



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA (CEEI)
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA



MEMÓRIA DE CÁLCULO EM SUBESTAÇÕES PARA FONTES DOS
SERVIÇOS AUXILIARES, CABOS E DISPARADORES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluna: Thamyris Costa Da Silva
Matricula: 119210491
Orientador: Prof. Dr. Pablo Bezerra Vilar

CAMPINA GRANDE, PB
2024
THAMYRIS COSTA DA SILVA

MEMÓRIA DE CÁLCULO EM SUBESTAÇÕES PARA FONTES DOS SERVIÇOS AUXILIARES, CABOS E DISPARADORES

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

CAMPINA GRANDE, PB
2024

THAMYRIS COSTA DA SILVA

MEMÓRIA DE CÁLCULO EM SUBESTAÇÕES PARA FONTES DOS SERVIÇOS AUXILIARES, CABOS E DISPARADORES

Data de Aprovação 15/05/2024

BANCA EXAMINADORA:

Pablo Bezerra Vilar
Universidade Federal de Campina Grande
Professor Orientador

Ronimack Trajano de Souza
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

CAMPINA GRANDE, PB
2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Aduino e Maria Nazareth, por todo o sacrifício e esforço para me proporcionarem uma educação de qualidade. Como eles dizem a única herança que vão me deixar é o conhecimento.

Agradeço as minhas irmãs, Thawanny e Thaylanny, que mesmo longe foram um dos grandes motivos de não desistir.

Agradeço a toda a minha família por serem a rocha que sempre posso voltar caso naufrague no mar.

Agradeço os meus amigos que encontrei em Campina Grande. Lucila que estava sempre ao meu lado na graduação e na vida. E os demais Lara, Leiry, Felipe, Lucas, Sara, Claudia, Luana, Matheus, Marcia, Larissa, Mateus. A todos que foram passaram e ficaram, mas me mostraram que a jornada é tão importante quando o destino.

Agradeço aos meus companheiros no Ramo Estudantil IEEE UFCG por terem dado um grande significado em minha graduação e por toda a ajuda em meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço a todos os meus professores que tive durante a minha vida, mas especialmente os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Campina Grande, que me mostraram que amar o que você faz é inspirador e reconfortante.

Agradeço também a meus amigos e colegas de curso, que foram grandes parceiros de guerra durante a graduação.

Agradeço a Coordenação de engenharia elétrica por sempre apoiar os alunos, em especial a Adail e Tchai.

Agradeço a todos os colaboradores da INTEREST Engenharia, em especial à equipe SPCS, e aos meus amigos que fiz durante essa jornada de aprendizado.

Agradeço ao meu orientador de TCC Pablo Vilar, por ter aceitado participar dessa minha jornada.

E finalmente agradeço a mim, por ter sido mais forte do que jamais esperava e aceitado todos os desafios que a vida colocou no meu caminho.

“Algumas batalhas são vencidas com espadas e lanças, outras com papel e caneta.”
(Tywin Lannister – Game of Thrones)

RESUMO

As subestações são fundamentais para o sistema de distribuição e transmissão de energia elétrica, contribuindo para o fornecimento seguro, confiável e eficiente de eletricidade para residências, empresas e indústrias. O presente trabalho tem por objetivo apresentar os principais conceitos teóricos para o entendimento da memória de cálculo de equipamentos essenciais nas subestações, permitindo entender a necessidade e utilização de banco de baterias, transformadores de serviços auxiliares e gerador de emergência em subestações, esclarecer os serviços auxiliares em uma subestação, diferenciar o cálculo de cabos e disjuntores para corrente contínua e alternada, diferenciar cargas essenciais e não-essenciais em uma subestação de potência, e aplicar uma memória de cálculo para o dimensionamento dos equipamentos mencionados. Para a completude do trabalho foi adotada uma metodologia baseada na análise de um modelo típico de subestação para a elaboração da memória de cálculo. Os resultados do trabalho permitem a compreensão básica da estrutura e funcionamento de uma subestação, sem entrar em detalhes técnicos complexos

Palavras-chave: Subestações elétricas; Dimensionamento; Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de Barra simples	14
Figura 2 – Configuração em barra principal + barra de transferência.....	15
Figura 3 - Configuração em barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves	16
Figura 4 – Configuração em barra dupla com disjuntor e meio	18
Figura 5 – Diagrama unifilar da subestação modelo	45
Figura 6 – Perfil de descarga das baterias em uma subestação	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento máximo percentual esperado em função do tipo de combustível	22
Tabela 2- Tabela exemplificativa dos espaçamentos mínimos requeridos entre diferentes equipamentos da subestação	23
Tabela 3 – Cargas a serem atendidas pelos serviços auxiliares.....	46
Tabela 4 – Detalhamento das cargas do Disjuntor 230 kV	47
Tabela 5 – Detalhamento das cargas da Chave Seccionadora 230 kV	48
Tabela 6 – Estimativa das cargas de iluminação e tomadas de pátio	48
Tabela 7 – Estimativa das cargas de iluminação e tomadas das edificações.....	49
Tabela 8 – Estimativa das cargas de ar-condicionado das edificações.....	50
Tabela 9 – Estimativa das cargas de iluminação, aquecimento e tomadas dos painéis.....	51
Tabela 10 – Somatório das cargas simultâneas	52
Tabela 11 - Lista de cargas permanentes (Ip)	55
Tabela 12 - Lista de cargas momentâneas (Im)	56
Tabela 13 – Lista de cargas de tempo limitado (It)	56
Tabela 14 - Estimativa das correntes de cargas	58
Tabela 15 – Carga na primeira seção.....	58
Tabela 16– Carga na segunda seção	58
Tabela 17 – Carga na terceira seção	59
Tabela 18 – Carga na quarta seção	60
Tabela 19 – Carga na quinta seção	61
Tabela 20 – Carga na sexta seção	62
Tabela 21– Capacidade Calculada.....	62
Tabela 22 – Capacidade Final	63
Tabela 23– Corrente de carga da bateria	63
Tabela 24 – Corrente do carregador retificador.....	63
Tabela 25 – Potência nominal	64
Tabela 26 –Dimensionamento para as correntes de serviços auxiliares 125 Vcc	65
Tabela 27 –Dimensionamento para as correntes corrigidas de serviços auxiliares 125 Vcc ..	66
Tabela 28 –Dimensionamento das secções dos cabos de serviços auxiliares 125 Vcc.....	67
Tabela 29 –Dimensionamento dos disjuntores de serviços auxiliares 125 Vcc	67
Tabela 30 – Verificação dos critérios de queda de tensão para os serviços auxiliares 125 Vcc	68
Tabela 31 –Dimensionamento para as correntes de serviços auxiliares 380/220 Vca	71
Tabela 32 –Dimensionamento para as correntes permanente de serviços auxiliares 380/220 Vca	71
Tabela 33 –Dimensionamento das secções dos cabos de serviços auxiliares 380/220 Vca.....	72
Tabela 34 – Dimensionamento dos disjuntores de serviços auxiliares 380/220 Vca.....	73

SUMÁRIO

CAPITULO I	9
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo Geral	9
1.2 Objetivos Específicos	9
1.3 Organização do trabalho	10
CAPITULO II	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2. 1 Redes elétrica de alta tensão	11
2.2 Subestações Elétricas (SE)	11
2.2.1 Configurações de barramento de uma subestação	12
2.2.1.1 Barra simples	13
2.2.1.2 Barra principal e de transferência	14
2.2.1.3 Barra dupla	15
2.2.1.4 Barra dupla com disjuntor e meio	17
2.2.2 Sistemas Auxiliares em Subestações	18
2.2.2.1 Transformador de Serviços Auxiliares em Subestações Elétricas	18
2.2.2.2 Bancos de Baterias em Subestações Elétricas	20
2.2.2.3 Gerador de emergência em subestações elétricas	21
2.3 Revisão das normas, procedimento de rede e instruções técnicas	23
2.3.1 NBR 5460	23
2.3.2 NBR 5410	24
2.3.3 NBR 15254	26
2.3.4 Procedimento de rede	28
2.3.4.1 Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos	29
2.3.4.2 Submódulo 2.11 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção	30
2.3.5 Instruções técnicas	30
2.3.5.1 Instruções técnicas - Critério de dimensionamento dos transformadores de serviços auxiliares e grupo motor gerador diesel de emergência (IT-DEEC-09/2010)	31
2.3.5.2 Instruções técnicas - Critério de dimensionamento para banco de baterias e carregador/retificador (IT-DEEC-010/2010)	31
2.3.5.3; Instruções técnicas - Critério de dimensionamento das seções de condutores para serviços auxiliares de corrente alternada e corrente contínua e coordenação de seletividade dos disjuntores (IT-DETA-010/2017)	32
CAPITULO III	33

3. METODOLOGIA	33
3.1 Desenvolvimento de um modelo típico de subestação para a elaboração da memória de cálculo 33	
3.2 Desenvolvimento de Cálculos:	34
3.2.1 Dimensionamento de Transformador de Serviços Auxiliares (TSA) e Grupo Motor Gerador (GMG) 34	
3.2.2 Dimensionamento de banco de baterias e carregador retificador.....	37
3.2.3 Dimensionamento de cabos em corrente contínua (CC)	39
3.2.4 Dimensionamento de cabos em corrente alternada (CA)	41
3.2.4 Dimensionamento dos disparadores	43
CAPITULO IV	45
4. RESULTADOS	45
4.1 Modelo típico de subestação de alta tensão	45
4.2 Dimensionamento do transformador de serviços auxiliares (TSA) e grupos motores geradores (GMG) 46	
4.3 Dimensionamento do banco de baterias e carregadores retificadores.....	53
4.4 Dimensionamento dos cabos e disjuntores	64
4.4.1 Dimensionamento dos cabos e disjuntores de Corrente Contínua	64
4.4.2 Dimensionamento dos cabos e disjuntores de Corrente Alternada	68
CAPITULO V	75
5. CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE I 80	
APÊNDICE II 80	
ANEXO I 81	
ANEXO II 82	
ANEXO III 83	

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO

As subestações contribuem para o fornecimento seguro, confiável e eficiente de eletricidade para residências, empresas e indústrias, atuando como um sistema de distribuição, transmissão e controle da energia elétrica. De acordo com a Associação Nacional de Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ANEEL, 2020), as subestações são responsáveis por cerca de 50% das perdas de energia elétrica no Brasil. Isso ocorre devido a diversos fatores, como a falta de manutenção adequada, a obsolescência dos equipamentos e o dimensionamento inadequado dos elementos críticos.

O setor elétrico brasileiro enfrenta diversos desafios contemporâneos, como a necessidade de aumento da demanda por energia, a necessidade de expansão da rede elétrica e a transição das fontes energéticas. De acordo com Gonçalves (2018), a expansão da rede elétrica brasileira deve chegar a 20% até 2030. Isso exigirá não apenas a construção de novas subestações e a modernização das subestações existentes, mas também o dimensionamento adequado dos elementos críticos para garantir a operação segura e eficiente.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os principais conceitos associados ao dimensionamento de elementos essenciais nas subestações elétricas de alta tensão.

1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se listar:

- Descrever os requisitos do procedimento de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que apoia o tema do trabalho;
- Explicar a necessidade e utilização de banco de baterias, transformadores de serviços auxiliares e gerador de emergência em subestações;
- Esclarecer quais são os serviços auxiliares em uma subestação e como compreende os seus funcionamentos;

- Entender a diferença do cálculo de cabos e disparadores para atender necessidades de corrente contínua e alternada;
- Diferenciar as cargas essenciais e não-essenciais em uma subestação de potência;
- Aplicação de uma memória de cálculo para dimensionamento de banco de baterias, transformador de serviços auxiliares, cabos e disparadores

1.3 Organização do trabalho

A estrutura do trabalho está organizada em cinco capítulos, sendo eles:

Capítulo I - Introdução: Nessa seção é apresentada uma contextualização e importância das subestações elétricas no sistema de transmissão de energia, sendo apresentado o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo.

Capítulo II - Fundamentação Teórica: Nessa seção são apresentados os conceitos básicos sobre as redes elétricas de alta tensão, explora o conceito de subestações elétricas, seus elementos estruturais e operacionais, funções desempenhadas, controle, proteção e sistemas auxiliares, além de uma revisão das normas e regulamentações pertinentes ao tema.

Capítulo III - Metodologia: Nessa seção são descritas a metodologia adotada no trabalho, destacando o desenvolvimento de cálculos para o dimensionamento de cabos em corrente contínua e alternada, disjuntores, transformadores, geradores, bancos de baterias, entre outros.

Capítulo IV - Resultados e Discussões: Nesta seção é destinada à apresentação dos resultados obtidos a partir dos cálculos realizados, bem como discussões sobre esses resultados e sua relevância para o dimensionamento dos equipamentos em subestações.

Capítulo V - Conclusão: Nessa seção são apresentadas as conclusões derivadas dos resultados e discussões apresentados no capítulo anterior, sendo também apresentadas as recomendações, sugestões para trabalhos futuros e reflexões sobre a importância do estudo realizado.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Redes elétrica de alta tensão

A rede elétrica de alta tensão é projetada para transportar grandes volumes de eletricidade a longas distâncias, minimizando as perdas de energia e garantindo a estabilidade do sistema. Isso é alcançado através da transmissão de eletricidade em altas tensões, o que reduz a corrente elétrica e, conseqüentemente, as perdas por efeito Joule nas linhas de transmissão. As linhas de transmissão de alta tensão são geralmente compostas por cabos condutores suspensos em torres de aço, isolados do solo por meio de isoladores.

As subestações desempenham um papel crucial na rede de alta tensão, facilitando a interconexão entre diferentes linhas de transmissão e ajustando os níveis de tensão conforme necessário. Transformadores são utilizados para elevar a tensão elétrica gerada em usinas e, posteriormente, abaixar a tensão para níveis adequados para distribuição aos consumidores finais.

2.2 Subestações Elétricas (SE)

As subestações elétricas são uma infraestrutura essencial para o fornecimento de energia elétrica, pois são responsáveis por transformar, controlar a energia elétrica. Elas desempenham um papel fundamental na cadeia produtiva de energia, desde a geração até o consumo. Segundo Ghelere (2022) as subestações podem ser classificadas de acordo com sua função, tensão e tamanho. As subestações de geração são responsáveis por transformar a energia elétrica gerada nas usinas para a tensão adequada para a transmissão. As subestações de transmissão são responsáveis por transmitir a energia elétrica para grandes distâncias. As subestações de distribuição são responsáveis pela diminuição da tensão a níveis de distribuição, para que as redes de distribuição possam transportar a energia até os consumidores finais.

As Subestações, Segundo Garcia (2012), designadas como “SE”, atuam como pontos de convergência entre as linhas de transmissão e distribuição. Com frequência, constituem uma interface entre dois subsistemas. As subestações podem ser agrupadas nas seguintes funções:

- SE de Manobra: Permite, no mesmo nível de tensão, manobrar partes do sistema, inserindo ou retirando-as de serviço;
- SE de Transformação:
 - SE Elevadora: Localizadas na saída das usinas geradoras atuam na conversão de níveis de energia para transmissão e/ou sub-transmissão; e
 - SE Abaixadora: Tem como função abaixar os níveis de tensão para serem distribuídos os clientes.
- SE de Transmissão: Localizadas ao longo das linhas de transmissão de alta tensão, as subestações de transmissão recebem eletricidade de usinas geradoras e a transmitem a longas distâncias. Elas podem aumentar ou diminuir a tensão da eletricidade, conforme necessário, para minimizar perdas e garantir a eficiência da transmissão.
 - SE de Distribuição: Diminuem a tensão para o nível de distribuição primária (13,8kV – 34,5kV); e
 - SE de Regulação de Tensão: Regulam a tensão da linha de transmissão através do emprego de reatores, capacitores, compensadores estáticos, etc.

Além da classificação citada as subestações podem ser classificadas quanto ao nível de tensão, tipo de instalação e forma de operação. A classificação quanto ao nível de tensão relaciona a tensão nominal de saída, sendo uma SE de Alta Tensão com tensão nominal abaixo de 230kV ou SE de Extra Alta Tensão com tensão nominal acima de 230kV. Quanto ao Tipo de Instalação as subestações podemos ter SE Desabrigadas, construídas a céu aberto em locais amplos ao ar livre, ou SE Abrigadas, construídas em locais interiores abrigados, ou SE Blindada, que utiliza de gases isolantes para permitir a redução de seu espaço de construção. As SE classificadas quanto a forma de operação relacionam o nível de intervenção humana nas operações, podendo ser SE manuais, com ação de operadores, SE semiautomáticas, com comando eletromecânicos, ou SE automatizadas, supervisionadas à distância por intermédio de computadores.

2.2.1 Configurações de barramento de uma subestação

Barramentos são condutores que proporcionam um ponto comum de conexão entre os circuitos de uma subestação. Assim, os circuitos de uma subestação estão conectados entre si por meio dos barramentos.

A configuração de barramento de uma subestação é um dos pontos principais para determinar a sua confiabilidade, segurança, sistema de proteção utilizado e a facilidade para

manutenção e expansão. Sendo assim, é importante compreender sobre as diferentes configurações de barramentos existentes.

2.2.1.1 Barra simples

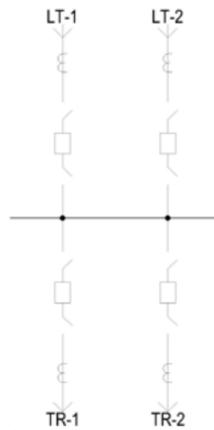
Em uma subestação elétrica se refere a uma das configurações mais básicas de barramento usada em sistemas elétricos.

Características de uma barra simples em uma subestação incluem:

- **Conexão Direta:** Uma única barra é usada para conectar vários componentes, como transformadores, disjuntores, chaves, transformadores de corrente e de tensão, relés de proteção e outros dispositivos.
- **Conexão em Série:** Os componentes da subestação são conectados em série à barra simples. Isso significa que a energia elétrica flui de um componente para o próximo na sequência, e qualquer desligamento em um componente pode afetar todos os dispositivos conectados a montante (antes) desse ponto.
- **Simplicidade:** A configuração de barra simples é simples e direta, o que facilita a operação e a manutenção. É comumente usada em subestações de menor porte e menor complexidade.
- **Limitações:** No entanto, essa configuração tem algumas limitações em termos de redundância e confiabilidade. Se houver um problema em um componente conectado à barra simples, isso pode afetar todo o sistema e levar à interrupção do fornecimento de energia.

