m²/s;

H – Altura em relação ao nível do mar, m.

A densidade relativa do ar, informação necessária para a equação (3.7), apresentada acima, pode ser encontrada no gráfico abaixo em função da altura em relação do nível do mar:

Figura 2 – Densidade relativa do ar x altura do nível do mar.



Fonte: IEEE-738.

Ainda faz-se necessário os cálculos da viscosidade cinemática do ar (ν) e da rugosidade da superfície do condutor (R_f) através das equações (3.8) e (3.9), respectivamente.

$$\nu = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot T_f, m^2/s \quad (3.8)$$

$$R_f = \frac{d}{2 \cdot (D - 2d)} \quad (3.9)$$

Onde:

d – Diâmetro de um fio componente do condutor, m.

As constantes B_1 e η podem ser determinadas em função de Re e R_f conforme a tabela abaixo:

Tabela 1 – Constantes B_1 e η em função de R_e e R_f .

Superfície	R_e		B_1	η
	Desde	Hasta		
Superfícies totalmente trezadas	10^2	$2,65 \times 10^3$	0,641	0,471
Condutores trezados com $R_f \leq 0,05$	$>2,65 \times 10^3$	5×10^4	0,178	0,633
Condutores trezados com $R_f > 0,05$	$>2,65 \times 10^3$	5×10^4	0,048	0,800

Fonte: IEEE-738.

- Resfriamento por radiação (P_r) (W/m)

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \xi \cdot \sigma_B \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4], W/m \quad (3.10)$$

Onde:

 ξ – Emissividade solar (Recomendado o valor de 0,5); σ_B – Constante de Boltzmann, $5,6697 \cdot 10^{-8} W/m^2/K^4$.

Após encontrar a corrente que atravessa o condutor, através dos cálculos apresentados acima, é avaliado um condutor com ampacidade acima ao valor que foi encontrado.

3.5.4 Esforços mecânicos durante a após curto-circuito

Segue abaixo o método simplificado para cálculo dos esforços mecânicos durante e após o curto-circuito, sendo este conservador se comparado ao método com elementos finitos. Esse método é válido para vãos longos o suficiente para que a flexão e a rigidez do condutor não desempenhem um papel significativo, geralmente é a partir de 10 metros de comprimento, conforme IEEE-605 - *Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures*, e os valores calculados não são aplicáveis para conexões entre equipamentos.

Para um sistema trifásico, a carga eletromagnética em N/m em um condutor flexível de um sistema trifásico é dada por:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{I_{k3}^2 l_c}{a l} \quad (3.11)$$

Onde, no sistema internacional de unidades (SI):

μ_0 – Permeabilidade magnética dada por $1.257 \cdot 10^{-6} \text{ V.s/A.m}$;

I_{k3}^2 – Valor RMS do curto – circuito trifásico simétrico (A) no condutor;

a – Distância entre os pontos médios centrais dos condutores;

l – Vão do condutor, em metros;

l_c – Distância entre os dois suportes, em metros.

A razão entre a força eletromagnética e a força gravitacional no condutor é dada por:

$$r = \frac{F'}{F_g} = \frac{F'}{nmg} \quad (3.12)$$

Onde:

n – Número de condutores por fase;

m – Massa linear do condutor unitário;

g – Aceleração da gravidade (9.8 m/s^2);

E sua direção, $\delta_1 = \arctan(r)$.

Uma das características mecânicas fundamentais é a força de tração estática F_{st} , calculada por:

$$F_{st} = \frac{nmgl^2}{8d} \quad (3.13)$$

Onde:

l – Vão do condutor, em metros;

d – Flecha do vão, em metros.

Com base nas resultantes descritas até aqui, pode-se calcular o período natural de oscilação através da seguinte expressão:

$$T = 2\pi \sqrt{0.8 \frac{d}{g}} \quad (3.14)$$

Como deve-se analisar tal oscilação também resultante de um curto-circuito, tem-se:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (3.15)$$

Durante curtos-circuitos fase-fase ou trifásicos, dois condutores do barramento se afastam um do outro (os dois vãos externos no caso de um sistema trifásico). É notável perceber que durante o curto-circuito, a condição crítica de balanço dos condutores é quando dois vãos encontram-se em oscilação ao mesmo tempo. Desta forma, teremos o ângulo máximo de balanço dado por:

$$\begin{aligned} \delta_k &= \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right) \right], \text{ quando } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0.5 \\ &\text{ou} \\ \delta_k &= 2\delta_1, \text{ para } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0.5 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Onde:

T_{k1} – Duração do curto – circuito.

Contudo, os vãos durante o curto-circuito não apresentam comportamento livre ideal (pendular), é mantido um afastamento por certo tempo dentro de uma variação angular no valor de δ_k . Por esta razão, deve-se calcular o ângulo máximo de balanço, dado por:

$$\begin{aligned} \delta_m &= 1.25 \arccos x, \text{ para } 0.766 \leq x \leq 1 \\ \delta_m &= 10^\circ + \arccos x, \text{ para } -0.985 \leq x \leq 0.766 \\ \delta_m &= 180^\circ, \text{ para } -0.985 \leq x \end{aligned} \quad (3.17)$$

Onde, $x = 1 - r \sin \delta_k$, para $0 \leq \delta_k \leq 90^\circ$

$x = 1 - r$, para $\delta_k > 90^\circ$

Faz-se necessário saber a contribuição do isolador ou eletroferragem (cadeia de isoladores) no sistema, através da flexibilidade normal, dada por:

$$N = \frac{1}{K_{eq}l} \quad (3.18)$$

Onde:

K_{eq} – Rigidez axial equivalente do sistema, em N/m.

A rigidez axial de um vão l_c quando é composto de apenas um material (Ex: Cobre ou alumínio) é dado por:

$$k_c = n \frac{E_s A_s}{l_c} \quad (3.19)$$

Onde:

n – Número de condutor por fase;

E_s – Módulo de Young do material do condutor, em N/m²;

A_s – Seção transversal do condutor, em m².

Para um condutor feito de 2 materiais (alumínio e aço, por exemplo), a rigidez equivalente é dada por:

$$k_c = n \left(\frac{E_{s1} A_{s1} + E_{s2} A_{s2}}{l_c} \right) \frac{E_s A_s}{l_c} \quad (3.20)$$

E a rigidez axial de uma cadeia de isoladores de comprimento l_i pode ser calculada por:

$$k_i = \frac{E_i A_i}{l_i} \quad (3.21)$$

Onde:

E_i – Módulo de Young do material da cadeia de isoladores, em N/m^2 ;

A_i – Seção transversal do isolador, em m^2 .

Caso o sistema apresente duas cadeias de isoladores para sustentar o mesmo condutor, tem-se a seguinte fórmula equivalente:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_c} + \frac{2}{K_i} \quad (3.22)$$

Na hipótese de não haver cadeias de isoladores e sim isoladores verticais, o mesmo sistema equivalente é dado por:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{S} \quad (3.23)$$

Onde:

S – Valor empírico dado por $10^5 N/m$.

O fator de stress ζ é calculado pela equação abaixo e será utilizado através do gráfico da Figura 5, de apoio no anexo, para encontrar o valor do parâmetro de carga Ψ , adimensional e usado como variável de apoio no cálculo das demais resultantes.

$$\zeta = \frac{(ngml)^2}{24F_{st}^3 N} \quad (3.24)$$

A tração máxima exercida durante o curto-circuito Φ no barramento estudado é calculada segundo a fórmula abaixo:

$$\Phi = 3 \left(\sqrt{1 + r^2} - 1 \right), \text{ para } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \quad (3.25)$$

$$\Phi = 3 (\text{rsen}\delta_k + \cos\delta_{k-1}), \text{ para } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4}$$

O parâmetro de carga Ψ também pode ser calculado através da resolução do polinômio abaixo:

$$\Psi^2 \Phi^3 + \Phi(2 + \zeta)\Psi^2 + (1 + 2\zeta)\Psi - \zeta(2 + \Phi) = 0, \text{ onde } 0 \leq \Psi \leq 1 \quad (3.26)$$

Os valores de tração mecânica normais do condutor são calculados por:

$$F_t = F_{st}(1 + \Psi\Phi), \text{ para } n=1 \text{ ou } F_t = 1,1F_{st}(1 + \Psi\Phi), \text{ para } n \geq 2 \quad (3.27)$$

Onde “n” é o número de condutores por fase do barramento.

Após o curto-circuito, os esforços que surgiram no transitório vão provocar um sistema oscilatório até a posição de repouso normal dos barramentos. A máxima tração no condutor em regime permanente não deve ser um fator preocupante, visto que o momento crítico ocorre durante o curto-circuito. Porém, caso a razão entre a força eletromagnética e a gravidade (r) seja superior a 0.6 e o ângulo máximo de balanço (δ_m) superior a 70° , a máxima tensão depois do curto-circuito (F_f) se torna importante e é deve ser calculada por:

$$F_f = 1,2F_{st}\sqrt{1 + 8\zeta\frac{\delta_m}{180^\circ}} \quad (3.28)$$

Outra preocupação pertinente na análise de componentes energizados são as distâncias elétricas mínimas que devem ser respeitadas de acordo com a magnitude de isolamento do ar em uma subestação ao tempo. Para tanto, deve-se considerar as deformações elásticas do sistema proporcionais aos esforços mecânicos e as

condições térmicas encontrados e então calcular a distância mínima entre os componentes energizados.

A deformação elástica (ε_{elas}) é dada por:

$$\varepsilon_{elas} = N(F_t - F_{st}) \quad (3.29)$$

A deformação elástica pela expansão térmica é dada por:

$$\varepsilon_{th} = C_{th} \left[\frac{I_{k3}}{nA_3} \right], \text{ para } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4}$$

ou

(3.30)

$$\varepsilon_{th} = C_{th} \left[\frac{I_{k3}}{nA_3} \right], \text{ para } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4}$$

Onde, C_{th} é a constante de acordo com o material do condutor, conforme tabela abaixo:

Tabela 2 – Valores da Constante Cth no SI.

Material Condutor	Cth(m ² /A ² s)
Alumínio, liga de alumínio e aço/alumínio com seção transversal com razão > 6	0,27x10 ¹⁸
Aço/alumínio com seção transversal com razão ≤ 6	0,17x10 ¹⁸
Cobre	0,088x10 ¹⁸

Fonte: IEEE605, 2008.

O máximo espaçamento horizontal para condutores fixados por eletroferragens pode ser calculado por:

$$b_h = C_F C_D d \sin \delta_1, \text{ para } \delta_m \geq \delta_1 \quad (3.31)$$

ou

$$b_h = C_F C_D d \sin \delta_m, \text{ para } \delta_m < \delta_1$$

Caso os condutores estejam apoiados em isoladores verticais, tem-se:

$$b_h = C_F C_D d, \text{ para } \delta_m \geq 90^\circ$$

ou

(3.32)

$$b_h = C_F C_D d \sin \delta_m, \text{ para } \delta_m < 90^\circ$$

Onde:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{l}{d} \right]^2 (\varepsilon_{elas} + \varepsilon_{th})} \quad (3.33)$$

O ponto crítico de dois condutores que estão oscilando após um curto circuito é justamente o ponto central do barramento (ponto onde a flecha é a maior possível). A menor distância (a_{min}) encontrada nesse sistema entre tais pontos médios dos condutores, durante um curto-circuito bifásico é dado por:

$$a_{min} = a - 2b_h \quad (3.34)$$

Caso o valor encontrado na equação acima seja zero ou negativo, os dois condutores vão efetivamente se tocar. Havendo o toque, acontece o “efeito pincelada”. Uma das formas de evitar tal efeito é a adição de espaçadores. Um sistema simples pode ser considerado para verificar se mesmo com os espaçadores, haverá alguma resultante relevante através do efeito estudado.

$$\begin{aligned} \frac{a_s}{d_s} \leq e \text{ e } I_s \geq 50a_s \\ \text{ou} \\ \frac{a_s}{d_s} \leq 2,5 \text{ e } I_s \geq 70a_s \end{aligned} \quad (3.35)$$

Onde:

d_s – Diâmetro do condutor, em metros.