A configuração de barra simples é uma escolha apropriada para subestações menores, onde a simplicidade e a economia são fatores importantes. No entanto, em subestações maiores e mais críticas, a redundância e a capacidade de isolar seções do sistema para manutenção e operação contínua são prioridades, o que leva à utilização de configurações de barramento mais complexas. O diagrama de configuração de um barramento simples é representado na Figura 1.

Figura 1 – Configuração de Barra simples



Fonte: Frontin, 2013.

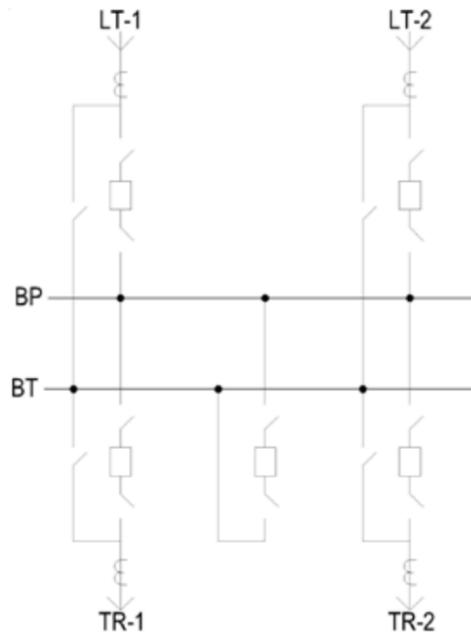
2.2.1.2 Barra principal e de transferência

Barras principal e de transferência são componentes-chave em subestações elétricas, projetadas para fornecer redundância e melhorar a confiabilidade do sistema elétrico, permitindo a manutenção e a operação contínua. Essas configurações de barramento são usadas em subestações maiores e mais críticas, onde a interrupção do fornecimento de energia é indesejada. Aqui está uma explicação mais detalhada de barras principais e de transferência em subestações:

- Barra Principal: A barra principal é a parte central da subestação, onde a energia elétrica é normalmente distribuída e onde a maior parte da carga é conectada. Ela é a "rota principal" pela qual a eletricidade flui através da subestação. Quando não há necessidade de manutenção ou reparo, a eletricidade flui pela barra principal para alimentar as cargas.
- Barra de Transferência: A barra de transferência é uma segunda barra que pode ser usada para direcionar o fluxo de energia elétrica em caso de manutenção programada ou falha em um dos componentes da subestação, como transformadores, disjuntores ou outros dispositivos. Ela serve como uma alternativa à barra principal e permite a continuidade do fornecimento de energia durante essas situações.

O diagrama de configuração de um barramento de barra principal e de transferência é representado na Figura 2.

Figura 2 – Configuração em barra principal + barra de transferência



Fonte: Frontin, 2013.

2.2.1.3 Barra dupla

A configuração de "Barra Dupla" em subestações elétricas é uma estratégia comum usada para melhorar a confiabilidade e a flexibilidade do sistema elétrico. Nessa configuração, a subestação é equipada com duas barras principais (também conhecidas como barras de barramento) que correm lado a lado e podem ser usadas de forma independente ou combinada. Cada barra principal é normalmente interligada a vários componentes da subestação, como transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras e dispositivos de proteção.

Aqui estão os principais aspectos da configuração de Barra Dupla em subestações:

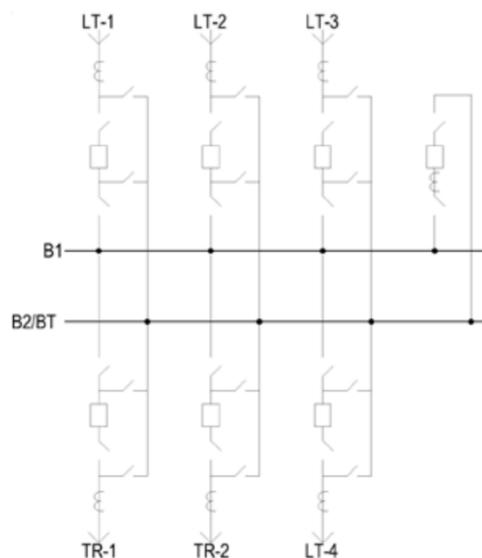
- **Redundância:** A presença de duas barras principais proporciona redundância. Em caso de falha em uma das barras ou em um dos dispositivos associados a uma delas, a outra barra pode ser usada para manter o fornecimento de energia, aumentando a confiabilidade do sistema.
- **Flexibilidade Operacional:** As barras duplas permitem maior flexibilidade na operação da subestação. Elas podem ser usadas para alternar a alimentação de cargas, redistribuir a carga, permitir manutenção programada sem interrupção e facilitar a reconfiguração do sistema.
- **Comutações Controladas:** As comutações entre as barras ou para a rede de distribuição são controladas por dispositivos de proteção e sistemas de automação. Isso

garante que as operações sejam realizadas com segurança e de acordo com as políticas da subestação.

- **Manutenção Programada:** As barras duplas são particularmente úteis para a realização de manutenção programada em disjuntores, transformadores e outros dispositivos, sem a necessidade de interromper o fornecimento de energia para as cargas.
- **Isolamento de Falhas:** Se ocorrer uma falha em uma das barras principais, os dispositivos de proteção podem isolar a seção afetada, permitindo que a outra barra continue fornecendo energia às cargas. Isso minimiza o impacto das falhas no sistema.
- **Operação em Condições de Emergência:** Barras duplas também são úteis em situações de emergência. Em caso de falha, a capacidade de alternar para a outra barra pode ajudar a manter a continuidade do fornecimento de energia.
- **Complexidade e Custo:** Barras duplas adicionam complexidade ao projeto da subestação e podem aumentar os custos iniciais de construção e manutenção. No entanto, esses custos geralmente são justificados pela melhoria na confiabilidade e na operabilidade.

Essa configuração de barramento fornece uma camada adicional de flexibilidade e redundância ao sistema elétrico, permitindo que a subestação continue operando durante manutenções planejadas ou em caso de falhas. Também é útil para situações em que a capacidade da subestação precisa ser aumentada ou reconfigurada. O diagrama de configuração de um barramento de barra dupla é representado na Figura 3.

Figura 3 - Configuração em barra dupla com disjuntor simples a quatro chaves



Fonte: Frontin, 2013.

2.2.1.4 Barra dupla com disjuntor e meio

A configuração de "Barra Dupla com Disjuntor e Meio" é uma abordagem avançada usada em subestações elétricas, projetada para melhorar ainda mais a confiabilidade e a flexibilidade operacional do sistema elétrico. Nessa configuração, além das duas barras principais (Barra A e Barra B), são incorporados disjuntores centrais que dividem cada barra principal em seções independentes. Essa configuração é especialmente útil em subestações de alta tensão e em sistemas críticos, onde a continuidade do fornecimento de energia é fundamental.

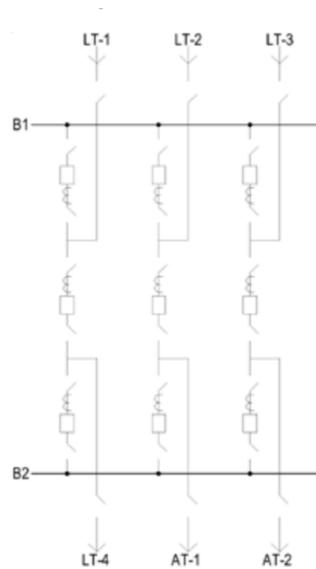
Aqui estão os principais aspectos da configuração de Barra Dupla com Disjuntor e Meio em subestações:

- **Redundância Aprimorada:** Além das barras duplas que já fornecem redundância, a presença de disjuntores e meio nas barras A e B permite uma redundância adicional no nível dos disjuntores. Isso significa que, em caso de falha em um disjuntor, outro pode ser usado para manter o fornecimento de energia.
- **Flexibilidade Operacional e de Manutenção:** A configuração com disjuntores e meio permite que seções específicas da subestação sejam isoladas para manutenção ou reparos sem a necessidade de desligar toda a barra principal. Isso ajuda a manter o fornecimento de energia para outras partes da subestação e para as cargas.
- **Controle Avançado:** O controle dos disjuntores e meio é realizado por sistemas de automação avançados e sistemas de proteção. Isso permite comutações controladas para operações de transferência e manutenção seguras.
- **Complexidade e Custo:** Essa configuração é mais complexa do que a Barra Dupla padrão e, portanto, tende a ser mais cara em termos de custos iniciais de construção e manutenção. No entanto, essa complexidade é justificada pela melhoria na confiabilidade e na flexibilidade operacional.
- **Isolamento de Falhas:** Como em configurações de Barra Dupla padrão, em caso de falha em uma seção da barra principal ou de um disjuntor e meio, a capacidade de isolar a seção afetada minimiza o impacto das falhas no sistema.
- **Operação em Condições de Emergência:** A configuração com disjuntores e meio é particularmente útil em situações de emergência, onde a continuidade do fornecimento de energia é crítica.

Essa configuração é especialmente adequada para subestações que fornecem energia para setores críticos, como hospitais, indústrias sensíveis ou instalações de tecnologia da

informação, onde a interrupção do fornecimento de energia pode ter consequências significativas. Ela é um exemplo de como a engenharia elétrica avançada é usada para garantir um fornecimento confiável de energia elétrica. A seleção e a manutenção adequadas dos dispositivos de comutação, como os disjuntores e meio, são fundamentais para o desempenho confiável da subestação. O diagrama de configuração de uma barra dupla com disjuntor e meio é representado na Figura 4.

Figura 4 – Configuração em barra dupla com disjuntor e meio



Fonte: Frontin, 2013.

2.2.2 Sistemas Auxiliares em Subestações

2.2.2.1 Transformador de Serviços Auxiliares em Subestações Elétricas

Os transformadores de serviços auxiliares são, segundo Garcia (2012), Ghelere (2022) e Ferreira (2012), dispositivos projetados para alimentar equipamentos e sistemas secundários em uma instalação elétrica, não estando diretamente ligados a funções de transmissão ou distribuição principal de energia. Esses equipamentos são comumente utilizados para fornecer energia a sistemas internos, como iluminação, sistemas de controle, dispositivos de segurança e outros equipamentos auxiliares em instalações industriais, comerciais ou de infraestrutura.

Os transformadores auxiliares podem ter uma variedade de tamanhos e capacidades, sendo especificados para projetos em função das necessidades específicas dos sistemas auxiliares da instalação. De modo geral, segundo Ghelere (2022), o transformador de serviços auxiliares é um transformador de baixa potência, com potência nominal inferior a 100 kVA e

projetado para operar em condições adversas, como ambientes úmidos e com altas temperaturas.

Segundo a NBR 14039, que trata de instalações elétricas de média tensão, as características técnicas do transformador de serviços auxiliares são definidas de acordo com a sua função e as condições de operação a qual serão empregados. As características técnicas mais importantes incluem:

- Potência nominal: A potência nominal do transformador de serviços auxiliares é a potência máxima que ele pode fornecer.
- Tensão nominal: A tensão nominal do transformador de serviços auxiliares é a tensão entre os enrolamentos primário e secundário.
- Corrente nominal: A corrente nominal do transformador de serviços auxiliares é a corrente máxima que pode circular pelo enrolamento primário.

Os transformadores de serviços auxiliares podem ser classificados de acordo com o seguinte:

- Tipo de construção: Os transformadores de serviços auxiliares podem ser construídos em enrolamentos secos ou em enrolamentos com líquido isolante.
- Número de fases: Os transformadores de serviços auxiliares podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos.
- Frequência: Os transformadores de serviços auxiliares podem ser projetados para operar em frequências de 50 Hz ou 60 Hz.

A manutenção do transformador de serviços auxiliares é essencial para garantir o seu bom funcionamento e a sua vida útil. A manutenção deve ser realizada de acordo com as recomendações do fabricante (OLIVEIRA, 2012). As atividades de manutenção mais comuns incluem:

- Inspeção visual: A inspeção visual deve ser realizada periodicamente para verificar a integridade do equipamento.
- Testes de desempenho: Os testes de desempenho devem ser realizados periodicamente para verificar o funcionamento do equipamento.
- Manutenção preventiva: A manutenção preventiva deve ser realizada para evitar problemas no equipamento.

2.2.2.2 Bancos de Baterias em Subestações Elétricas

Os bancos de baterias são dispositivos empregados no armazenamento energia elétrica, atuando principalmente, dentro de aplicações em subestações, no fornecer energia elétrica para os equipamentos auxiliares em caso de falha na rede elétrica por um período de tempo limitado, garantindo a continuidade de serviços e sistemas essenciais, mesmo em caso de falha na rede elétrica, enquanto sistemas de geração de emergência não entram em operação ou ocorre o reestabelecimento do sistema de energia (SILVA, 2022).

Os serviços auxiliares que o banco de bateriam apoiam podem ser divididos em dois tipos: Serviços auxiliares de CA, fornecendo energia em corrente alternada (CA), para os diferentes sistemas da subestação, sendo empregado o uso de inversores ligados aos bancos de baterias, ou serviços auxiliares de CC, que fornecem energia em corrente contínua (CC) para os sistemas de proteção e controle da subestação (SILVA, 2022).

As baterias, segundo Silva (2022) correspondem a um conjunto de acumuladores eletroquímicos, nos quais, a partir de reações de oxirredução, ocorre a produção de uma corrente elétrica. Para suprir as demandas de um sistema de serviço auxiliar é necessário o uso de retificadores para que bancos de baterias para que os sistemas funcionem de forma ininterrupta sob uma taxa de descarga constante. Com base no citado pode-se destacar quatro principais tipos de baterias recarregáveis em comercialização, sendo eles:

- Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd): acumulador recarregável com baixa densidade de acumulo energético e apresentar composição com materiais tóxicos;
- Baterias de Níquel-Hidreto Metálico (Ni-Mh): acumulador recarregável de alta densidade de energia e com menor nível de toxidade que a bateria de Ni-Cd. Apresenta vida útil mais longa, entretanto, apresenta um custo de aquisição elevado;
- Baterias de Lítio-Íon (Li-Íon): acumulador estável, recarregável baseado em sais de Lítio. Apresentam um custo elevado, limitações de temperatura de operação e risco de combustão por curtos ou danos; e
- Bateria Chumbo-ácido (Pb-ácido): acumuladores caracterizados por seu baixo custo e com alta taxa de reciclagem, sendo amplamente disponíveis em variedade de tamanhos e capacidades. Resistência a altas temperaturas de operação, menos propensas a riscos de incêndio por dano ou curto. Os acumuladores desse tipo têm vida útil limitada entre 200 a 300 ciclos de carga e descarga

Uma das principais aplicações de baterias é no sistema estacionárias, sendo destinado a altos ciclos de descarga profundo e em aplicações que não precisam a locomoção do

dispositivo (MOURA, 2012). Os acumuladores estacionários são semelhantes aos acumuladores chumbo-ácido convencionais, porém preparados para fornecimento contínuo de energia por longos períodos sem interrupção e comumente aplicados em sistemas de telecomunicações, sistema de controle, sinalizações, alarme e telemedição de subestações.

Os acumuladores estacionários de chumbo-ácido podem ser de vários tipos, como por exemplo AGM VRLA, GEL VRLA ou ventilados. A diferença entre elas é a forma como o eletrólito é constituído. Os acumuladores do tipo AGM VRLA usam o eletrólito absorvido em manta de microfibras, assegurando uma boa reação química e indicado para instalação em locais abrigados. Os acumuladores do tipo GEL VRLA tem suas células submergidas em um eletrólito de alta viscosidade, permitindo mais resistência a temperaturas externas, resistem melhor a choques e vibrações. Por fim os acumuladores do tipo ventilados também são acumuladores onde suas células são seladas e submergidas em um eletrólito líquido, a base de ácido sulfúrico, com terminais expostos, garantindo uma vida útil superior, e alto desempenho no fornecimento energético (SILVA, 2022).

O dimensionamento de acumuladores baseia-se na necessidade que os sistemas auxiliares de uma subestação iram demandar. Nesse cenário, segundo Silva (2022), os fatores são de tensão nominal do sistema, perfil de descarga e fatores de correção devem ser levando em consideração para determinar o arranjo de baterias.

O perfil de descarga dos bancos de baterias, segundo a NBR 15254, demanda a consideração das descargas contínuas, não contínuas, momentâneas e aleatórias. Nesse cenário cargas permanentemente, como relés de proteção, relés de supervisão de tensão, painéis de proteção e seus componentes, tendem a apresentar um consumo de corrente constante por longos períodos de tempo, enquanto as cargas de tempo limitado como fechamento de disjuntor de potência, usam altas cargas por espaços de tempo não tão longos. Já as cargas momentâneas, presentes em bobinas de abertura de disjuntores usam altas cargas por curto espaços de tempo.

2.2.2.3 Gerador de emergência em subestações elétricas

O gerador de emergência, segundo Cavalcanti (2023), é um equipamento essencial para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica em subestações, sendo utilizado em caso de falha na rede elétrica, para fornecer energia elétrica para os equipamentos principais da subestação.

Os geradores de emergência, em geral, convertem energia química, proveniente da queima do combustível, em energia elétrica. O motor empregado no gerador pode utilizar

diesel, a gás natural ou até gasolina (CAVALCANTI, 2023). O banco de baterias tem função essencial para que o gerador saia da inércia e inicie a geração de energia (SILVA, 2022)

O emprego de geradores pode ocorrer, segundo Cavalcante (2023), pode abranger uma série de situações, como uma fonte para cargas essenciais em caso de falha da fonte principal. Para as subestações brasileiras o mais comum é o emprego dos geradores com velocidade de operação constante, produzindo energia com uma frequência de geração em 60Hz. A velocidade dos geradores médias de rotação dependem do porte do gerador. Geradores a diesel ou gás natural, a exemplo dos modelos *Wartsila*, tem rotação em média de 700 RPM, enquanto geradores a gasolina apresenta rotação entre 1800 e 3600 RPM.

Segundo Silva (2022) e Schmoeller (2019) o dimensionamento dos geradores de emergência ocorre em função da carga de pico, minimizando problema relacionados a flutuação da carga, evitando maiores perdas de rendimentos em geradores a diesel. De modo geral os rendimentos dos gerados são inferiores a 50% e, para um mesmo tipo e classe de gerador, varia em função do tipo de combustível usado. A Tabela 1 apresenta o rendimento máximo esperado por tipo de combustível.

Tabela 1 - Rendimento máximo percentual esperado em função do tipo de combustível

Combustível	Rendimento máximo (%) esperado
Diesel	36 - 41
Gasolina	25 - 32
Gás natural	31 - 36
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	30 - 35

Fonte: Schmoeller (2019).

O rendimento do gerador é sempre inferior a 50% devido às perdas, as quais são transformadas em calor, queima incompleta do combustível, atrito, vibração e ruído. Em subestações, a seleção e dimensionamento de motores incluem a análise da potência, corrente de partida e corrente nominal, são aspectos cruciais para garantir a operação segura, eficiente e confiável da instalação. A potência do gerador, medida em cavalos-vapor (CV) ou kilowatts (kW), determinando assim a sua capacidade de realizar trabalho e sendo influenciada por fatores como torque necessário, velocidade de operação e eficiência. Durante a partida, a corrente demandada pelo motor pode ser até 8 vezes superior à sua corrente nominal, o que pode causar quedas de tensão, sobrecargas nos cabos e disjuntores, além de aumentar o consumo de energia (SCHMOELLER, 2019).

2.3 Revisão das normas, procedimento de rede e instruções técnicas

2.3.1 NBR 5460

A NBR 5460 trata especificamente das "Subestações elétricas". Esta norma estabelece as definições, características e requisitos mínimos para o projeto, construção, operação e manutenção de subestações elétricas, abrangendo aspectos como segurança, dimensionamento dos equipamentos, instalação elétrica, proteção contra descargas atmosféricas, entre outros. Ela é fundamental para garantir a eficiência e a segurança das subestações elétricas no Brasil, estabelecendo padrões a serem seguidos em sua concepção e operação.

A NBR 5460 aborda os requisitos e diretrizes para o projeto de subestações elétricas, trazendo como os requisitos para o layout da subestação, estabelecendo que:

- Os equipamentos da subestação devem ser dispostos de maneira a garantir um fluxo de energia eficiente e uma operação segura. O layout deve incluir a localização estratégica de transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, capacitores, entre outros, levando em consideração fatores como acessibilidade para manutenção, distâncias de segurança, ventilação adequada, entre outros;

- Os barramentos elétricos devem ser dispostos de forma a minimizar perdas de energia, reduzir interferências e facilitar a expansão futura da subestação, devendo levar em consideração a capacidade e redundância da subestação;

- A norma especifica os espaçamentos mínimos requeridos entre os diferentes equipamentos da subestação, a fim de garantir a segurança operacional e evitar possíveis interações prejudiciais entre os equipamentos. As distancias entre os equipamentos de uma subestação estão disponíveis na Tabela 2:

Tabela 2- Tabela exemplificativa dos espaçamentos mínimos requeridos entre diferentes equipamentos da subestação

Equipamentos	Espaçamento Mínimo Requerido
Transformador - Transformador	3 metros ou conforme especificação do fabricante
Transformador - Disjuntor	2 metros
Transformador - Chave Seccionadora	1 metro
Disjuntor - Disjuntor	1 metro
Disjuntor - Chave Seccionadora	1 metro
Chave Seccionadora - Chave Seccionadora	0,5 metro
Painéis Elétricos - Parede ou Obstáculo	0,5 metro
Painéis Elétricos - Painéis Elétricos	0,5 metro
Painéis Elétricos - Equipamentos Adjacentes	0,5 metro
Equipamentos - Muro ou Edificação	1 metro
Equipamentos - Acesso de Veículos	3 metros ou conforme especificação do projeto

Fonte: - NBR 5460 - Adaptado

- O layout da subestação também deve levar em consideração a proteção contra riscos ambientais, como inundações, incêndios, explosões, descargas atmosféricas, devendo incluir a seleção de locais elevados e protegidos;
- A norma também descreve os critérios para a seleção de equipamentos elétricos, como transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, para garantir que atendam às necessidades específicas da subestação em termos de capacidade, confiabilidade e eficiência;
- A norma especifica os requisitos para o dimensionamento dos cabos e condutores elétricos que interconectam os equipamentos da subestação, levando em consideração parâmetros como corrente nominal, queda de tensão e curto-circuito;

2.3.2 NBR 5410

A NBR 5410 define as condições gerais de segurança para garantir a proteção de pessoas e bens contra os riscos elétricos em instalações elétricas de baixa tensão, abrangendo as medidas de proteção contra choques elétricos, incêndios e outros perigos.

A norma NBR5410, assim como a norma NBR14039 estabelece os limites de tensão nominal de até 500V para os circuitos de Força, 250V para os circuitos de iluminação e tomadas, 24V para os circuitos de sinalização e 120V para os circuitos de Telecomunicações. Para o sistema de aterramento, que deve ser nos padrões: TN-S, TN-C, TT ou IT Resumo Detalhado do Capítulo 4 da NBR 5410: Condições de Utilização

A norma NBR 5410 estabelece que a temperatura máxima de operação dos equipamentos deva ser de 70°C, não devendo exceder 90°C nos cabos. A temperatura ambiente também deve é estipulada, devendo ficar entre 40 e 50°C e umidade máxima de 95% em situações sem condensação. No caso de estações em localizações quentes ou de elevada umidade deve-se ter medidas especiais de proteção.

De acordo com a NBR 5410 o dimensionamento do eletrodo de aterramento, bem como a implementação de dispositivos de proteção contra choques elétricos, isolamento das partes vivas e obstáculos à aproximação das partes vivas são aspectos fundamentais para garantir a segurança das pessoas e a integridade dos equipamentos. O eletrodo de aterramento, responsável por criar uma ligação segura entre as partes condutoras expostas e a terra, deve levar em consideração fatores como resistividade do solo, corrente de falta esperada e tipo de instalação. Os cabos de condução (PE) devem ser dimensionados de acordo com a corrente de curto-circuito esperada, garantindo a eficácia do sistema de proteção contra choques elétricos.

A norma ainda estabelece as distâncias mínimas de isolamento entre partes vivas das instalações elétricas, especificando-as em termos de "zonas" de proteção, com valores definidos em função da natureza da superfície e a presença de obstáculos.

A NBR 5410 estabelece especificações detalhadas sobre a identificação dos condutores elétricos, incluindo as cores a serem utilizadas, métodos de identificação por meio de etiquetas e outros dispositivos, bem como a necessidade de placas com informações sobre o equipamento. Aqui estão as principais especificações relacionadas a esses pontos:

Os identificação dos Condutores é baseado em sistema de cores, onde a norma estabelece um código de cores para identificar os diferentes tipos de condutores elétricos, onde: Condutor de fase é geralmente é identificado pela cor preta (ou outra cor, conforme convenção local), Condutor neutro é geralmente é identificado pela cor azul claro e o condutor de proteção (PE): geralmente é identificado pela cor verde ou verde-amarela. Etiquetas devem ser empregadas quando não é possível identificar os condutores pela cor, a norma permite o uso de etiquetas ou outros métodos de identificação, desde que sejam duráveis, legíveis e não sejam facilmente removidos. A NBR 5410 exige a instalação de placas com informações sobre o equipamento elétrico sempre que necessário para garantir a segurança e facilitar a manutenção. Essas placas devem conter informações importantes, como:

- Identificação do equipamento (marca, modelo, número de série);
- Dados técnicos relevantes (tensão nominal, corrente nominal, potência, etc.);
- Instruções de operação, manutenção e segurança; e
- Símbolos gráficos indicando a função do equipamento e suas características elétricas.

Essas placas são especialmente importantes em equipamentos elétricos de maior porte, como quadros de distribuição, transformadores, disjuntores, entre outros, onde é essencial garantir que os operadores e técnicos tenham acesso rápido e fácil às informações relevantes.

A NBR 5410 ainda estabelece diretrizes específicas para os cabos unipolares, bipolares, tripolares e multipolares utilizados em instalações elétricas fixas de baixa tensão, determinando requisitos para a seção transversal mínima dos condutores, isolamento, cobertura e resistência mecânica, levando em consideração a corrente nominal, a temperatura ambiente, resistência mecânica, proteção contra agentes externos (umidade, corrosão, radiação solar, etc.) e adequação ao ambiente de instalação (interno, externo, enterrado, etc.).

A norma também aborda diferentes tipos de disjuntores utilizados para proteger os circuitos contra sobrecargas e curto-circuito. Isso inclui disjuntores unipolares, bipolares, tripolares, entre outros, que podem ser utilizados em circuitos monofásicos ou trifásicos, dependendo das necessidades da instalação. Os disjuntores são dimensionados de acordo com a corrente nominal do circuito que eles protegem, levando em consideração fatores como a natureza da carga, o tipo de instalação e a temperatura ambiente.

2.3.3 NBR 15254

A norma ABNT NBR 15254 trata especificamente de acumuladores de chumbo-ácido estacionários. A norma estabelece diretrizes para o dimensionamento, instalação, operação e manutenção desses acumuladores, com o objetivo de garantir a segurança e o bom desempenho das instalações.

Segundo a norma NBR 15254, os acumuladores de chumbo-ácido estacionários podem ser classificados com base em sua construção interna. Existem diferentes tipos de construção, como células abertas, células fechadas com placas planas, células fechadas com placas tubulares, entre outros. Outro critério importante para classificar os acumuladores de chumbo-ácido estacionários é o tipo de eletrólito utilizado. O eletrólito pode ser líquido ou gelificado. Acumuladores com eletrólito líquido são mais comuns e tradicionais, enquanto os acumuladores com eletrólito gelificado oferecem algumas vantagens, como menor manutenção, maior resistência a vazamentos e maior vida útil em determinadas condições de operação. Quanto a aplicação, os acumuladores de chumbo-ácido estacionários podem ser classificados de acordo com sua aplicação específica. Por exemplo, podem ser utilizados em sistemas de energia de reserva para telecomunicações, sistemas de energia solar fotovoltaica, sistemas de energia de emergência em hospitais, sistemas de backup de data centers, entre outros. A escolha do acumulador adequado dependerá das exigências de cada aplicação em termos de capacidade, ciclo de vida, confiabilidade e custo.

Os acumuladores de chumbo-ácido estacionários, segundo a NBR 15254, devem ser tratados como componentes essenciais em sistemas de energia de reserva, fornecendo energia quando necessário e armazenando-a para uso futuro. A tensão nominal dos acumuladores de chumbo-ácido estacionários varia de acordo com o número de células em série e sua vida útil é influenciada por diversos fatores, como a temperatura de operação, o modo de operação (ciclagem frequente, descargas profundas, flutuação de carga), e a manutenção adequada. A eficiência dos acumuladores de chumbo-ácido estacionários está na faixa de 80% a 90%, dependendo das condições de operação e do projeto do acumulador.

O dimensionamento correto dos bancos de bateria, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 15254, deve levar em consideração a capacidade de armazenamento de energia necessária para suprir a carga durante o período desejado de operação autônoma, considerando fatores como a potência da carga, o tempo de autonomia requerido e as condições de operação do sistema. Outro fator considerado no dimensionamento é o cálculo da corrente de descarga necessária para alimentar a carga durante o período de autonomia desejado. Isso é influenciado pela potência da carga e pela corrente de descarga máxima suportada pelo banco de baterias. Por norma, recomenda-se incluir um fator de segurança no dimensionamento do banco de baterias para lidar com variações na carga, condições ambientais adversas, degradação ao longo do tempo e outros fatores imprevistos que possam afetar o desempenho do sistema. Com o dimensionamento adequado do banco de baterias é possível garantir uma vida útil satisfatória dos acumuladores por meio da operação do banco dentro das faixas de temperatura recomendadas, mantendo uma corrente de carga adequada e realizar manutenção regular do sistema de carga e descarga.

A norma ABNT NBR 15254 estabelece que os acumuladores devem ser instalados em locais adequados, protegidos contra intempéries, umidade excessiva, poeira, gases corrosivos e outras condições ambientais adversas que possam comprometer o desempenho e a vida útil dos acumuladores. Por norma é importante garantir uma ventilação adequada ao redor dos acumuladores para dissipar o calor gerado durante o processo de carga e descarga. Isso ajuda a evitar o superaquecimento dos acumuladores e reduz o risco de acumulação de gases explosivos, como o hidrogênio. Os acumuladores devem ser devidamente fixados e suportados em estruturas adequadas para evitar movimentos excessivos e garantir sua estabilidade durante a operação. Isso ajuda a prevenir danos mecânicos aos acumuladores e assegura a integridade do sistema. Por fim as conexões elétricas entre os acumuladores e os outros componentes do sistema devem ser realizadas de forma segura e conforme as especificações do fabricante. Isso inclui o uso de cabos de cobre adequados, terminais de conexão apropriados e aperto correto dos parafusos para evitar resistência elétrica excessiva e aquecimento indesejado.

Outro ponto importante especificado por norma é que se deve providenciar dispositivos de proteção contra curto-circuito, como fusíveis ou disjuntores, nas conexões elétricas dos acumuladores para proteger o sistema contra danos em caso de falhas elétricas. Os acumuladores devem ser adequadamente aterrados de acordo com as normas e regulamentos aplicáveis para garantir a segurança dos operadores e prevenir riscos de choque elétrico. Os acumuladores e as conexões elétricas devem ser devidamente sinalizados e identificados para facilitar a operação, manutenção e inspeção do sistema. Isso inclui a etiquetagem dos

acumuladores com informações como capacidade nominal, data de fabricação e precauções de segurança.

A norma ABNT NBR 15254 fornece instruções detalhadas para a operação e manutenção dos acumuladores de chumbo-ácido estacionários, estabelecendo procedimentos para a operação adequada dos acumuladores, incluindo instruções para carga e descarga dos acumuladores, procedimentos de equalização, monitoramento da tensão e da temperatura, entre outros.

A norma enfatiza a importância da manutenção preventiva dos acumuladores, que inclui inspeções regulares, limpeza dos terminais, verificação da densidade e nível do eletrólito (quando aplicável), aperto dos terminais e conexões elétricas, entre outros. A manutenção preventiva ajuda a identificar e corrigir problemas antes que eles se tornem graves, garantindo assim a operação contínua do sistema. A norma recomenda o monitoramento regular de parâmetros como tensão, corrente, temperatura e densidade do eletrólito (quando aplicável) para avaliar o estado de saúde dos acumuladores e identificar quaisquer anomalias que possam indicar problemas de desempenho ou degradação. Isso permite que medidas corretivas sejam tomadas a tempo para evitar falhas catastróficas.

Para manutenção de banco de baterias existe a necessidade de manter registros detalhados de dados e eventos relacionados aos acumuladores, incluindo datas de instalação, datas de manutenção, dados de desempenho (tensão, corrente, temperatura), eventos de carga e descarga, entre outros. Esses registros fornecem uma base histórica para avaliar o desempenho dos acumuladores ao longo do tempo e ajudam na programação de manutenção futura.

2.3.4 Procedimento de rede

O Procedimento de Rede (PR) é um conjunto de normas, procedimentos e diretrizes estabelecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no Brasil. Ele define as regras para operação, planejamento, expansão e manutenção do Sistema Interligado Nacional (SIN), que é responsável pela integração e operação coordenada dos sistemas elétricos de diferentes regiões do país.

Os Procedimentos de Rede são elaborados pelo ONS em conformidade com as diretrizes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e são essenciais para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência do sistema elétrico brasileiro. Eles abrangem uma ampla variedade de aspectos, como despacho de geração, operação de linhas de transmissão, coordenação entre agentes do setor elétrico, planejamento da expansão do sistema, entre outros.

2.3.4.1 Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos

Esse documento define os critérios técnicos que as subestações elétricas e seus equipamentos devem atender para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência do Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil.

O requisito mencionado estabelece que os serviços auxiliares de corrente contínua (CC), destinados a alimentar os sistemas de proteção, supervisão e controle em subestações elétricas, devem ser redundantes e resilientes. Ele especifica que devem existir dois conjuntos independentes de bancos de baterias, cada um com seus próprios retificadores, alimentando cargas independentes.

Essa redundância garante que, em caso de falha em um dos conjuntos, o outro possa manter a alimentação dos sistemas críticos, garantindo a continuidade das operações de proteção, supervisão e controle. Além disso, cada conjunto de baterias e retificadores deve ser dimensionado para suprir toda a carga prevista em regime contínuo, garantindo que haja capacidade suficiente para operação normal, mesmo em condições adversas.

Essa prática é fundamental para assegurar a confiabilidade e a disponibilidade dos serviços auxiliares de corrente contínua, contribuindo para a segurança e o funcionamento adequado das subestações elétricas.

O requisito mencionado estabelece também que os serviços auxiliares em corrente alternada (CA) devem ter pelo menos duas fontes de alimentação para garantir a redundância e a confiabilidade do fornecimento de energia. Essas fontes podem ser configuradas de duas maneiras:

(a) Uma fonte externa proveniente da distribuidora local, como a rede elétrica da região, e outra fonte interna da própria subestação. Essa configuração aproveita uma fonte externa confiável, como a energia da distribuidora, combinada com uma fonte interna para garantir a continuidade do fornecimento de energia, mesmo em caso de falha na fonte externa.

(b) Duas fontes internas da própria subestação. Nessa configuração, as duas fontes de alimentação são fornecidas internamente pela subestação, o que elimina a dependência de uma fonte externa, como a distribuidora local. Isso garante uma redundância total dentro da própria subestação, oferecendo uma solução autônoma para o fornecimento de energia aos serviços auxiliares.

Essas configurações são projetadas para garantir a disponibilidade contínua dos serviços auxiliares em corrente alternada, mesmo em caso de falha em uma das fontes de alimentação.

Dessa forma, a segurança e a confiabilidade das operações da subestação elétrica são mantidas em diversas condições operacionais.

2.3.4.2 Submódulo 2.11 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção

Este procedimento estabelece os critérios e diretrizes para garantir a segurança e a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio dos sistemas de proteção, registro de perturbações e teleproteção.

Como o tópico 3.1.9 do submódulo faz o requerimento que os sistemas de proteção devem ter dois circuitos de disparo independentes para acionamento de disjuntores, com duas bobinas de disparo. Possuir dois circuitos de disparo independentes, cada um com sua própria bobina de disparo, aumenta a confiabilidade do sistema de proteção. Isso significa que, caso um circuito ou uma bobina falhe, o outro circuito ainda estará operacional para acionar o disjuntor quando necessário. Essa redundância é crucial para garantir que os disjuntores sejam abertos de forma rápida e confiável em situações de emergência, como curtos-circuitos ou sobrecargas, ajudando a proteger o sistema elétrico contra danos e a manter a segurança e a continuidade do fornecimento de energia.