Caso as equações acima não sejam atendidas, o “efeito pincelada” torna-se relevante e sua força deve ser calculada por:

$$F_v = (n - 1) \frac{\mu_o}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}}{n} \right) \frac{I_s}{a_s} \frac{V_2}{V_3} \quad (3.35)$$

A variável de apoio v_1 é calculada pela expressão abaixo:

$$v_1 = f \cdot \frac{1}{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)} \sqrt{\frac{a_s - d_s}{\frac{\mu_o}{2\pi} \left(\frac{I_{k3}}{n} \right) \frac{n-1}{a_s}}} \quad (3.36)$$

Para o valor de v_2 , deve-se utilizar o gráfico da Figura 6 de apoio no anexo. Com o valor de F_v calculado, substitui-se nas equações abaixo para encontrar as resultantes de deformação elástica que surgiram devido ao efeito pincelada:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{st} &= 1,5 \frac{F_{st} I_s^2 N}{(a_s - d_s)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \\ \text{e} \\ \varepsilon_{pi} &= 0,375 \frac{F_v I_s^3 N}{(a_s - d_s)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \end{aligned} \quad (3.37)$$

A partir dos valores encontrados de deformação elástica, calcula-se outra variável de apoio para uma nova verificação de colisão dos condutores.

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (3.38)$$

Para $j > 1$, os condutores devidamente se tocam e o Esforço é calculado por:

$$F_{pi} = F_{st} \left(1 + \frac{v_3}{\varepsilon_{st}} \right) \zeta \quad (3.39)$$

Onde ζ é a solução real da equação abaixo:

$$\zeta^3 + \varepsilon_{st}\zeta^2 - \varepsilon_{pi} = 0 \quad (3.40)$$

Com base no procedimento exposto acima, tal verificação deve ser feita com os dados técnicos garantidos de cada condutor que se queira verificar como condutor do barramento principal da subestação.

3.5.5 Efeito corona

É um fenômeno elétrico que ocorre quando um campo elétrico ao redor de um condutor se torna suficientemente intenso para ionizar o ar em sua proximidade. Isso resulta na formação de pequenas descargas elétricas. O efeito é mais comum em sistemas de alta tensão e pode levar a perdas de energia, interferência em equipamentos eletrônicos e, em alguns casos, danos ao próprio condutor.

Quando o efeito é significativo, os seguintes sinais são percebidos (IEEE605,2008):

- Interferência eletromagnética;
- Degradação dos isoladores;
- Ruído audível;
- Produção de ozônio;
- Emissão de luz.

Para cálculo do efeito corona, utilizou-se a referência IEEE-605 - Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures. Com intuito de evitar quaisquer efeitos negativos no barramento, dimensionam-se os valores de gradiente de tensão na superfície E_a e gradiente de tensão máxima na superfície E_m através das seguintes expressões:

$$E_a = \frac{V_1}{nr \ln \left(\frac{2h}{r_e} \right)} \quad (3.41)$$

Onde,

$$r_e = r \left(\frac{gs}{r} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.42)$$

Para o gradiente de tensão máxima na superfície, tem-se:

$$E_m = \frac{h}{h - r_e} E_a \quad (3.43)$$

Onde:

- n – Numero de condutores;
- s – Distância entre condutores, em centímetros;
- r – Raio do condutor, em centímetros;
- r_e – Raio equivalente do condutor, em centímetros;
- h – Altura relativa do condutor.

A fim de evitar quaisquer efeitos negativos no barramento, dimensiona-se o condutor de maneira a não exceder o valor de $E_a = 30$ kV/cm em sua superfície, ou ainda $E_m = 21,1$ kV/cm (valor médio).

Este tópico 3 mostrou o passo a passo e formulação necessária para que se possa ser feito o dimensionamento de barramentos. Mais adiante no tópico 4 irá ser mostrado os resultados após a aplicação das fórmulas apresentadas levando em consideração uma subestação de rede básica.

3.5.5.1 *Análise Comparativa entre Arranjos de Barramentos*

A escolha entre os diferentes arranjos de barramentos deve considerar uma análise comparativa entre os aspectos técnicos, operacionais e econômicos de cada alternativa. Essa análise é essencial para orientar o projeto da subestação em função de sua função no sistema elétrico, nível de tensão, criticidade e exigências de confiabilidade.

De acordo com Monteiro e Miranda (2021), os principais critérios comparativos envolvem: flexibilidade de operação, facilidade de manutenção, confiabilidade, custo de implantação e complexidade do sistema de proteção e controle. Por exemplo, arranjos com maior número de disjuntores, como o esquema de disjuntor e meio, oferecem alta flexibilidade e confiabilidade, mas com custo significativamente mais elevado e maior complexidade de operação. Já os arranjos mais simples, como barra simples, apresentam baixo custo e facilidade de operação, porém são mais vulneráveis a falhas e interrupções. A ponderação dessas características, por meio de uma análise comparativa, permite ao projetista selecionar o arranjo mais adequado às características específicas do empreendimento, equilibrando desempenho técnico e viabilidade econômica. É importante que essa escolha esteja documentada

tecnicamente no projeto executivo, justificando os critérios adotados e demonstrando conformidade com as normas técnicas e os requisitos do cliente ou da concessionária responsável.