Em resumo, o PR 2.11 da ONS estabelece os requisitos mínimos para os sistemas de proteção, registro de perturbações e teleproteção, visando garantir a integridade, a segurança e a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) e, conseqüentemente, o fornecimento estável de energia elétrica para os consumidores.

2.3.5 Instruções técnicas

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) é uma empresa brasileira de energia, uma das subsidiárias da Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras). Fundada em 1948, é uma das maiores empresas do setor elétrico do Brasil.

A Chesf é responsável pela geração e transmissão de energia elétrica, principalmente na região Nordeste do Brasil, onde opera um grande número de usinas hidrelétricas ao longo do rio São Francisco. Suas atividades incluem a operação de hidrelétricas, subestações, linhas de transmissão e outros equipamentos relacionados à produção e distribuição de energia.

Esses documentos são fundamentais para padronizar as práticas e procedimentos dentro da Chesf, garantindo que todas as atividades sejam realizadas de acordo com os mais altos padrões de qualidade, segurança e eficiência. Além disso, as instruções técnicas também servem

como referência para treinamento de funcionários, auditorias internas e externas, e para garantir a conformidade com regulamentos e legislações aplicáveis ao setor elétrico.

2.3.5.1 Instruções técnicas - Critério de dimensionamento dos transformadores de serviços auxiliares e grupo motor gerador diesel de emergência (IT-DEEC-09/2010)

A Instrução Técnica estabelece diretrizes para o dimensionamento adequado desses equipamentos, garantindo a confiabilidade e a disponibilidade dos serviços essenciais em suas instalações.

Os transformadores de serviços auxiliares são fundamentais para alimentar os sistemas de controle, proteção e supervisão das subestações elétricas e das usinas geradoras. Além disso, os grupos motores gerador diesel de emergência são responsáveis por fornecer energia elétrica em casos de falha na energia principal.

2.3.5.2 Instruções técnicas - Critério de dimensionamento para banco de baterias e carregador/retificador (IT-DEEC-010/2010)

Essa instrução técnica é de suma importância, pois os bancos de baterias são essenciais para fornecer energia em situações de emergência ou quando há interrupção no fornecimento de energia elétrica principal. Eles garantem a operação contínua de equipamentos críticos, como sistemas de proteção, controle e supervisão, mesmo em condições adversas.

Alguns aspectos que podem ser abordados na IT-DEEC-010/2010 incluem:

- **Dimensionamento dos Bancos de Baterias:** Define os critérios para calcular a capacidade de armazenamento de energia necessária dos bancos de baterias, levando em consideração fatores como a carga esperada, a autonomia desejada e a confiabilidade do sistema.
- **Carregadores/Retificadores:** Estabelece os requisitos técnicos para os carregadores/retificadores que serão responsáveis por recarregar as baterias quando a energia principal estiver disponível, garantindo que elas estejam sempre prontas para uso.

2.3.5.3; Instruções técnicas - Critério de dimensionamento das seções de condutores para serviços auxiliares de corrente alternada e corrente contínua e coordenação de seletividade dos disjuntores (IT-DETA-010/2017)

Essa instrução técnica é fundamental para garantir que as seções de condutores sejam dimensionadas de maneira adequada para suportar as correntes elétricas exigidas pelos sistemas auxiliares, tanto em regime permanente quanto em situações de sobrecarga temporária. Além disso, a coordenação de seletividade dos disjuntores é um aspecto importante abordado na instrução, garantindo que, em caso de falha ou curto-circuito em um ponto específico do sistema, apenas o disjuntor correspondente seja desligado, minimizando o impacto nas operações.

Alguns aspectos que podem ser abordados na IT-DETA-010/2017 incluem:

- Dimensionamento das Seções de Condutores: Define os critérios para calcular a seção transversal dos condutores, levando em consideração a carga elétrica prevista, a queda de tensão permitida, a temperatura ambiente, entre outros fatores.
- Coordenação de Seletividade dos Disjuntores: Estabelece os critérios para garantir a coordenação entre os disjuntores, de modo que, em caso de falha em um ponto específico do sistema, apenas o disjuntor mais próximo do ponto de falha seja desligado, isolando o problema e mantendo o restante do sistema operacional.

Essa instrução técnica é elaborada para garantir que os sistemas de serviços auxiliares de corrente alternada e corrente contínua nas instalações da Chesf sejam dimensionados e operados de maneira segura, confiável e eficiente, atendendo às demandas operacionais e de segurança da empresa.

CAPITULO III

3. METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento de um modelo típico de subestação para a elaboração da memória de cálculo

Os procedimentos adotados e empregados na elaboração de memoriais de cálculo, principalmente quando aplicados a sistemas de subestação, visam fornecer subsídios mínimos para a elaboração e a apresentação de cálculo embasados para dimensionamento de diversos subsistemas das subestações, como condutores, seletividade dos disjuntores dos serviços auxiliares e transformadores. O uso desses procedimentos visa minimizar a escolha aleatória dos componentes e são amplamente adotados pelo setor elétrico do Brasil.

A escolha por um modelo típico de subestação decorre de que o uso de projetos específicos de subestação não é de livre divulgação, visto que são propriedade de empresas privadas que atuam de forma incisiva em um setor estratégico nacional e têm diversos concorrentes dentro do mesmo setor. Tendo em vista tal limitação, usar um modelo típico de subestação de alta tensão tem várias vantagens ao criar uma memória de cálculo, sendo eles:

- Acessibilidade a modelos amplamente disponíveis na literatura técnica, em manuais e em normas, tornando-os facilmente acessíveis para fins acadêmicos;
- Flexibilidade em adaptar e ajustar os parâmetros conforme necessário para minimizar complexidade de cálculo e explorar diferentes cenários e condições de operação;
- Conformidade com regulamentos de confidencialidade e propriedade intelectual;
- Independência de informações fornecidas por empresas privadas, garantindo a imparcialidade e a objetividade na análise, minimizando possíveis conflitos de interesse; e
- Oportunidade de entender os princípios fundamentais por trás do dimensionamento de subestações.

Os critérios e modelos empregados neste trabalho não possuem caráter definitivo, uma vez que as normas que embasam o setor estão em constante revisão e aprimoramento para melhorar a confiabilidade e melhoria dos procedimentos técnico, podendo ser modificadas sempre que seja detectado um fato novo que contribua para o aperfeiçoamento desta instrução.

Para desenvolvimento da memória de cálculo foi adotado a criação de uma subestação fictícia, cujo esquema elétrico é um modelo típico de subestação de alta tensão. Do ponto de

vista didático a estação analisada é uma representação simplificada e esquemática das principais partes e componentes de uma subestação elétrica. Esse modelo tem o objetivo de fornecer uma compreensão básica da estrutura e funcionamento de uma subestação, sem entrar em detalhes técnicos complexos.

O modelo típico é relacionado a necessidade de seccionamento de uma linha de transmissão que é feito por meio de uma subestação seccionadora que terá como nível de tensão 230 kV.

Os serviços auxiliares deverão atender o setor de 230 kV da subestação, arranjo barra dupla a quatro chaves (BD4), que compreende:

- 4 vãos de Entrada de Linhas;
- 1 interligação de barras.

No contexto do projeto, foi aplicada a normas regulamentadora ABNT NBR 5410 e para garantir o máximo possível de veracidade no estabelecimento da memória de cálculo e a confiabilidade operacional dessas instalações elétricas.

Para o cálculo foi empregado o Microsoft® Excel como ferramenta computacional. O Excel oferece vantagens significativas para realizar cálculos de dimensionamento de subestações devido à sua interface intuitiva, flexibilidade para manipular dados e capacidade de automatizar cálculos complexos, permitindo obter planilhas personalizadas documentadas de forma organizada, fornecendo uma referência clara e editável.

3.2 Desenvolvimento de Cálculos:

Para o detalhamento dos cálculos presumiu-se que os serviços auxiliares devem atender a todas as necessidades na subestação com setor 230 kV, apresentando um arranjo de barra dupla a 4 chaves. O transformador de serviços auxiliares e o grupo motor gerador de emergência opera a uma tensão de 380/220 Vca e a bateria e carregador/retificador atender as cargas a uma tensão de 125 Vcc. Além disso as baterias as do tipo estacionárias ventiladas (Tipo OPzS). Por fim serão calculados 3 tipos de fonte para atender os serviços auxiliares de corrente alternada que serão um transformador e um grupo motor gerador com potência para todas as cargas da subestação e um grupo motor gerador com caráter emergencial.

3.2.1 Dimensionamento de Transformador de Serviços Auxiliares (TSA) e Grupo Motor Gerador (GMG)

O dimensionamento da potência nominal do transformador deverá atender aos requisitos indicados no item 6.1 da da instrução técnica da CHESF nº IT-DEEC-009/2010 (“Critério de

Dimensionamento para Transformadores de Serviços Auxiliares e Grupo Motor Gerador Diesel de Emergência”). Para o dimensionamento deve-se estimar 3 tipos de cargas, sendo elas: cargas permanentes essenciais e não essenciais, cargas intermitentes, simultâneas, essenciais e cargas não essenciais e cargas eventuais, simultâneas, essenciais e não essenciais.

Segundo o item 4 da instrução técnica da CHESF (IT-DEEC-009/2010) as cargas tem uma classificação quanto à sua importância, essa classificação pode ser dividida em:

Cargas essenciais: cargas que devem ter suprimento de energia sem interrupção, sendo necessárias para iniciar o processo de recomposição da subestação em caso de desligamento total ou parcial (Relés de supervisão de falta CC, acionamento de disjuntores e seccionadoras, carregadores/retificadores, ar-condicionado das edificações, comutadores e controle de paralelismo associados aos transformadores de força, parte da iluminação e tomada de pátios e acessos, relés/solenoides/contactores associados a sistemas de controle dos equipamentos de pátio, exaustores da sala de baterias).

Cargas não essenciais: cargas que admitem interrupção em sua alimentação por tempo prolongado (Iluminação e aquecimento internos de equipamentos de pátio, iluminação e aquecimento internos de painéis, aquecimento e carregador/retificador dos grupos motor gerador de emergência, tomadas de equipamentos de pátios e edificações, parte da iluminação e tomadas de uso geral dos pátios, sistema de abastecimento de água, sistema de ventilação forçada dos transformadores de potência, fogões refrigeradores e chuveiros elétricos).

Além disso as cargas podem ser classificadas quanto a sua duração, conforme a seguinte divisão:

Cargas permanentes: cargas que estão acionadas continuamente (Iluminação da casa de comando, carga permanente dos carregadores/retificadores, exaustores da sala de baterias, registradores e totalizadores, sinalização de torre de microondas, relés/solenoides/contactores associados a um sistema de controle de equipamentos do pátio, aquecimento de equipamentos do pátio e GMG independentes de termostato).

Cargas intermitentes: cargas que são acionadas em intervalos periódicos ou regulares de tempo (Ventilação forçada dos transformadores e autotransformadores de potência, comutadores e controle associado dos transformadores de força, acionamento de disjuntores e seccionadoras, iluminação do pátio e acessos, iluminação de guarita, relés/contactores/solenoides energizados quando da ativação de circuitos de controle de equipamentos do pátio, sistema de abastecimento de água, sistema de pré-aquecimento de água das GMG's, refrigeradores, fogões e chuveiros elétricos).

Cargas eventuais: cargas que são acionadas casualmente, de forma passageira e não frequentemente (Tomadas de uso geral da casa de comando, iluminação e tomadas de uso geral da casa de serviços auxiliares/telecomunicações, iluminação e tomadas de uso geral da cabana de faturamento, iluminação e tomadas de uso geral das casas e GMG, tomadas de uso geral dos pátios, relés/solenoides/contactores energizados em condições anormais de circuitos de controle, carga CA correspondente ao valor da carga CC de equalização de baterias, iluminação e aquecimento dependente de termostato de equipamento dos pátios, tomadas de equipamentos dos pátios, iluminação e aquecimento de painéis e quadros dependentes de termostato, iluminação e tomadas de depósitos, carregador/retificador e aquecimento dependente de temperatura do GMG, sistema de tratamento de óleo, sistema de supervisão de falta CC

A potência nominal (P_{NT}) do transformador deverá ser calculada conforme a instrução técnica da CHESF (IT-DEEC-009/2010) seguindo a expressão a seguir:

$$P_{NT} \geq (\sum P_{ENE} + \sum I_{ENE} + \sum E_{ENE}) * \frac{F_R}{F_S} \quad (1)$$

Onde:

$F_R = 1,1$ (Fator de segurança);

$F_S = 1,2$ (Fator de sobrecarga admissível);

$\sum P_{ENE}$ = Somatório das cargas permanentes essenciais e não essenciais em Volt-Ampere;

$\sum I_{ENE}$ = Somatório das cargas intermitentes, simultâneas, essenciais e não essenciais em Volt-Ampere;

$\sum E_{ENE}$ = Somatório das cargas eventuais, simultâneas, essenciais e não essenciais em Volt-Ampere.

O dimensionamento da potência nominal dos grupos motor-gerador deverá atender aos requisitos indicados no item 7.2 da instrução técnica CHESF (IT-DEEC-009/2010), com a observação de que o primeiro GMG (GMG1) deverá alimentar, além das cargas essenciais, as cargas não essenciais.

Para os GMG, a potência nominal (P_{NG}) será determinada pela maior potência encontrada pelas expressões a seguir:

$$P_{NG} \geq (\sum P_E + \sum I_E + \sum E_E) * \frac{1}{F_S} \quad (2)$$

$$P_{NG} \geq (\sum P_E + \sum I_E + \sum E_E - \sum D_1) * \frac{1}{F_P} \quad (3)$$

Onde:

$F_P = 0,6$ (Fator limitador de carga na partida);

$F_s = 1,1$ (Fator de sobrecarga admissível);

$\sum P_E$ = Somatório das cargas permanentes essenciais em Volt-Ampere;

$\sum I_E$ = Somatório das cargas intermitentes, simultâneas e essenciais Volt-Ampere;

$\sum E_E$ = Somatório das cargas eventuais, simultâneas e essenciais Volt-Ampere;

$\sum D_1$ = Soma das potências nominais de acionamento dos disjuntores Volt-Ampere.

3.2.2 Dimensionamento de banco de baterias e carregador retificador

O dimensionamento do banco de baterias e carregadores retificadores segue os critérios definidos na Instrução Técnica da Chesf nº IT-DEEC-010/2010 (“Critério de Dimensionamento para Banco de Baterias e Carregador/Retificador”).

O cálculo do número de elementos do banco de baterias é realizado a partir da seguinte expressão:

$$V_{min} = 0,8 * V_n \quad (4)$$

$$V_{max} = 1,1 * V_n \quad (5)$$

$$V_{final} = n * 1,75 * V_{pe} \quad (6)$$

$$V_{flutuação} = n * 2,2 * V_{pe} \quad (7)$$

Onde:

V_n = Tensão nominal do banco em Volts;

V_{min} = Tensão mínima admitida para o banco em Volts;

V_{max} = Tensão máxima admitida para o banco em Volts;

V_{final} = Tensão final do banco após descarga em Volts;

$V_{flutuação}$ = Tensão do banco de bateria em regime de flutuação em Volts;

V_{pe} = Volts por elemento;

n = Número de elementos por bateria.

A quantidade mínima de elementos n_1 será obtida por meio da substituição das equações 4 e 6. No qual $V_{min} = V_{final}$.

$$n_1 = 0,46 * V_n \quad (8)$$

A quantidade máxima de elementos n_2 será obtida por meio da substituição das equações 5 e 7. No qual $V_{max} = V_{flutuação}$.

$$n_2 = 0,5 * V_n \quad (9)$$

Assim a quantidade de elementos por bateria deverá seguir a condição da expressão:

$$n_1 \leq n \leq n_2 \quad (10)$$

Logo tensão de flutuação total da bateria ($V_{FLUTUAÇÃO}$), a tensão final (V_{FINAL}) e a tensão média ($V_{médio}$), todas unidades em Volts, são dadas por:

$$V_{FLUTUAÇÃO} = n * V_{flutuação} \quad (11)$$

$$V_{FINAL} = n * V_{final} \quad (12)$$

$$V_{médio} = \left(\frac{V_{FLUTUAÇÃO} + V_{FINAL}}{2} \right) \quad (13)$$

Segundo o item 5.2 da instrução técnica de IT-DEEC-010/2010 as cargas componentes de um ciclo emergencial de uma subestação são divididas em:

Cargas momentâneas (I_m) : representam o período que começa quando todos os disjuntores do barramento são acionados simultaneamente, durando cerca de um minuto, sendo considerado o pico inicial referente ao disparo dos disjuntores (totalidade dos disjuntores do barramento que configurar a maior carga imposta à cada banco de baterias).

Cargas permanentes (I_p) : Essas cargas referem-se aos dispositivos de medição, proteção, controle, supervisão, regulação, teleproteção, CFTV e outros sistemas essenciais da subestação que funcionam com alimentação em corrente contínua. Além disso, inclui-se a carga da iluminação e dos sistemas de emergência, que permanecerão ligados durante todo o período de emergência.

Cargas de tempo limitado (I_t): Essas cargas representam a etapa em que se tenta restaurar o sistema, buscando fechar os disjuntores críticos. Durante esse processo, é recomendado utilizar a corrente mais alta necessária para fechar esses disjuntores, levando em conta as especificações de consumo fornecidas pelos fabricantes. Se não for possível identificar o fabricante, deve-se utilizar os valores mais altos típicos dos disjuntores disponíveis no mercado.

Durante a operação padrão, o conjunto composto pelos retificadores/carregadores e o banco de baterias opera em conjunto com a carga. Nesse cenário, é esperado que o retificador/carregador forneça uma corrente aos equipamentos de proteção e controle, equivalente ao consumo permanente (I_p), além de uma parcela adicional de corrente, conhecida como corrente de flutuação, necessária para manter a bateria carregada.

Para determinar o dimensionamento adequado do retificador/carregador, serão aplicadas as seguintes equações:

$$I_{carregador} = I_p + I_{carga da bateria} \quad (14)$$

Onde:

$I_{carregador}$ = Corrente do carregador retificador em Ampere;

I_p = Corrente permanente das cargas alimentadas pela bateria em Ampere;

$I_{carga da bateria}$ = Corrente necessária para manter a bateria carregada.

Também é importante levar em conta que, caso ocorra uma falha em um dos retificadores/carregadores, o restante do sistema deve ser capaz de suprir completamente todas as demandas das cargas de corrente contínua da subestação.

A quantidade de corrente necessária para carregar a bateria é determinada utilizando a seguinte fórmula:

$$I_{carga da bateria} = \frac{K_n * C_n}{t} \quad (15)$$

Onde:

$I_{carga da bateria}$ = Corrente necessária para manter a bateria carregada;

C_n = Capacidade nominal da bateria em regime de descarga de 10 horas;

K_n = Fator que depende do tipo da bateria, para baterias chumbo
– ácidas adotar 1,1;

t = Tempo total da carga ou recarga da bateria, adotar 10 horas.

Para a potência nominal do carregador retificador será utilizado a seguinte expressão:

$$P_n = \frac{(I_{carregador} * V_n) * n}{f_p} \quad (16)$$

Onde:

P_n = Potência nominal do carregador retificador;

$I_{carga da bateria}$ = Corrente necessária para manter a bateria carregada;

V_n = Tensão nominal do sistema, padronizado como 125 Vcc;

n = rendimento;

f_p = Fator de potência.

3.2.3 Dimensionamento de cabos em corrente contínua (CC)

Os critérios utilizados para o dimensionamento das seções dos condutores seguem a norma ABNT NBR 5410 e Instrução Técnica CHESF IT-DETA-010/2017 (“Critério de Dimensionamento das Seções de Condutores para Serviços Auxiliares de Corrente Alternada e Corrente Contínua e Coordenação e Seletividade de Disjuntores”) e se baseiam em 3 critérios de dimensionamento, sendo eles:

- Critério de Capacidade de Condução de Corrente;
- Critério de Queda de Tensão;

- Critério de Curto-Circuito.

Os valores da capacidade de condução de corrente são definidos em norma e variam de acordo com o tipo do material isolante (temperatura máxima de serviço) e método de instalação dos condutores.

As tabelas 36 a 39 da NBR 5410 – “Instalações elétricas de baixa tensão” – fornecem os valores de referência. Além disso, a capacidade é afetada pela quantidade de condutores no conduto (ou canaleta) e pela temperatura ambiente, como descrito nos itens 6.2.5.3 e 6.2.5.5 da norma.

Para os cabos confinados na Casa de Comando, foi considerado fator de correção de temperatura unitário (temperatura ambiente igual a $T = 30^{\circ}\text{C}$). Para os cabos externos, foi aplicado fator igual a 0,94 para cabos instalados em canaletas (temperatura ambiente igual a $T = 35^{\circ}\text{C}$) e 0,89 para cabos instalados em eletrodutos enterrados (temperatura do solo igual a $T = 30^{\circ}\text{C}$). Esses valores são aplicados para cabos com isolamento em PVC e são apresentados na Tabela 40 da norma.

A corrente nominal do circuito (I_N) é dada pela soma das correntes permanente (I_{perm}) e transitória (I_{trans}), calculadas através das expressões:

- Corrente permanente:

$$I_{perm} = \frac{P_{perm}}{V_{min}} \quad (17)$$

Onde:

I_{perm} = Corrente Permanente do circuito em ampere;

P_{perm} = Potência nominal permanente em Watts;

V_{min} = Tensão mínima do circuito em Volts.

- Corrente transitória:

$$I_{trans} = \frac{P_{trans}}{V_{min}} \quad (18)$$

Onde:

I_{trans} = Corrente transitória do circuito em amperes;

P_{trans} = Potência nominal transitória em Watts;

V_{min} = Tensão mínima do circuito em Volts

As correntes transitórias estão relacionadas às cargas de manobra dos disjuntores (bobinas de abertura e fechamento).

Para os cabos de corrente contínua foi dimensionada uma queda de tensão nos condutores para a condição de demanda máxima de cada carga. Para uma tensão mínima de 100V foi adotada uma queda de tensão máxima de 5V, ou, 4% da tensão nominal. Na condição de demanda máxima de cada carga, a seguinte expressão foi empregada para o cálculo da queda de tensão:

$$\Delta V = \frac{200 * I * L * R}{V_N} \quad (19)$$

Onde:

ΔV = queda percentual de tensão;

I = corrente, em ampères (A), do circuito;

L = comprimento, em metros (m) do circuito;

R = resistência, em Ohms por metro (Ω/km) do condutor em corrente contínua;

V_N = tensão nominal, em volts, do circuito, equivalente a 125 Vcc.

A capacidade de condução da corrente de curto-circuito de forma segura, é essencial dimensionar a seção transversal mínima dos condutores de acordo com a corrente de curto-circuito máxima que o sistema pode suportar. A seção mínima (S) para atendimento ao critério de capacidade de condução da corrente de curto-circuito foi calculada com a seguinte expressão:

$$S = \frac{I_{cc} * \sqrt{t}}{k} \quad (20)$$

Onde:

S = seção transversal, em milímetros quadrados (mm^2) do condutor;

t = duração, em segundos (s) da corrente de curto-circuito;

I_{cc} = valor eficaz, em ampères (A), da corrente de falta;

k = ao fator de isolamento do cabo, equivalente a 114,14.

3.2.4 Dimensionamento de cabos em corrente alternada (CA)

Assim como o dimensionamento de cabos em corrente contínua, item 3.2.3, os critérios utilizados para o dimensionamento das seções dos condutores seguirão a norma ABNT NBR 5410 e Instrução Técnica CHESF IT-DETA-010/2017 (“Critério de Dimensionamento das Seções de Condutores para Serviços Auxiliares de Corrente Alternada e Corrente Contínua e Coordenação e Seletividade de Disjuntores”) e se baseará nos mesmos 3 critérios de dimensionamento.

Para os cabos que transportam corrente alternada foram considerados fator de correção de 1,00 para temperaturas de até 30°C. Para os cabos externos, foi aplicado fator igual a 0,94 para as linhas não-subterrâneas onde temperaturas são estimadas em até 35°C e 0,84 para as linhas subterrâneas cuja temperatura do solo igual a 35°C.

A corrente nominal dos circuitos corresponde a corrente elétrica que um circuito é projetado para suportar continuamente sem exceder suas especificações de segurança e desempenho. A corrente nominal dos circuitos trifásicos de corrente alternada é calculada, a partir dos valores de potência nominal, através das expressões:

$$I_{ca} = \frac{S_3}{V*\sqrt{3}} \quad (21)$$

Onde:

I_{ca} = corrente nominal do circuito, dada em amperes (A);

S_3 = potência nominal, dada em VA;

V = tensão mínima do circuito, dada em Volts.

A corrente nominal dos circuitos monofásicas de corrente alternada, por sua vez, é calculada, a partir dos valores de potência nominal, através das expressões:

$$I_{ca} = \frac{S_3}{V/\sqrt{3}} \quad (22)$$

Onde:

I_{ca} = corrente nominal do circuito, dada em amperes (A);

S_3 = potência nominal, dada em VA; e

V = tensão mínima do circuito, dada em Volts.

Para os cabos de corrente alternada foi dimensionada uma queda de tensão cuja valores máximos admissíveis são definidos no item 6.2.7 da norma NBR 5410. Na condição de demanda máxima a seguinte expressão foi empregada para o cálculo da queda de tensão:

$$\Delta V = \frac{100*\sqrt{3}*I*L*(R*cos\theta + X*sen\theta)}{V} \quad (23)$$

Onde:

ΔV = queda percentual de tensão;

I = corrente, em ampères (A), do circuito;

L = comprimento, em metros (m) do circuito;

R = resistência, em Ohms por metro (Ω/km), do condutor em corrente contínua;

X = reatância indutiva, em Ohms por metro (Ω/km), do condutor;

$\cos\theta$ = fator de potência do circuito;

V = tensão, em volts, do circuito.

A capacidade de condução da corrente de curto-circuito de forma segura, é essencial dimensionar a seção transversal mínima dos condutores de acordo com a corrente de curto-circuito máxima que o sistema pode suportar. A seção mínima (S) para atendimento ao critério de capacidade de condução da corrente de curto-circuito foi calculada com a seguinte expressão:

$$S = \frac{I_{cc} \cdot \sqrt{t}}{k} \quad (24)$$

Onde:

S = seção transversal, em milímetros quadrados (mm^2) do condutor;

t = duração, em segundos (s) da corrente de curto-circuito;

I_{cc} = valor eficaz, em ampères (A), da corrente de falta;

k = fator de isolamento do cabo, adotar 114,14.

3.2.4 Dimensionamento dos disjuntores

Os disjuntores, chamados também de disjuntores devem ser especificados de acordo com os critérios estabelecidos no item 5.3.4.1 da NBR 5410 e Instrução Técnica CHESF IT-DETA-010/2017 (“Critério de Dimensionamento das Seções de Condutores para Serviços Auxiliares de Corrente Alternada e Corrente Contínua e Coordenação e Seletividade de Disjuntores”). Para garantir a coordenação com os condutores, é necessário atender à seguinte condição: a corrente de curto-circuito máxima no local de instalação do disjuntor deve ser inferior à capacidade de interrupção do disjuntor, conforme determinado pelas especificações técnicas do fabricante. Isso assegura uma coordenação adequada entre os disjuntores e os condutores, mantendo a integridade do sistema elétrico e garantindo a segurança dos equipamentos e das pessoas.

Os disjuntores foram especificados de modo a satisfazer os critérios estabelecidos no item 5.3.4.1 da NBR 5410. Para garantir a coordenação com os condutores, deverá ser atendida a seguinte condição:

$$I_N \leq I_D \leq I_{CAP} \quad (25)$$

Onde:

I_N = Corrente Nominal do circuito, em ampères (A);

I_D = Corrente nominal do disparador, em ampères (A);

I_{CAP} = Capacidade de condução corrigida por condutor, em ampères (A);

Além da condição anterior, a instrução técnica indica o atendimento da seguinte condição:

$$I_D \geq \frac{I_N}{0,7} \quad (26)$$

Onde:

I_D = corrente Nominal do circuito, em ampères (A);

I_N = corrente nominal do disparador, em ampères (A).

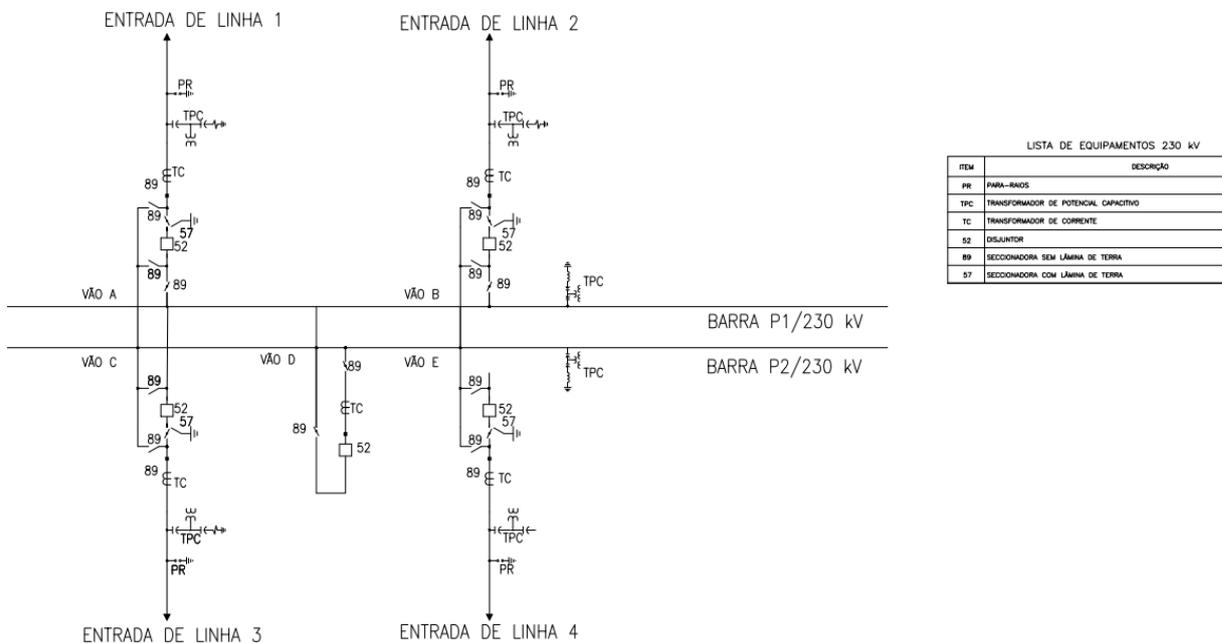
CAPITULO IV

4. RESULTADOS

4.1 Modelo típico de subestação de alta tensão

Para a criação do modelo típico de subestação utilizada nesse estudo de caso se considerou uma subestação com um único nível de tensão de 230 kV com função seccionadora, muito utilizado para o seccionamento de linhas de transmissão e conexão de cargas que precisam ser interligadas com a rede básica (normalmente entre 800 kV a 230 kV). A subestação padrão possui um arranjo de barra dupla a 4 chaves com quatro vão de entrada de linhas e um vão com um disjuntor de interligação de barras. A Figura 5 apresenta um diagrama unifilar da configuração dessa subestação.

Figura 5 – Diagrama unifilar da subestação modelo



Fonte: Autoria própria.

Os Serviços Auxiliares 125 Vcc serão compostos por 2 (dois) conjuntos de baterias do tipo chumbo-ácido ventilada e 2 (dois) carregadores-retificadores (380 Vca/125 Vcc). Além disso, os serviços auxiliares 380/220Vca terão alimentação proveniente da concessionária local

(transformador TSA) e Grupo Motor-Gerador GMG1 em regime contínuo, além do Grupo Motor-Gerador GMG2 em regime de emergência.

Para criação do modelo típico de serviços auxiliares de uma subestação de alta tensão foi listada uma série de circuitos, que serão dimensionados os cabos para atender a cada demanda de cargas foi lista na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Cargas a serem atendidas pelos serviços auxiliares

Circuitos	Circuito
C1	Bateria N°1 / Carregador Retificador N°1 (QR1)
C2	Bateria N°2 / Carregador Retificador N°2 (QR2)
C3	Carregador Retificador N°1 (QR1) / Painel 1
C4	Carregador Retificador N°2 (QR2) / Painel 2
C5	Interligação Paineis Painel 1 / Painel 2
C6	Interligação Paineis Painel 2 / Painel 1
C7	Alimentação - TSA1
C8	Alimentação - GMG1
C9	Alimentação - GMG2
C10	Interligação de Barras
C11	Retificador 1 - 125 Vcc (QR1)
C12	Retificador 2 - 125 Vcc (QR2)

Fonte: Autoria própria.

4.2 Dimensionamento do transformador de serviços auxiliares (TSA) e grupos motores geradores (GMG)

O transformador de serviços auxiliares será utilizado para atendimento das cargas essenciais e não essenciais da subestação. Como a subestação modelo é seccionadora com tensão de 230 kV e arranjo barra dupla a 4 chaves, não tendo transformação de tensão em seus equipamentos será necessário pelo menos mais duas fontes de corrente alternada para atendimento do procedimento de rede. Com isso será utilizado dois grupos motores geradores, um GMG Prime com potência para atender todas as cargas da subestação e um GMG com capacidade emergencial.

Como o modelo de subestação tem tensão de 230 kV temos um levantamento de cargas dos equipamentos de pátio que o serviço auxiliar da subestação será necessário atender. Esses equipamentos são os disjuntores e chaves seccionadoras, as Tabelas 4 e 5 mostra as cargas

estimadas desses equipamentos tendo como referências valores estimados de cargas, respectivamente.

Tabela 4 – Detalhamento das cargas do Disjuntor 230 kV

Disjuntor 230 kV				Essenciais (VA)			Não essenciais (VA)		
Item	Descrição das Parcelas	QTD	Unidade (VA)	P	I	E	P	I	E
1	Circuito de Motor:								
	Motor monofásico 220 Vca (60 Hz) - 545 W - F.P. 0,75	3	726,7		2180				
	Relé superv. tensão - Circ. Motores	1	8	8					
	Circuito de Aquecimento/Iluminação/Tomada:								
	Res. de Aquecimento - 645 Ω / 75 W (Arm. Comando)	1	75						75
	Res. de Aquecimento - 645 Ω / 75 W (Arm. Comando)	1	75				75		
	Tomada - 20 A - 220 V (Arm. Comando)	1	4400						4400
	Lâmpada- 9 W (Arm. Comando)	1	10						10
	Relé superv. tensão - Circ. Aquec/Ilum/Tom	1	5,7				5,7		
	Res. de Aquecimento - 1500 Ω / 35 W (Arm. Acionamento)	3	35				105		
	Res. de Aquecimento - 1500 Ω / 35 W (Arm. Acionamento)	3	35						105
	Tomada- 20 A - 220 V (Arm. Acionamento)	3	4400						13200
Lâmpada - 9 W (Arm. Acionamento)	3	10						30	
Total				8	2180	0	185,7	0	17820

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Detalhamento das cargas da Chave Seccionadora 230 kV

Seccionadora 230 kV				Essenciais (VA)			Não essenciais (VA)		
Item	Descrição das Parcelas	QTD	Unidade (VA)	P	I	E	P	I	E
2	Circuito de Motor:								
	Motor trifásico 380 Vca - 370 W - F.P. 0,75 - n = 67%	1	736,3		736,3				
	Relé de Supervisão Trifásico - Circuito Motor	1	8	8,					
	Circuito de Aquecimento/Iluminação/Tomada:								
	Res. de Aquecimento - 1500 Ω / 35 W	1	35						35
	Res. de Aquecimento - 1500 Ω / 35 W	1	35				35		
	Tomada - 20 A - 220 V	1	4400						4400
	Lâmpada - 9 W	1	10						10
Total				8	736	0	35	0	4445

Fonte: Autoria própria

As cargas de iluminação e tomadas dos pátios e acessos representadas da Tabela 6 foram estimadas com base no item 4.3.2 da instrução técnica CHESF (IT-DEEC-009). Foram utilizados os valores médios em VA/m² indicados na Tabela 4-1 da instrução técnica e a delimitação das áreas considerado valores típicos para pátio de subestações de 230 kV.