3.5.6 Barramentos em Subestações de Alta Tensão

Além dos aspectos construtivos, a seleção do arranjo de barramentos influencia diretamente o desempenho técnico da subestação. Monteiro e Miranda (2021) apontam que os principais arranjos empregados no Brasil incluem: barra simples, barra principal e de transferência, barra dupla com disjuntor simples, barra em anel, barra com disjuntor e meio e barra dupla com duplos disjuntores. Cada configuração apresenta diferentes graus de confiabilidade, flexibilidade e custo, e deve ser selecionada com base em critérios bem definidos, conforme a função e a criticidade da subestação no sistema elétrico.

O relatório técnico do CIGRÉ (LINGNER et al., 2014) reforça a necessidade de adoção de critérios multidimensionais para a escolha de arranjos de subestações, considerando parâmetros como segurança do sistema, flexibilidade operacional, disponibilidade durante a manutenção e custo de implementação. Esses critérios permitem comparar alternativas de forma estruturada, especialmente em projetos de maior porte e complexidade. O critério de segurança refere-se à capacidade da subestação de suportar falhas sem comprometer a estabilidade e o fornecimento de energia ao sistema interligado. Já a flexibilidade operacional está relacionada à possibilidade de dividir a subestação em seções e remanejar circuitos de forma segura durante manutenções ou mudanças operacionais.

Ainda segundo Lingner et al. (2014), a análise de disponibilidade durante a manutenção é essencial para avaliar a resiliência da subestação frente a intervenções técnicas programadas. A capacidade de manter circuitos energizados enquanto chaves seccionadoras ou disjuntores estão em manutenção depende diretamente da configuração adotada. Por fim, o custo total de implementação — incluindo infraestrutura, equipamentos e sistemas auxiliares — deve ser compatível com os requisitos técnicos do projeto, considerando não apenas o investimento inicial, mas também os custos de operação, manutenção e eventual expansão futura (FRONTIN; JARDINI; GABAGLIA, 2013).

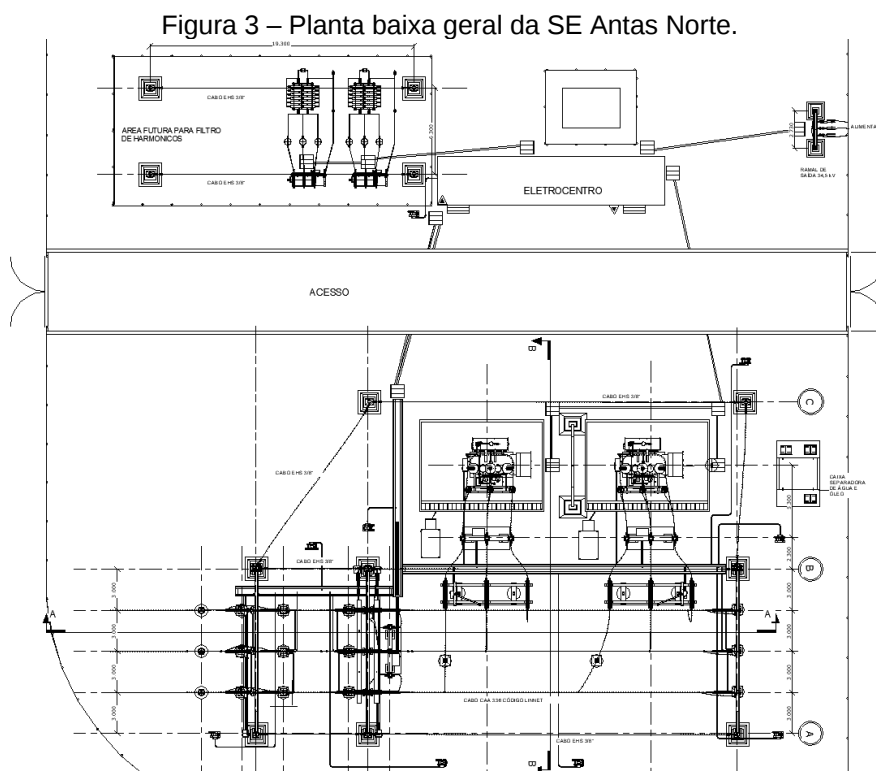
A análise aprofundada das configurações de barramentos, apresentada nesta seção, fornece os elementos técnicos necessários para uma compreensão crítica das alternativas disponíveis para projetos de subestações. Na próxima subseção, será realizada uma comparação direta entre esses arranjos, considerando critérios como confiabilidade, flexibilidade, custo e complexidade de operação.

4 ESTUDO DE CASO – SUBESTAÇÃO ANTAS NORTE 138/34,5KV

Uma subestação (SE), por definição, é uma parte de um sistema elétrico de potência, concentrada em um determinado local, constituída de um conjunto de condutores e equipamentos com a função de alterar as características da energia elétrica como a tensão e a corrente, possibilitando a sua distribuição às unidades consumidoras. Tendo a obrigação de garantir a máxima segurança de serviço e operação a toda parte integrante do sistema elétrico.

De forma resumida, para a realização de um projeto, primeiramente é feito um levantamento técnico para que se possa estipular a demanda do projeto e ser feito um atestado de viabilidade técnica (AVT) e outros documentos que contenham as informações necessárias para que se possa prosseguir com o projeto. O projeto engloba desenhos, memoriais, vistas e documentos.