Tabela 6 – Estimativa das cargas de iluminação e tomadas de pátio

	Área considerada (m ²)	Iluminação externa (kVA)				Tomadas externas (kVA)			
		Essencial (VA/m ²)	Essencial (kVA)	Não Essencial (VA/m ²)	Não Essencial (kVA)	Essencial (VA/m ²)	Essencial (kVA)	Não Essencial (VA/m ²)	Não Essencial (kVA)
Pátio de 230kV	15000	0,50	7,50	0,30	4,50	3,50	52,50	1,50	22,50
Área de circulação / estacionamento das edificações	6000	0,40	2,40	0,10	0,60	-	-	-	-
Acesso guarita-pátio (valor em metros)	515	9,30	4,79	-	-	-	-	-	-
Total		14,69		5,10		52,50		22,50	

Fonte: Autoria própria

As cargas de iluminação e tomadas internas das edificações foram estimadas utilizando como referência o item 9.5 (“Locais de habitação”) da NBR 5410, conforme proposto no item

4.3.1 da instrução técnica da CHESF (IT-DEEC-009). Os valores estimados das cargas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Estimativa das cargas de iluminação e tomadas das edificações

Edificação	Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Iluminação (VA)		Tomadas (VA)	
				Essencial	Não Essencial	Essencial	Não Essencial
Casa de comando	Sala de Painéis	124	48	1840	-	1000	-
	Sala de Comando	31	24	460	-	500	-
	Hall/Circulação	18	24	-	280	-	500
	Sala Encarregado	10	13	-	160	-	300
	Sala de Baterias	26	22	-	400	-	500
	Sala Manutenção	23	21	-	340	-	2100
	WCBM	7	12	-	100	-	600
	WCBF	8	12	-	100	-	600
Guarita	Sala da Guarda	13	19	-	160	-	400
	BWC	4	9	-	100	-	600
Total				2300	1640	1500	5600

Fonte: Autoria própria

As cargas mínimas de refrigeração foram estimadas utilizando como referência os valores em BTU/m² indicados na Tabela 4-2 instrução técnica da CHESF (IT-DEEC-009), conforme proposto no item 4.3.3. Os valores estimados das cargas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estimativa das cargas de ar-condicionado das edificações

Edificação	Dependência	Área (m ²)	BTU/m ²	BTU (calculado)	QUANT.	BTU/un	W/un (*)	VA/un	Essencial (VA)	Não Essencial (VA)
Casa de comando	Sala de Painéis	124	950	117800	4	29450	3900	4333	17333	-
	Sala de Comando	31	830	25730	2	12865	1850	2056	4111	-
	Sala Encarregado	10	610	6100	1	6100	773	859	-	859
	Sala Manutenção	23	610	14030	2	7015	773	859	-	1718
Guarita	Sala da Guarda	13	610	7930	1	7930	850	944	-	944
Total									21444	3521

Fonte: Autoria própria

Os painéis de controle, proteção e supervisão são elementos de suma importância que tem suas cargas de iluminação, tomadas e resistências de aquecimento alimentadas em corrente alternada e proveniente dos serviços auxiliares. Com isso o levamento de quantidades de painéis e suas cargas é necessário para o dimensionamento das fontes de uma subestação. A subestação modelo de estudo tem seguintes estimativas de cargas de iluminação, aquecimento e tomadas dos painéis apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Estimativa das cargas de iluminação, aquecimento e tomadas dos painéis

Edificação	Painéis	QUANT.	Iluminação		Aquecimento		Tomadas	
			(VA/un)	(VA)	(VA/un)	(VA)	(VA/un)	(VA)
Casa de comando	Proteção e Controle - Setor 230kV	13	15	195	100	1300	2200	28600
	Serviços Auxiliares CA	3	15	45	100	300	2200	6600
	Serviços Auxiliares CC	4	15	60	100	400	2200	8800
	Serviços Auxiliares (Controle)	4	15	60	100	400	2200	8800
	Retificadores (125 Vcc)	2	15	30	100	200	2200	4400
	Retificadores (48 Vcc)	2	15	30	100	200	2200	4400
	Painel Supervisório	1	15	15	100	100	2200	2200
	Painel Telecom	2	15	30	100	200	2200	4400
	Bastidor de Rede	1	15	15	100	100	2200	2200
	Painel de Rede	1	15	15	100	100	2200	2200
Total			510		3400		74800	

Fonte: Autoria própria

Dentre os critérios empregados para o dimensionamento do transformador e dos GMGs, as cargas foram classificadas quanto à importância, como essenciais ou não essenciais.

As cargas essenciais correspondem àquelas necessárias para iniciar o processo de recomposição da subestação, em caso de desligamento total ou parcial, não podendo ser desligadas por tempo prolongado. O transformador e o primeiro GMG (GMG1) deverão atender às cargas essenciais e não essenciais, enquanto o segundo GMG (GMG2) deverá atender apenas às cargas essenciais.

As cargas também foram classificadas quanto à duração como permanentes (acionadas continuamente), intermitentes (acionadas em intervalos periódicos ou regulares de tempo) ou eventuais (acionadas casualmente, de forma passageira e não frequentemente).

Com isso a Tabela 10 mostra os somatórios as cargas da subestação com suas potências, calcificações das cargas e respectivas quantidades de equipamentos.

Tabela 10 – Somatório das cargas simultâneas

Descrição	Quant.	Cargas essenciais (VA)			Cargas não essenciais (VA)			Cargas simultâneas	
		P	I	E	P	I	E	ESSENCIAS (VA)	ESS. + NÃO ESS. (VA)
Disjuntor 230 kV Acionamento/Armário	5	40	10900	-	929	-	89100	6580	7509
Seccionadora 230 kV Acionamento/Armário	22	176	16199	-	770	-	97790	912	1682
Pátio de 230 kV / Acessos Iluminação	1	-	14690	-	-	5100	-	14690	19790
Pátio de 230 kV / Acessos Tomadas	1	-	-	52500	-	-	22500	9873	9873
Casa de Comando Iluminação	1	2300	-	-	1380	-	-	2300	3680
Casa de Comando Tomadas	1	-	-	1500	-	-	4600	1500	6100
Casa de Comando Ar-condicionado	1	21444	-	-	2577	-	-	21444	24021
Guarita Iluminação	1	-	-	-	-	260	-	-	260
Guarita Tomadas	1	-	-	-	-	-	1000	-	1000
Guarita Ar-condicionado	1	-	-	-	-	944	-	-	944
Painéis (Casa de Comando) Iluminação, Aquecimento e Tomadas	34	-	-	-	3400	-	75310	-	3400
Total (kVA)								57,30	78,26

Fonte: Autoria própria

A potência nominal do transformador de serviços auxiliares deverá superior à potência encontrada pela expressão (1). Com isso, teremos uma potência final dada por:

$$\left(\sum P_{ENE} + \sum I_{ENE} + \sum E_{ENE} \right) \times \frac{F_R}{F_S} = 71,74 \text{ kV}$$

Como os valores comercial de transformadores de média tensão são pré-estabelecidos seguindo o catálogo disponível da fabricante WEG, um dos principais fornecedores de equipamentos elétricos do mercado, temos a potência comercial mais próximo do solicitado no valor de 75 kVA.

A potência nominal do GMG Prime, que será utilizado para suprir as cargas essenciais e não essenciais da subestação, deverá ser superior à maior potência encontrada pelas expressões (2) e (3). Com isso, teremos uma potência final dada por:

$$\left(\sum P_E + \sum I_E + \sum E_E \right) x \frac{1}{F_S} = 71,14 \text{ kV}$$

$$\left(\sum P_E + \sum I_E + \sum E_E - \sum D_1 \right) x \frac{1}{F_P} = 112,26 \text{ kV}$$

Para o GMG de emergência que terá que suprir as cargas essenciais em uma eventual contingência teremos a sua potência o valor superior encontrado em desenvolvimento das expressões (2) e (3). Assim, o resultado final é dado por:

$$\left(\sum P_E + \sum I_E + \sum E_E \right) x \frac{1}{F_S} = 52,09 \text{ kV}$$

$$\left(\sum P_E + \sum I_E + \sum E_E - \sum D_1 \right) x \frac{1}{F_P} = 77,33 \text{ kV}$$

Segundo o mesmo princípio estabelecido para o TSA e procurando adotar os valores comerciais que atendem as necessidades do dimensionamento e utilizando o catálogo do grupo Geraforte, referência na fabricação e comercialização de geradores. Teremos os valores de GMG Prime e de emergência de 114 kVA e 78 kVA, respectivamente.

Esse dimensionamento é essencial para garantir que o transformador e o gerador de emergência sejam capazes de suprir as cargas essenciais e intermitentes da subestação, proporcionando confiabilidade e segurança ao sistema elétrico, especialmente em situações críticas como falhas de disjuntores.

4.3 Dimensionamento do banco de baterias e carregadores retificadores

Os Serviços Auxiliares 125 Vcc serão compostos por 2 (dois) conjuntos de baterias do tipo chumbo-ácido ventilada e 2 (dois) carregadores-retificadores (380 Vca/125 Vcc).

A faixa de tensão permissível para a operação satisfatória dos equipamentos alimentados pelo sistema é de +10% e -20% da tensão nominal, ou seja, de 100 a 137,5 Vcc.

O carregador deverá ter capacidade para, simultaneamente, suprir a carga permanente total do sistema de corrente contínua e carregar a bateria em regime de flutuação.

Cada conjunto de baterias deverá atender sozinha a um ciclo de emergência. Considerou-se que para determinar a capacidade nominal da bateria, a duração total do ciclo de emergência será igual a 10 (dez) horas.

As cargas serão classificadas como:

Cargas Permanentes (I_p): presentes durante todo ciclo de emergência. Ex.: IEDs e relés auxiliares;

Cargas Momentâneas (I_m): presentes apenas temporariamente no ciclo de emergência. Ex.: bobinas de abertura dos disjuntores;

Cargas de Tempo Limitado (I_t): corresponde a fase de tentativa de recomposição do sistema, com tentativa de fechamento dos disjuntores críticos.

O ciclo de descarga considera a condição mais desfavorável para a subestação, que é a falta da fonte de alimentação dos serviços auxiliares e, conseqüentemente, a submissão das baterias na alimentação das cargas em 125 Vcc. Neste cenário, são admitidas as seguintes condições:

- (i) alimentação dos equipamentos de proteção e comunicação durante a emergência;
- (ii) suprimento da iluminação de emergência;
- (iii) disparo simultâneo de 3 disjuntores de 230 kV;
- (iv) duas tentativas de recomposição do sistema. Isto é, fechamento dos disjuntores do pátio, com sucesso na segunda tentativa.

As cargas permanentes permanecem energizadas durante todo o tempo em que a bateria estiver em perfil de descarga, indicadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Lista de cargas permanentes (Ip)

Descrição	Carga	Quantidade	Total
	(W)		(W)
Painel de Proteção Principal e Controle - LT 230kV	90,00	4	360,00
Painel de Proteção Alternada - LT 230kV	40,00	4	160,00
Painel de Controle do Disjuntor de Transferência - 230kV	130,00	2	260,00
Painel de Proteção de Barras - 230kV	120,00	2	240,00
Mesa de Comando	160,00	1	160,00
Painel Supervisório	1930,00	1	1930,00
Painel Bastidor de Rede	140,00	1	140,00
Painel de Controle dos Serviços Auxiliares	120,00	1	120,00
Painéis de Serviços Auxiliares CA	50,00	2	100,00
Painéis de Serviços Auxiliares CC	50,00	4	200,00
Quadro de Distribuição CA	20,00	1	20,00
Carregador Retificador 380Vca/125Vcc	50,00	2	100,00
Grupo Motor-Gerador (GMG)	50,00	2	100,00
CFTV	1606,00	1	1606,00
Iluminação de emergência (Casa de Comando)	353,00	1	353,00
Disjuntor 230kV	20,00	5	100,00
Seccionadora 230kV	2,50	22	55,00
	Total (W)		6004,00
	Corrente Permanente - Ip (A)		50,67

Fonte: Autoria própria

As cargas momentâneas são as que podem ocorrer uma ou mais vezes durante o perfil de descarga da bateria, em tempo de curta duração, não excedendo a 1 minuto em qualquer das ocorrências. Estas cargas correspondem à fase iniciada com o disparo simultâneo dos disjuntores de 230 kV, indicadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Lista de cargas momentâneas (Im)

Descrição	Carga	Quantidade	Total
	(W)		(W)
Abertura Disjuntores 230kV	1872,00	3	5616,00
Total (W)			5616,00
Corrente Momentânea - Im (A)			47,39

Fonte: Autoria própria

Para as cargas de tempo limitado temos as correspondentes à fase de recomposição do sistema, com a tentativa de fechamento dos disjuntores de pátio para energização das barras, indicadas, na Tabela 13.

Tabela 13 – Lista de cargas de tempo limitado (It)

Descrição	Carga	Quantidade	Total
	(W)		(W)
Fechamento Disjuntores 230kV	936,00	1	936,00
Total (W)			936,00
Corrente de Tempo Limitado - It (A)			7,90

Fonte: Autoria própria

Foram adotadas as seguintes especificações para as baterias:

Tensão nominal (V_n) = 125,0 Vcc

Tensão de flutuação/elemento (V_{fl}) = 2,2 Vcc

Tensão final de descarga/elemento (V_{fn}) = 1,75 Vcc

Conforme a expressão 4: $V_{min} = 0,8 * 125 = 100V$

Conforme a expressão 5: $V_{max} = 1,1 * 125 = 137,5V$

O número mínimo de elementos (n_1) é calculado conforme a expressão 8:

$$n_1 = 0,46 * 125 = 57,5$$

O número máximo de elementos (n_2) é calculado conforme a expressão 9:

$$n_2 = 0,5 * 125 = 62,5$$

Serão adotadas, portanto, baterias de $n = 60$ elementos respeitando a expressão 10. Logo, a tensão de flutuação total da bateria ($V_{FLUTUAÇÃO}$), a tensão final (V_{FINAL}) e a tensão média ($V_{médio}$) são dadas pelas expressões 11, 12 e 13, respectivamente.

$$V_{FLUTUAÇÃO} = 60 * 2,2 = 132 V$$

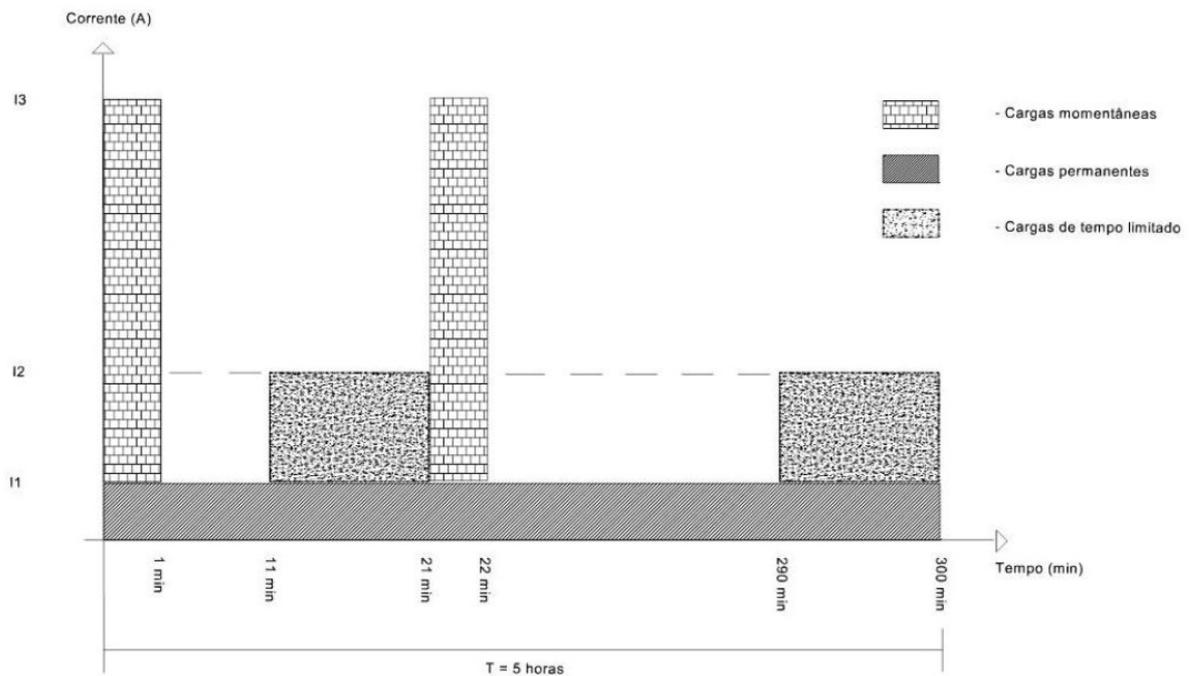
$$V_{FINAL} = 60 * 1,75 = 105 V$$

$$V_{médio} = \left(\frac{132 + 105}{2} \right) = 118,5 V$$

Com base no ciclo de descarga ilustrado na Figura 6 e utilizando o valor da tensão média, $V_M = 118,5 V$, para calcular as correntes das cargas, utilizou-se o método proposto no item 6.8.2 da NBR 15254 para determinar a capacidade da bateria, em Ah.

Os valores de Fator de Capacidade (K) foram baseados na curva do Anexo I, retirada do Manual Técnico de Baterias Estacionárias Ventiladas – Tipo OPzS da Fulguris.

Figura 6 – Perfil de descarga das baterias em uma subestação



Fonte: IT-DEEC-010/2017, CHESF

Na Tabela 14 temos a estimativa da corrente de carga de cada momento da descarga de uma bateria em subestações.

Tabela 14 - Estimativa das correntes de cargas

Corrente Permanente (I_p)	50,67	A
Corrente Momentânea (I_m)	47,39	A
Corrente Tempo Limitado (I_t)	7,90	A
$I_1=(I_m+I_p)$	98,06	A
$I_2=I_p$	50,67	A
$I_3=I_p + I_t$	58,57	A

Fonte: Autoria própria

Seguindo o item 6.8.2 da NBR 15254 temos os cálculos da corrente em cada respectiva seção a seguir nas Tabelas 15, 16, 17, 18, 19 e 20.

Tabela 15 – Carga na primeira seção

PRIMEIRA SEÇÃO - PERÍODO 0 a 1 min		
K1	1,10	-
I1	98,06	A
I_1-I_0	98,06	A
$C_1=I_1 \times K_1$	107,86	Ah

Fonte: Autoria própria

Tabela 16– Carga na segunda seção

SEGUNDA SEÇÃO - PERÍODO 0 a 11 min		
K10	1,23	-
K11	1,24	-
I1	98,06	A
I2	50,67	A
$I_A=I_1-I_0$	98,06	A
$C_A=I_1 \times K_{11}$	121,59	Ah
$I_B=I_2-I_1$	-47,39	A
$C_B=I_B \times K_{10}$	-58,29	Ah
$C_2=C_A+C_B$	63,30	Ah

Fonte: Autoria própria

Tabela 17 – Carga na terceira seção

TERCEIRA SEÇÃO - PERÍODO 0 a 21 min		
K10	1,23	-
K20	1,37	-
K21	1,39	-
I1	98,06	A
I2	50,67	A
I3	58,57	A
IA=I1-I0	98,06	A
CA=I1xK21	136,30	Ah
IB=I2-I1	-47,39	A
CB=IBxK20	-64,93	Ah
IC=I3-I2	7,90	A
CC=ICxK10	9,72	Ah
C3=CA+CB+CC	81,09	Ah

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 – Carga na quarta seção

QUARTA SEÇÃO - PERÍODO 0 a 22 min		
K1	1,10	-
K11	1,24	-
K21	1,39	-
K22	1,40	-
I1	98,06	A
I2	50,67	A
I3	58,57	A
IA=I1-I0	98,06	A
CA=I1xK22	137,28	Ah
IB=I2-I1	-47,39	A
CB=IBxK21	-65,88	Ah
IC=I3-I2	7,90	A
CC=ICxK11	9,79	Ah
ID=I1-I3	39,49	A
CD=IDxK1	43,44	Ah
C4=CA+CB+CC+CD	124,64	Ah

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 – Carga na quinta seção

QUINTA SEÇÃO - PERÍODO 0 a 290 min		
K268	4,94	-
K269	4,96	-
K279	5,12	-
K289	5,25	-
K290	5,26	-
I1	98,06	A
I2	50,67	A
I3	58,57	A
IA=I1-I0	98,06	A
CA=I1xK290	515,79	Ah
IB=I2-I1	-47,39	A
CB=IBxK289	-248,81	Ah
IC=I3-I2	7,90	A
CC=ICxK279	40,44	Ah
ID=I1-I3	39,49	A
CD=IDxK269	195,89	Ah
IE=I2-I1	-47,39	A
CE=IExK268	-234,12	Ah
C5=CA+CB+CC+CD+CE	269,19	Ah

Fonte: Autoria própria

Tabela 20 – Carga na sexta seção

SEXTA SEÇÃO - PERÍODO 0 a 300 min		
K10	1,23	-
K278	5,10	-
K279	5,12	-
K289	5,25	-
K299	5,39	-
K300	5,40	-
I1	98,06	A
I2	50,67	A
I3	58,57	A
IA=I1-I0	98,06	A
CA=I1xK300	529,52	Ah
IB=I2-I1	-47,39	A
CB=IBxK299	-255,45	Ah
IC=I3-I2	7,90	A
CC=ICxK289	41,47	Ah
ID=I1-I3	39,49	A
CD=IDxK279	202,21	Ah
IE=I2-I1	-47,39	A
CE=IExK278	-241,70	Ah
IF=I3-I2	7,90	A
CF=IFxK10	9,72	Ah

Fonte: Autoria própria

A capacidade básica das baterias é determinada pelo maior somatório encontrado nas 6 seções, conforme mostra a Tabela 21:

Tabela 21– Capacidade Calculada

CB=Máximo(C1;C2;C3;C4;C5;C6)		
CB	285,76	Ah

Fonte: Autoria própria

Considerando que a temperatura média que as baterias ficarão submetidas será de 25°C, não será aplicado fator de correção da capacidade em função da temperatura. O fator de

envelhecimento aplicado será de 25%, conforme item 6.6.2 da ABNT-NBR 15254 considerando que a bateria deverá atender ao seu propósito até o final da vida útil. Com isso, a Tabela 22 mostra o valor final da corrente em Ampère/horas calculado.

Tabela 22 – Capacidade Final

CAPACIDADE FINAL		
Fator de Envelhecimento (FE)		1,25
Fator de Temperatura (FT)		1
CF=CBxFExFT	357,21	Ah

Fonte: Autoria própria

Logo, a capacidade adotada para cada conjunto de bateria não poderá ser inferior a 400Ah/10h.

A capacidade do carregador é definida de acordo com a maior carga obtida nas diferentes situações de operação do sistema e considerando um tempo de carga para a bateria igual a 10 horas.

O carregador deverá fornecer a corrente de consumo permanente do barramento completo, para garantir uma eventual falha do outro carregador, mais a corrente de flutuação necessária para manter a bateria carregada.

A corrente de carga da bateria ($I_{carga\ da\ bateria}$) e a corrente total do carregador ($I_{carregador}$) pode ser calculada conforme as expressões (15) e (14), respectivamente. Nas tabelas 23 e 24 e mostrado o resultado para o modelo de subestação aplicado.

Tabela 23– Corrente de carga da bateria

CAPAC. NOMINAL (C10)	400	Ah
FATOR (kn)	1,1	-
TEMPO TOTAL (t)	10	h
$I_{carga\ da\ bateria} = (kn * C10) / t$	44,00	A

Fonte: Autoria própria

Tabela 24 – Corrente do carregador retificador

CORRENTE PERMANENTE (I_p)	50,67	A
CORRENTE DE CARGA ($I_{carga\ da\ bateria}$)	44,00	A
$I_{carregador} = I_p + I_{carga\ da\ bateria}$	94,67	A

Fonte: Autoria própria

Logo, a corrente nominal adotada para o carregador será de 100A. Considerando fator de potência de 0,85 e rendimento igual 0,9, a potência do retificador, em VA, é dada pela expressão (16) que resulta em um valor apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Potência nominal

CORRENTE NOM. ADOT. ($I_{carregador}$)	100	A
TENSÃO (V _{cc})	125	V
FATOR DE POTÊNCIA (f_p)	0,85	-
RENDIMENTO (η)	0,9	-
POTÊNCIA NOMINAL	16339,87	VA

Fonte: Autoria própria

4.4 Dimensionamento dos cabos e disjuntores

4.4.1 Dimensionamento dos cabos e disjuntores de Corrente Contínua

Para os cabos de corrente contínua as correntes dos condutores foram dimensionadas de acordo com a equação (17) e (18), sendo empregada uma tensão que seja maior do que o valor mínimo tolerado para a sua operação satisfatória, sendo está a condição mais crítica de operação, onde os serviços auxiliares 125 V_{cc} são alimentados pelos bancos de bateria em sua tensão final de descarga (igual a 105V).

Considerando esse cenário tem-se que, para em caso de uma queda de tensão excessiva pode ocorrer uma diminuição significativa da tensão nominal disponível no circuito, afetando negativamente o funcionamento dos equipamentos elétricos e ocasionando, além da perda de eficiência dos serviços auxiliares, um possível dano aos dispositivos sensíveis. Portanto, ao realizar o dimensionamento voltado ao critério da queda de tensão nos condutores, para a condição de demanda máxima de cada carga, deve-se garantir que a tensão fornecida permaneça dentro de limites aceitáveis durante todas as condições de operação, assegurando assim o funcionamento seguro e eficiente de todo o sistema elétrico.

Para os painéis localizados na Casa de Comando, foi considerado o valor de tensão mínima de 100V, que corresponde a uma queda de tensão máxima de 5V, ou, 4% da tensão nominal. Para os demais componentes do sistema que estarão operando em regime de corrente contínua, foram analisados os valores de resistência em corrente contínua dos condutores a serem utilizados na queda de tensão percentual constam na tabela do Anexo I.

Um dos principais contribuintes para a corrente de curto-circuito em circuito de corrente contínua é a associação banco de baterias com o carregador-retificador. Essa

contribuição é bastante particular do sistema do emprego de baterias, sendo seu valor estimado da corrente de curto-circuito da bateria foi retirado do Anexo III. Para o carregador-retificador, a contribuição estimada é proporcional à corrente nominal de saída ($k \cdot I_N$), onde adotou-se o fator do material de isolamento (k) como: $k = 21$.

A corrente total de curto-circuito, para a associação banco de baterias de 400Ah com o carregador-retificador com corrente nominal de saída de 100 A, dada por:

$$I_{cc} = ICC_{bat.}(400Ah) + ICC_{ret.} = (4444 A) + 21 \cdot (100 A) = 6,544 \text{ kA}$$

A partir do valor da potência permanente (P_{perm}) e potência transitória (P_{trans}) apresentados na Tabela 11 e 12, temos os valores indicados na tabela 26 para a corrente permanente (I_{perm}), corrente transitória (I_{trans}), e o valor da corrente nominal (I_N) que equivale a

$$I_N = I_{perm} + I_{trans}$$

Tabela 26 –Dimensionamento para as correntes de serviços auxiliares 125 Vcc

Circuito	P_{perm} (kW)	P_{trans} (kW)	I_{perm} (A)	I_{trans} (A)	I_N (A)
C1	10,00	5,62	100,00	56,16	156,16
C2	10,00	5,62	100,00	56,16	156,16
C3	10,00	5,62	100,00	56,16	156,16
C4	10,00	5,62	100,00	56,16	156,16
C5	10,00	5,62	100,00	56,16	156,16
C6	10,00	5,62	100,00	56,16	156,16

Fonte: Autoria própria.

A tabela 27 apresenta o número de condutores por circuito e seus comprimentos e os métodos de referências apresentados na NBR 5410 (tabela 33). Levando em consideração fatores de correção como o fator de temperatura (F_T) e fator de agrupamento (F_A) especificados temos os valores indicados de corrente nominal por condutor (I_N/N) e essa corrente corrigida (I_N/N corrigida). Os cálculos completos estão no Quadro I, apêndice I.

Tabela 27 – Dimensionamento para as correntes corrigidas de serviços auxiliares 125 Vcc

Circuito	N° Cond.(N)- Por pólo	Compr. (m)	Método de Ref.	Fatores de Correção		I_N/N	I_N/N corrigida
				F_T	F_A		
C1	1	42,0	D	0,89	1,00	156,16	175,46
C2	1	39,0	D	0,89	1,00	156,16	175,46
C3	1	12,0	B1	1,00	1,00	156,16	156,16
C4	1	10,0	B1	1,00	1,00	156,16	156,16
C5	1	10,0	B1	1,00	1,00	156,16	156,16
C6	1	10,0	B1	1,00	1,00	156,16	156,16

Fonte: Autoria própria.

As tabelas 36 a 39 da NBR 5410 (Instalações elétricas de baixa tensão) fornecem os valores de referência para o dimensionamento dos cabos pelo critério de condução de corrente. Além disso, a capacidade é afetada pela quantidade de condutores no conduto (ou canaleta) e pela temperatura ambiente. Por fim temos seção adequada do cabo para corrente de curto-circuito dada pela equação (20) considerou que o tempo de curto circuito seria estimado em 0,02 segundo, sendo o tempo necessário para os disjuntores entrarem em ação e desligarem as redes em curto. A Tabela 28 apresenta os valores de seção nominal para os critérios de condução de corrente (S_{cap}) e seção para o critério de capacidade de condução de corrente em curto-circuito (S_{sc}).

Tabela 28 –Dimensionamento das secções dos cabos de serviços auxiliares 125 Vcc

Circuito	$S_{cap}(mm^2)$	$S_{sc}(mm^2)$
C1	70	8,11
C2	70	8,11
C3	70	8,11
C4	70	8,11
C5	70	8,11
C6	70	8,11

Fonte: Autoria própria.

Um valor importante para o dimensionamento dos disjuntores de corrente contínua que é o valor da sua corrente nominal, valor máximo de corrente elétrica que ele pode interromper de forma segura e confiável em condições normais de operação, esse valor é dimensionando seguindo a expressão (25) e (26). Tendo como escolha cabos de 150 mm² para atender todas as cargas dos circuitos de corrente contínua temos os seguintes valores apresentados na Tabela 29 para a corrente suportada pelos cabos (I_{cap}), quantidade máxima de corrente elétrica que um cabo pode transportar de forma segura e contínua sem exceder sua capacidade térmica ou causar danos ao cabo, e para a corrente do disjuncto (I_D) escolhida para atender as finalidades do projeto.

Tabela 29 –Dimensionamento dos disjuntores de serviços auxiliares 125 Vcc

Circuito	S (mm ²)	$I_N/0,7$ (A)	I_{cap} (A)	I_D (A)
C1	150	223,09	247,42	220
C2	150	223,09	247,42	220
C3	150	223,09	309,00	250
C4	150	223,09	309,00	250
C5	150	223,09	309,00	250
C6	150	223,09	309,00	250

Fonte: Autoria própria.

Para a verificação da queda de tensão nos circuitos está dentro dos critérios estabelecidos pela norma e os cabos escolhido com seção nominal de 150 mm² atende as especificações exigidas, foi utilizado com referência a tabela - Resistências elétricas e

reatâncias indutivas de fios e cabos isolados em PVC, HEPR e XLPE em condutos fechados (valores em Ω/km) do fabricante Condumax, disponível no anexo II. A Tabela 30 apresenta os valores de queda de tensão acumulados ($\Delta V(\%)$) para cada circuito e analisar que nenhuma queda de tensão supera o 4% estabelecidos pela Instrução técnica.

Tabela 30 – Verificação dos critérios de queda de tensão para os serviços auxiliares 125 Vcc

Circuito	($\Delta V(\%)$)
C1	1,26
C2	1,17
C3	1,62
C4	1,47
C5	1,92
C6	1,77

Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Dimensionamento dos cabos e disjuntores de Corrente Alternada

Para as seções de corrente alternada os condutores foram dimensionados de modo que a tensão em cada carga seja menor que o valor máximo tolerado para a sua operação satisfatória, sendo está a condição mais crítica de operação, onde os serviços auxiliares operam em rede trifásica de 380V e empregando a equação (21). Assim como para o sistema de corrente contínua, os cabos que atuam em corrente alternada, em caso de uma queda de tensão excessiva de tensão, podem ocorrer uma diminuição significativa da tensão nominal disponível no circuito, afetando os serviços auxiliares, um possível dano aos dispositivos sensíveis. Portanto, ao realizar o dimensionamento voltado ao critério da queda de tensão nos condutores, para a condição de demanda máxima de cada carga, deve-se garantir que a tensão fornecida permaneça dentro de limites aceitáveis durante todas as condições de operação, assegurando assim o funcionamento seguro e eficiente de todo o sistema elétrico.

Um dos principais contribuintes para a corrente de curto-circuito em circuito de corrente alternada é a impedância do transformador, GMG e cabos. O transformador tem uma impedância resultado da combinação da resistência e da reatância do transformador. Os cabos elétricos que interconectam os diversos componentes do sistema elétrico também têm uma impedância, gerada pela resistência do condutor e a reatância devido ao campo magnético em torno dos cabos, que contribui para a corrente de curto-circuito. Para o cálculo da impedância em ohms do transformados e GMGs foi utilizado e os valores de 3,5 % e 5%, respectivamente,

para a porcentagem de impedância dos componentes. Além disso, foram utilizados os valores de potência comercial encontrados na seção 4.2 para o TSA e GMG's. Que decorreu no seguinte resultado:

- Para o transformador de serviços auxiliares (TSA)

$$Z = Z_{\%} * \frac{(V_N)^2}{S_N * 100} = 3,5 * \frac{380^2}{75000 * 100} = 0,067 \text{ ohm}$$

- Para o grupo motor gerador 1 (GMG1)

$$Z = Z_{\%} * \frac{(V_N)^2}{S_N * 100} = 5 * \frac{380^2}{114000 * 100} = 0,063 \text{ ohm}$$

- Para o grupo motor gerador 2 (GMG2)

$$Z = Z_{\%} * \frac{(V_N)^2}{S_N * 100} = 5 * \frac{380^2}{78000 * 100} = 0,093 \text{ ohm}$$

Para a estimativa da corrente de curto circuito foi considerando as impedâncias encontradas acima e temos os seguintes resultados para a corrente de curto circuito:

- Para o transformador de serviços auxiliares (TSA)

$$I_{ca} = \frac{V}{Z * \sqrt{3}} = \frac{380V}{(0,067 * \sqrt{3})} = 3,27 \text{ kA}$$

- Para o grupo motor gerador 1 (GMG1)

$$I_{ca} = \frac{V}{Z * \sqrt{3}} = \frac{380V}{(0,063 * \sqrt{3})} = 3,48 \text{ kA}$$

- Para o grupo motor gerador 2 (GMG2)

$$I_{ca} = \frac{V}{Z * \sqrt{3}} = \frac{380V}{(0,093 * \sqrt{3})} = 2,36 \text{ kA}$$

Considerando a impedância dos cabos que alimentam o quadro de sistemas essenciais (Painel 3) na subestação modelo, a corrente de curto-circuito nos barramentos é dada por:

$$\begin{aligned}
I_{ca-painel\ 3} &= \frac{V}{(Z_{TSA} + Z_{painel\ 3}) * \sqrt{3}} \\
&= \frac{V}{\sqrt{(Z_{TSA} + X_{cabo-painel\ 3})^2 + (R_{cabo-painel\ 3})^2} * \sqrt{3}} \\
&= \frac{0,001 * 380V}{\sqrt{(0,067\Omega + 0,05km * 0,098 \frac{\Omega}{km})^2 + (0,05km * 0,092 \frac{\Omega}{km})^2} * \sqrt{3}} \\
&= 3,33\ kA
\end{aligned}$$

Portanto temos, com base nos cálculos que transformador e GMG's deve apresentar uma corrente de curto-circuito (I_{ca}) de 3,27kA, 3,48kA e 2,36kA, respectivamente, enquanto que, para os quadros das cargas essenciais (painel 3) devemos ter correntes de 3,33kA. Com base nos valores de corrente de curto-circuito calculados para o transformador e os quadros de carga essenciais e não essenciais, é possível dimensionar os dispositivos de proteção adequados, como disjuntores e fusíveis, para garantir a segurança do sistema elétrico em caso de curto-circuito.

Semelhante ao realizado com os cabos de corrente contínua, os cabos para serviços essenciais de corrente alternada foram dimensionados observando a potência de operação, fator de potência, as fases necessárias para atender ao circuito, número de condutores, corrente nominal (I_N) e corrente nominal por condutor ($\frac{I_N}{n}$). Os valores calculados estão disponíveis na Tabela 31 enquanto o resumo dos cálculos completos está no Quadro I, apêndice II.