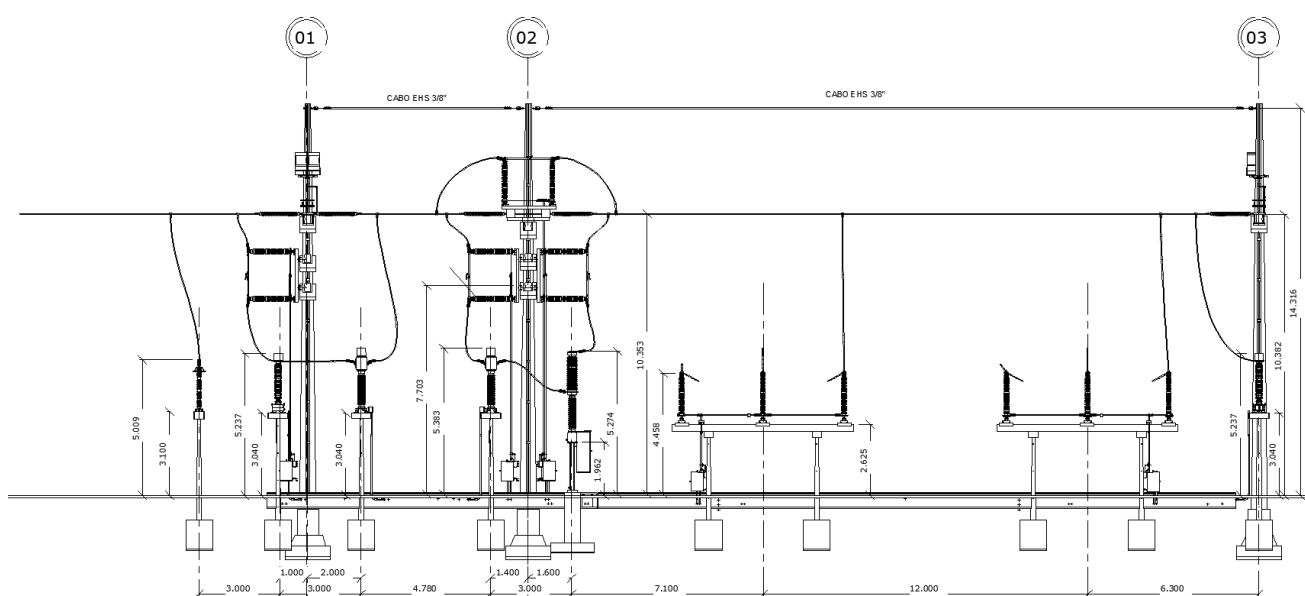
Uma subestação 138/34,5 kV é uma instalação elétrica que realiza a transformação de tensão de 138 kV para 34,5 kV. Esse tipo de subestação é comum em sistemas de distribuição de energia elétrica, onde a energia é transmitida em alta tensão para minimizar perdas e, em seguida, reduzida para níveis mais baixos para distribuição local.



Fonte: Autor.

A subestação possui dois transformadores de força 138/34,5 kV e seu arranjo é composto por barra simples com duas chaves e um disjuntor por evento. No setor 138 kV, tem-se a aplicação de cabos de alumínio 336 MCM Código Linnet, também conhecido como Cabo CAA (Alumínio com Alma de Aço), sendo 1 por fase, que será comprovado como apto para a aplicação na subestação em questão através dos resultados encontrados pela memória de cálculo feita, tomando como base as fórmulas já apresentadas anteriormente.

Figura 4 – Corte do setor de 138 kV da SE Antas Norte.



Fonte: Autor.

Na presente memória abaixo, serão demonstrados os cálculos necessários para o dimensionamento dos condutores em questão para cada evento de acordo com os requisitos contratuais e especificações técnicas das principais normas internacionais sobre o tema.

• AMPACIDADE

Segue abaixo os dados dos condutores contemplados nesse dimensionamento:

Tabela 3 – Dados do condutor contemplado.

Especificações técnicas	
Código	Linnet
MCM	336
Capacidade de Corrente*	587 A
Carga de Ruptura	62,92 kN
Diâmetro Nominal	18,31 mm
Peso Nominal	689,93 kg/km
Diâmetro fio (Alumínio)	2,89 mm
Número de fios (Alumínio)	26
Diâmetro fio (Aço)	2,25 mm
Número de fios (Aço)	7

*Valores para regime de operação em 75°C para cabos CAA e ambiente de 25°C, frequência de 60Hz e velocidade do vento de 1m/s.

Na tabela a seguir consta o cálculo da ampacidade para um único condutor CAA Linnet 336 MCM operando em 75°C, de acordo com as fórmulas (3.1) até (3.10), apresentadas na seção 3.5.3:

Tabela 4 – Resultados obtidos referentes à ampacidade de um condutor CAA Linnet 336 MCM.

Equações	Símbolo	Valor numérico	Unidade
Fator de efeito pelicular	kj	1,0123	
Corrente do condutor	I	104,71	A
Coeficiente de variação de resistência com a temperatura a 20°C	α_{20}	0,004	1/°C
Temperatura média da superfície do conduto	Tav	75	°C
Temperatura ambiente	Ta	35	°C
(Adimensional - conforme tabela em anexo)	B1	0,048	
(Adimensional - conforme tabela em anexo)	n	0,8	
Coeficiente de absorção da superfície do condutor	α_s	0,5	1/°C
Radiação solar. (Valor da ET de 1100)	S	1100	W/m ²
Diâmetro externo do condutor	D	0,01831	m
Raio do fio	r	0,00113	m
N. de fios	n	26	
Resistividade	p	0,000000034	ohm.m
Densidade relativa do ar	pr	1	
Velocidade do vento	V	1,5	m/s
Aquecimento por efeito Joule	Pj	107,805	W/m
Aquecimento Solar	Ps	13,937	W/m
Resfriamento por convecção	Pc	100,98	W/m

Resfriamento por radiação	Pr	12,79	W/m
Balanço térmico ($P_j + P_s = P_r + P_c$)		-98,43	W/m

Para o barramento simples do setor de 138 kV, os cálculos mostram que o limite térmico de 75°C nunca acontecerá, visto que o balanço térmico é negativo, ou seja, o condutor está dissipando mais rápido a energia térmica do que absorvendo. Mostrando que mesmo com demais fontes de contribuição de calor contribuindo, não chegarão ao limite do condutor. Como serão aplicados 1 cabo por fase no barramento, tem-se o valor de ampacidade de sobra para aplicação em questão (104 A versus 587 A – limite do cabo 336 MCM Linnet).

• ESFORÇOS MECÂNICOS DURANTE E APÓS CURTO-CIRCUITO

Os dados da subestação Antas do Norte que serão parâmetros de entrada do procedimento de cálculo, para os dois setores estudados, são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Dados gerais da subestação Antas do Norte.

Barramento principal	Dados
Vão (m)	24,85
Distância fase-fase (m)	3,00
Distância entre condutores (cm)	20
Comprimento do isolador (m)	1,5
Corrente (RMS) (A)	10000
Duração da falta (s)	0,5
Tensão nominal (kV)	138 KV

Visando encontrar as grandezas dos esforços mecânicos atuantes nos barramentos da subestação durante e após curto-circuito, serão utilizados $I_{k3} = 10,0$ kA para o setor de 138 kV.

Na Tabela 6, consta o cálculo dos esforços mecânicos para um curto-circuito de 10kA (valor encontrado através do *software* 'ANAFAS') nos barramentos com 1 condutor Linnet 336 MCM por fase de acordo com as fórmulas apresentadas na seção 3.5.8:

Tabela 6 – Resultados para os esforços mecânicos de um curto-circuito de 10kA no barramento com um condutor Linnet 336 MCM por fase.

Equações	Valor numérico
Carga eletromagnética (F'), em N/m	20,8
Relação de força eletromagnética e gravidade (r), adimensional	1,21
Ângulo resultante (δ_1), em graus	50,47
Tração estática (F_{st}), em N	515,82
Período de oscilação do condutor (T), em s	1,61
Período de oscilação do condutor (em c.c.) (T_{res}), em s	1,35
Ângulo máximo de balanço (δ_k), em graus	85,1
Ângulo máximo de balanço II (δ_m), em graus	-5,89
Rigidez axial (k_c), adimensional), em N/m	$1,25 \times 10^5$
Rigidez equivalente entre cabos (K_{eq}), em N/m	$1,04 \times 10^{-5}$
Rigidez equivalente entre cabo/isolador), em N/m	$7,96 \times 10^5$
Flexibilidade "normal" (S), adimensional	$4,67 \times 10^{-7}$
Fator de stress (ζ), adimensional	9,95
Fator de carga (Φ), adimensional	1,71
Máxima tensão durante curto-circuito (F_t), em N	1382,89
Máxima tensão após curto-circuito (F_f), em N	4399,15
Deformação elástica (ε_{elas}), adimensional	$0,04 \times 10^{-2}$
Deformação elástica para expansão térmica (C_{th}), adimensional	$0,03 \times 10^{-4}$
Deslocamento horizontal máximo (C_{th}), adimensional	2,67
Deslocamento horizontal relativo ao isolador (C_p), adimensional	1,05
Menor distância de isolamento (a_{min}), em metros	0,88

Como os valores encontrados de F_t e F_f são inferiores aos valores de carga de ruptura do condutor (62,9kN), considera-se que mecanicamente o cabo está bem dimensionado. Não foram adotados os valores de efeito pinelada por ter apenas 1 cabo por fase.

- **EFEITO CORONA**

Para o efeito corona, serão estudados também os casos típicos de barramento simples do setor de 138kV.

Seguem os resultados calculados para o barramento simples do setor 138kV de acordo com as fórmulas da seção 3.5.9:

Tabela 7 – Resultados para o barramento simples do setor de 138kV.

Gradiente de Tensão Elétrica na superfície (E_a), em kV/cm	18,36
Gradiente de Tensão Elétrica máxima (E_m), em kV/cm	18,49

Como os resultados estão bem abaixo dos valores limites aceitáveis ($E_a = 30\text{kV/cm}$ e $E_m = 21,1\text{kV/cm}$), considera-se adequada a solução adotada.

5 CONCLUSÕES

O dimensionamento de barramentos em subestações é uma tarefa crítica que envolve não apenas a consideração de aspectos elétricos, mas também mecânicos e térmicos.

Realizar de forma correta um dimensionamento é crucial por várias razões, que impactam tanto a segurança quanto a eficiência do sistema elétrico. É importante, por exemplo, na prevenção de falhas, na proteção dos equipamentos, na redução nas perdas de energia, contribuindo para a estabilidade do sistema, permitindo uma distribuição de carga equilibrada, além de reduzir os custos com manutenções e reparos, resultando em uma economia a longo prazo.

Através dos resultados obtidos no estudo de caso, pode-se comprovar que o objetivo proposto com este trabalho foi atingido, pois mostrou, com base nas equações das normas internacionais, que é possível obter todas as informações necessárias que validem o dimensionamento do barramento.

Vale resaltar que não há normas brasileiras para a melhor interpretação do tema dentro da infraestrutura nacional, visto que o Brasil apresenta particularidades que merecem o devido estudo e aprofundamento para manter a confiabilidade do SIN (Sistema Interligado Nacional).

Como pode ser visto, através deste trabalho, há uma quantidade de equações associadas muito grande, além da necessidade de verificação do sistema e todos seus condicionantes, por conta disso, fica como sugestão para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um *software* ou *script* capaz de aceitar os dados técnicos de diferentes catálogos comerciais de condutores, ligas e demais composições, além de um local para serem inseridos os dados necessários para se obterem os resultados das equações para a verificação do condutor ideal a ser usado.

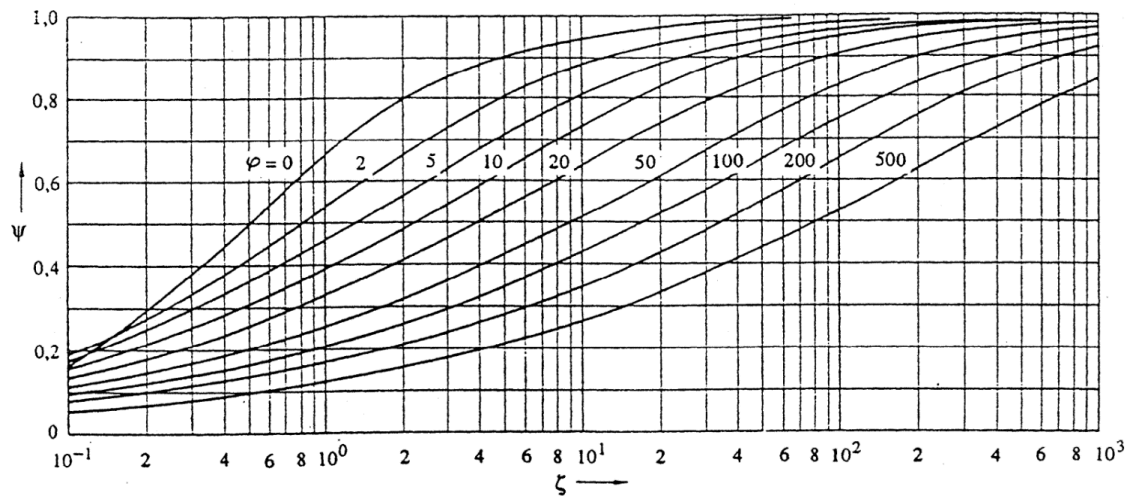
O correto dimensionamento de barramentos em uma subestação é fundamental para garantir a segurança, eficiência, confiabilidade e longevidade do sistema elétrico. Um projeto bem elaborado não apenas protege os equipamentos, mas também assegura um fornecimento de energia estável e contínuo.

REFERÊNCIAS

1. MAMEDE, J. F. Subestações de Alta Tensão. 1 Ed. Rio de Janeiro. LTC, Maio de 2021.
2. HOLDER. S.M.S, Barramento de subestações: Um estudo de caso com condutores rígidos. Trabalho de Conclusão de Curso. POLI/UPE. 2010.
3. GODOY, A. V., Esquemas de Manobra, Material de apoio da disciplina de Análise de sistemas de potência 2, Iecionada na POLI/UPE, Recife/PE, Maio de 2007.
4. ALUPAR, Catálogo Técnico – Condutores Elétricos de Alumínio. Brasil. 2012.
5. INSTITUTE OF ELETRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Guide for Design of Substation Rigid-Bus Structures. IEEE-605. New York, 1998.
6. INSTITUTE OF ELETRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE 738.
7. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. I Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods. IEC 60865-1. Suíça, 2011.
8. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. International Electrotechnical Vocabulary. IEC 60050-605. Suíça, 1983.
9. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5460:1992 – Sistemas elétricos de potência – Subestações – Terminologia. Rio de Janeiro, 1992.
10. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Preços de Referência – BPR. Despacho nº 3.246/2022. Brasília: ANEEL, 2022.
- COLUSSI, F. L. Avaliação de topologias de subestações de alta tensão com base na confiabilidade e no custo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFSM, 2002.
11. FRONTIN, M.; JARDINI, J. A.; GABAGLIA, M. C. Viabilidade técnica e econômica de diferentes arranjos de barramento em subestações. XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013.
12. LINGNER, H.; QUITMANN, H.; SEIDEL, M.; SCHMALENBACH, T. et al. Circuit Configuration Optimization – CIGRÉ B3/C1/C2.14. CIGRÉ Technical Brochure 543, 2014.
13. MAMEDE, J. C. Subestações de alta tensão. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
14. MONTEIRO, F. S.; MIRANDA, L. D. Revisão sobre arranjos de barramentos em subestações de alta tensão. Revista Eletrônica de Energia, v. 31, n. 2, p. 98–114, 2021.
15. ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede – Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos para Instalações de Subestações. Brasília: ONS, 2022.
16. VIOLIN, M. T.; D’AJUZ, M. F.; LACORTE, M. G. Estudo comparativo de arranjos de barramento para subestações. XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013.

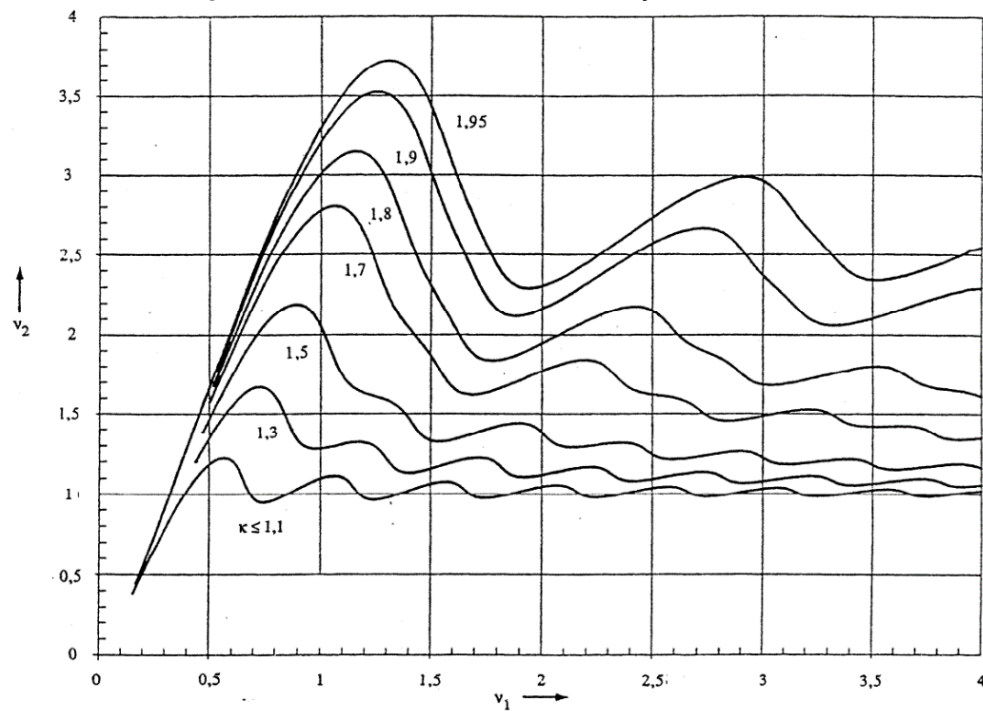
ANEXOS - GRÁFICOS DE APOIO PARA O GUIA DE DIMENSIONAMENTO

Figura 5 – Fator psi para máxima tensão durante curto-circuito.



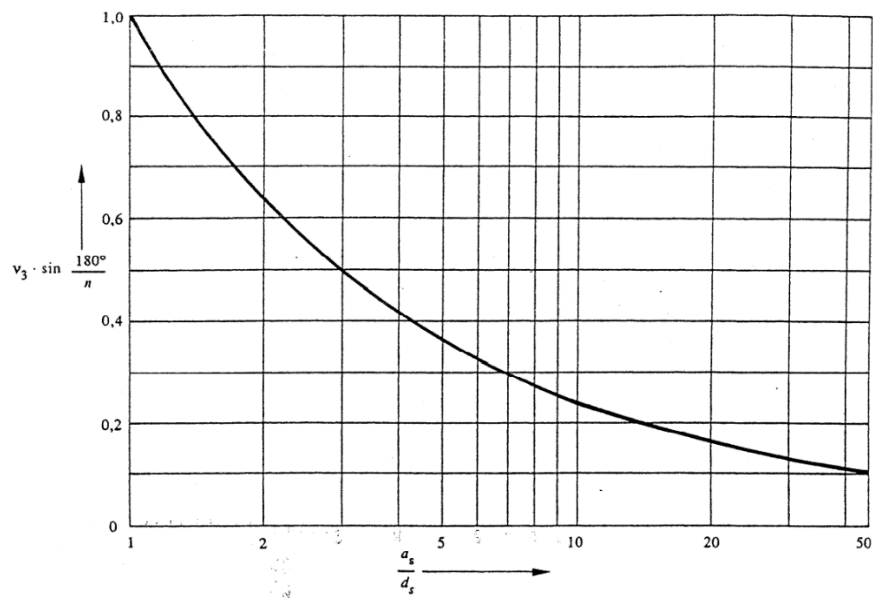
Fonte: IEEE 605.

Figura 6 – Valor da variável V2 em função de V1 e K.



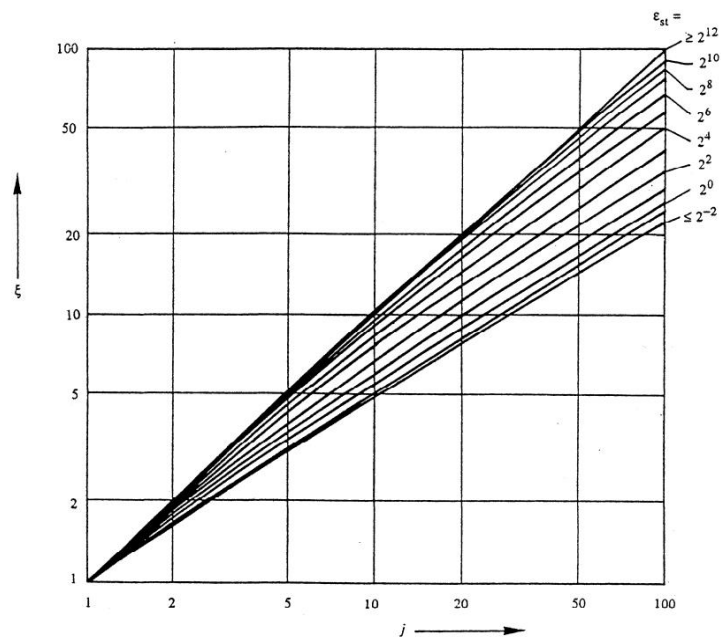
Fonte: IEEE 605.

Figura 7 – Relação entre V_3 e a razão A_s/D_s .



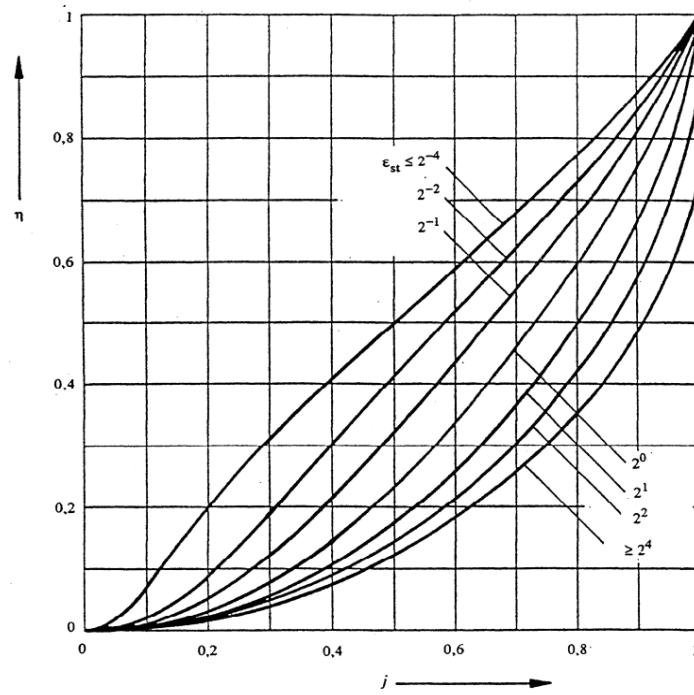
Fonte: IEEE 605.

Figura 8 – Valor de Psi em relação a J e Est.



Fonte: IEEE 605.

Figura 9 – Valor de N em função de J , Est e As/Ds.



Fonte: IEEE 605.