Tabela 31 –Dimensionamento para as correntes de serviços auxiliares 380/220 Vca

Circuito	Pot (kVA)	cos θ	Fase	NCOND – Por fase	I_N (A)	$\frac{I_N}{n}$ (A)
C7	75,00	0,88	A, B, C	1	113,95	113,95
C8	114,00	0,88	A, B, C	1	173,21	173,21
C9	78,00	0,80	A, B, C	1	118,51	118,51
C10	75,00	0,91	A, B, C	1	113,95	113,95
C11	16,34	0,80	A, B, C	1	24,83	24,83
C12	16,34	0,80	A, B, C	1	24,83	24,83

Fonte: Autoria própria

A Tabela 32 apresenta o número de condutores por circuito e seus comprimentos e os métodos de referências apresentados na NBR 5410 (tabela 33). Levando em consideração fatores de correção como o fator de temperatura (F_T) e fator de agrupamento (F_A) especificados e um fator de segurança de 20%, temos os valores indicados de corrente permanente (I_{PER}).

Tabela 32 –Dimensionamento para as correntes permanente de serviços auxiliares 380/220 Vca

Circuito	Método de Ref.	Fatores de Correção		Fator de Segurança (FS)	I_{PER} (A)
		FT	FA		
C7	D	D	0,89	1,00	153,64
C8	D	D	0,89	1,00	233,53
C9	D	D	0,89	1,00	159,79
C10	B1	B1	1,00	1,00	136,74
C11	B2	B2	1,00	1,00	24,83
C12	B2	B2	1,00	1,00	24,83

Fonte: Autoria própria

As tabelas 36 a 39 da NBR 5410 (Instalações elétricas de baixa tensão) fornecem os valores de referência para o dimensionamento dos cabos pelo critério de condução de corrente. Além disso, a capacidade é afetada pela quantidade de condutores no conduto (ou canaleta) e pela temperatura ambiente. Por fim temos seção adequada do cabo para corrente de curto-circuito dada pela equação (24) considerou que o tempo de curto circuito seria estimado em 0,02 segundo, sendo o tempo necessário para os disjuntores entrarem em ação e desligarem as redes em curto. A tabela 33 apresenta os valores de seção nominal para os critérios de condução de corrente (S_{cap}) e seção para o critério de capacidade de condução de corrente em curto-circuito (S_{sc}).

Tabela 33 –Dimensionamento das seções dos cabos de serviços auxiliares 380/220 Vca

Circuito	S_{cap} (mm ²)	S_{sc} (mm ²)
C7	95,00	4,03
C8	185,00	4,29
C9	95,00	2,94
C10	70,00	3,97
C11	4,00	3,97
C12	4,00	3,97

Fonte: Autoria própria

A corrente nominal dos disjuntores de corrente alternada assim como para o sistema de corrente contínua é essencial para o uma correta configuração das cargas, esse valor é dimensionando seguindo a expressão (25) e (26). Tendo como escolha cabos de bitolas diversas (S) que serão apresentados na Tabela 43 para a corrente suportada pelos cabos (I_{cap}), quantidade máxima de corrente elétrica que um cabo pode transportar de forma segura e contínua sem exceder sua capacidade térmica ou causar danos ao cabo, e para a corrente do disjuncto (I_D) escolhida para atender as finalidades do projeto.

Tabela 34 – Dimensionamento dos disjuntores de serviços auxiliares 380/220 Vca

Circuito	S (mm ²)	$\frac{I_N}{0,7}$ (A)	I_{CAP} (A)	I_D (A)
C7	120	162,79	180,67	180
C8	240	247,44	264,33	250
C9	120	169,30	180,67	180
C10	95	162,79	207,00	180
C11	10	35,47	46,00	40
C12	10	35,47	46,00	40

Fonte: Autoria própria

Para a verificação da queda de tensão nos circuitos está dentro dos critérios estabelecidos pela norma e os cabos escolhido atende as especificações exigidas, foi utilizado com referência a tabela - Resistências elétricas e reatâncias indutivas de fios e cabos isolados em PVC, HEPR e XLPE em condutos fechados (valores em Ω/km) do fabricante Condumax, disponível no anexo II. A Tabela 35 apresenta os valores de queda de tensão acumulados ($\Delta V(\%)$) para cada circuito e analisar que nenhuma queda de tensão supera o 3% estabelecidos pela Instrução técnica.

Tabela 35 – Verificação dos critérios de queda de tensão para os serviços auxiliares 380/220 Vca

Circuito	Compr. (m)	($\Delta V(\%)$)
C7	50,00	0,56
C8	50,00	0,51
C9	50,00	0,57
C10	10,00	0,69
C11	30,00	1,19
C12	30,00	1,19

Fonte: Autoria própria

O dimensionamento da seção transversal dos cabos ocorreu em função da corrente de projeto que fluirá durante as operações normais e em condições de carga máxima, sendo

utilizado catálogos da Condumax para obter a bitola correta. Isso inclui a corrente necessária para carregar a cargas de corrente contínua e alimentar o carregador retificado, garantindo limites aceitáveis para garantir o funcionamento adequado dos equipamentos conectados.

CAPITULO V

5. CONCLUSÃO

Para obtenção dos resultados e atendimento aos objetivos traçados na elaboração deste trabalho foi necessária uma análise e compreensão detalhada da natureza dos requisitos do procedimento de rede exigidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que regem o dimensionamento e funcionamento dos equipamentos em subestações. As normas estudadas e discutidas no trabalho permitiram abordar a seleção e dimensionamentos de inúmeros componentes, como baterias e transformadores de serviços auxiliares a partir de um modelo típico de subestação de alta tensão.

Um dos maiores desafios na elaboração do presente trabalho foi, dentro do cenário de uma subestação, foi entender a prioridade de cargas (essenciais e não essenciais) dentro a logística complexa de operação de subestações de transmissão.

Por fim entende-se que as escolhas feitas com base na memória de cálculo parecem adequadas para atender às necessidades do sistema elétrico, proporcionando uma margem de segurança e flexibilidade para acomodar variações na carga. Espera-se que o memorial de cálculo apresentado sirva como um guia para o ensinamento sobre dimensionar os equipamentos mencionados, considerando as especificações técnicas, normas e critérios de segurança, assim como as decisões técnicas em projetos de subestações.

Como sugestão de trabalhos futuros recomendo:

- Subestação 4.0 e Automação: Investigar a aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 em subestações elétricas, explorando tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e automação assim como avaliar os benefícios da modernização das subestações com base na eficiência operacional, segurança e confiabilidade.
- Estudo de Sistemas de Armazenamento de Energia em Subestações: Investigar diferentes tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio, sistemas de fluxo e supercapacitores visando uma análise técnica voltada a viabilidade técnica e econômica da implementação desses sistemas em subestações assim como o impacto na estabilidade da rede elétrica e na integração de fontes renováveis.
- Análise de Resiliência em Subestações: Estudar a resiliência das subestações elétricas diante de eventos adversos, como falhas, desastres naturais ou ataques cibernéticos, buscando desenvolver metodologias para avaliar a capacidade de recuperação das subestações

e propor estratégias de projeto e operação para aumentar a resiliência e minimizar os impactos de interrupções.

REFERÊNCIAS

- GONÇALVES, André Rodrigues et al. Cenários de expansão da geração solar e eólica na matriz elétrica brasileira. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2018.
- Associação Nacional de Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ANEEL). **Balanco Energético Nacional 2023**. Brasília, DF: ANEEL. 2023.
- Eletrobras. **Plano Diretor de Expansão da Transmissão (PDE-T)**. Brasília, DF: Eletrobras. 2023.
- SOUZA, Cecy Meira Rosa; GALLO, Fabrício. **A reestruturação do setor elétrico brasileiro: Sistema Interligado Nacional e a energia elétrica como mercadoria**. 2019.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Definição das redes do Sistema Interligado Nacional**. 2022.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook**. Paris: OECD/IEA, 2022.
- GHELERE, Gabriel Aparecido Bertolucci; SOKOLOSKI, Antônio Luiz; KASTELIC, Mariana Sampaio. **Manutenção em subestações elétricas**. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, v. 38, n. especial, p. 920-942, 2022.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Balanco Energético Nacional 2023**. Brasília, DF: ONS. 2023.
- FERREIRA, Ribamar Nelson et al. **Elaboração de um Guia para a Seleção de Relés em Redes Isoladas**. 2012.
- SANTOS, Mara Alice Batista dos. **PROJETO DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 2021.
- DISTRIBUIÇÕES, Enel. **Critérios de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas de Média e Baixa Tensão**. 2022.
- GARCIA, Douglas Alexandre de Andrade; DUZZI JUNIOR, Francisco Elio. **Tópicos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica**. **O Setor Elétrico**, v. 7, n. 74, p. 52-63, 2012.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2012). **NBR 16584: Subestações elétricas - Disposições gerais**. Rio de Janeiro: ABNT.
- Conselho Nacional de Energia Elétrica (CONEEL). (2023). **Manual de subestações elétricas**. Brasília, DF: CONEEL.
- Schneider Electric. (2023). **Subestações elétricas - Princípios básicos**. São Paulo: Schneider Electric.
- CARVALHO, Jorge Leite Martins. **Sistemas de controle automático**. 2000.

IEEE Std C37.90-2012. IEEE Standard for Relay Protection of Power Systems. Piscataway, NJ, 2012

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 14039:2018 - Transformadores elétricos - Transformadores de serviços auxiliares - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT). Brasília: ANEEL, 2023.

OLIVEIRA, Carlos Alberto Soares. Instalações Elétricas de Baixa Tensão. 2014. Tese de Doutorado. Universidade do Porto (Portugal).

SILVA, Danillo Augusto Santos. Aplicação de bancos de baterias em subestações para suprir os serviços auxiliares. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

Moura. Siba o que é bateria estacionária e como ela funciona. Disponível em: <

[https://www.moura.com.br/blog/o-que-e-](https://www.moura.com.br/blog/o-que-e-bateriaestacionaria/#:~:text=As%20baterias%20estacion%C3%A1rias%20s%C3%A3o%20projetadas,por%20esse%20tipo%20de%20uso.>)

[bateriaestacionaria/#:~:text=As%20baterias%20estacion%C3%A1rias%20s%C3%A3o%20projetadas,por%20esse%20tipo%20de%20uso.>](https://www.moura.com.br/blog/o-que-e-bateriaestacionaria/#:~:text=As%20baterias%20estacion%C3%A1rias%20s%C3%A3o%20projetadas,por%20esse%20tipo%20de%20uso.>) Acesso em: 16 agosto 2022.

CAVALCANTI, MARIANA DE MORAIS. Estudos de melhorias no suprimento energético dos sistemas auxiliares de subestações conectadas à Rede Básica. 2023.

SCHMOELLER, Larissa. Análise do Rendimento Para Grupos Motogeradores Movidos a Biogás de Fabricação Nacional. 2019. 25. Monografia (Especialização em Tecnologias da

Cadeia Produtiva do Biogás - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

CIGRE. Technical Brochure 496: Guidelines for the Selection of Insulation and Sheath Materials for Power Cables. Paris, 2012.

Asea Brown Boveri (ABB). Disjuntores de Média Tensão - Guia de Seleção. São Paulo, 2020.

Schneider Electric. Disjuntores - Catálogo Técnico. São Paulo, 2022.

NBR 5460: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5460: Sistemas elétricos de potência. Rio de Janeiro, 2019.

NBR 5410: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: instalações elétricas em baixa tensão. Rio de Janeiro, 2020.

NBR 15254: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15254: acumuladores de chumbo-ácido estacionários. Rio de Janeiro, 2011.

FORNTIN, Sergio O. **Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1ª. ed. [S. l.: s. n.], 2013.

INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA PROJETOS COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO CHESF. **IT-DEEC-010/2010: critérios para dimensionamento de banco e baterias e carregador/retificador**. REV 1 07.2014.

INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA PROJETOS COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO CHESF. **IT-DEEC-009/2010:** critérios para dimensionamento dos transformadores de serviços auxiliares e grupo motor gerador diesel de emergência. REV 2 07.2014.

INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA PROJETOS COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO CHESF. **IT-DEEC-009/2010:** critérios para dimensionamento dos transformadores de serviços auxiliares e grupo motor gerador diesel de emergência. REV 2 07.2014

INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA PROJETOS COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO CHESF. **IT-DETA-010/2017:** critérios para dimensionamento das seções dos condutores para serviços auxiliares de corrente alternada e corrente contínua e seletividade dos disjuntores.

APÊNDICE I – Memorial de cálculo para cabos de corrente contínua.

Legenda	Projetado	NBR 5410/ IT	Calculado	Tabelado
---------	-----------	--------------	-----------	----------

Car. Retificadores - Baterias - Painéis																					
Circ.	Carga	P _{perm} (kW)	P _{trans} (kW)	N _o Cond.(N)	Compr. (m)	Método de Ref.	Fatores de Correção		I _{perm} (A)	I _{trans} (A)	IN (A)	IN/N (A)	IN'/N (A) (corrigida)	S _{CAP} (mm ²)	S _{SC} (mm ²)	S (mm ²)	R (ohm/km)	ΔV(%)	IN/0,7 (A)	ICAP (A)	I _b (A)
							F _T	F _A													
-	Bateria N°1 / Carregador Retificador N°1 (QR1) - C1	10,00	5,62	1	42,0	D	0,89	1,00	100,00	56,16	156,16	156,16	175,46	70	8,11	150	0,12	1,2593	223,086	247,42	250
-	Bateria N°2 / Carregador Retificador N°2 (QR2) - C2	10,00	5,62	1	39,0	D	0,89	1,00	100,00	56,16	156,16	156,16	175,46	70	8,11	150	0,12	1,1693	223,086	247,42	250
72-1A	Carregador Retificador N°1 (QR1) / Painel 1 - C3	10,00	5,62	1	12,0	B1	1,00	1,00	100,00	56,16	156,16	156,16	156,16	70	8,11	150	0,12	1,6191	223,086	309	250
72-1B	Carregador Retificador N°2 (QR2) / Painel 2 - C4	10,00	5,62	1	10,0	B1	1,00	1,00	100,00	56,16	156,16	156,16	156,16	70	8,11	150	0,12	1,4692	223,086	309	250
72-2A	Interligação Paineis Painel 1 / Painel 2 - C5	10,00	5,62	1	10,0	B1	1,00	1,00	100,00	56,16	156,16	156,16	156,16	70	8,11	150	0,12	1,9189	223,086	309	250
72-2B	Interligação Paineis Painel 2 / Painel 1 - C6	10,00	5,62	1	10,0	B1	1,00	1,00	100,00	56,16	156,16	156,16	156,16	70	8,11	150	0,12	1,769	223,086	309	250

Obs.: Cabos de cobre, unipolares, isolamento 0,6/1kV, PVC 70°C

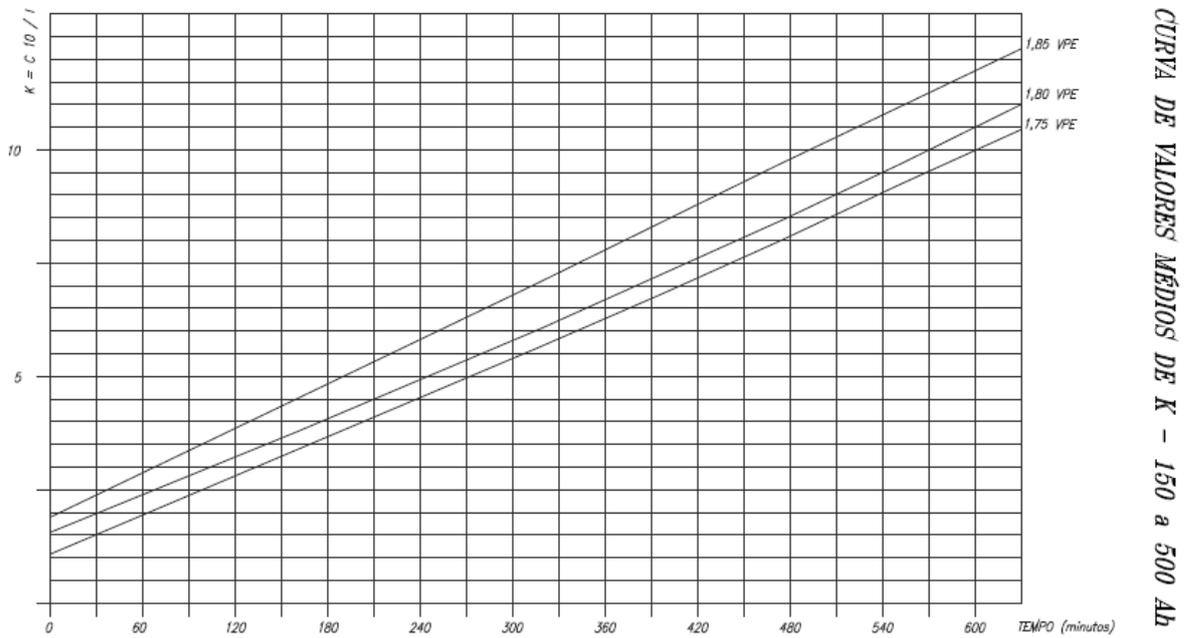
APÊNDICE II – Memorial de cálculo para cabos de corrente alternada.

Legenda	Projetado	NBR 5410/ IT	Calculado	Tabelado
---------	-----------	--------------	-----------	----------

Painel 3 - Cargas Essenciais																							
Circ.	Carga	Pot (kVA)	cosθ	Fase	N _{COND}	Compr. (m)	Método de Ref.	Fatores de Correção		Fator de Segurança (Fs)	IN (A)	IN/N (A)	IPER (A)	S _{CAP} (mm ²)	S _{SC} (mm ²)	S (mm ²)	R (ohm/km)	X (ohm/km)	ΔV(%) adm.	ΔV(%) acum.	IN/0,7 (A)	ICAP (A)	I _b (A)
								F _T	F _A														
52-1	Alimentação - TSA1 - C7	75,00	0,88	A, B, C	1	50,00	D	0,89	1,00	1,20	113,95	113,95	153,64	95,00	4,03	120	0,190	0,100	2,00	0,56	162,79	180,67	180
52-2	Alimentação - GMG1 - C8	114,00	0,88	A, B, C	1	50,00	D	0,89	1,00	1,20	173,21	173,21	233,53	185,00	4,29	240	0,094	0,098	2,00	0,51	247,44	264,33	250
52-3	Alimentação - GMG2 - C9	78,00	0,80	A, B, C	1	50,00	D	0,89	1,00	1,20	118,51	118,51	159,79	95,00	2,94	120	0,190	0,100	2,00	0,57	169,30	180,67	180
52-4	Interligação de Barras - C10	75,00	0,91	A, B, C	1	10,00	B1	1,00	1,00	1,20	113,95	113,95	136,74	70,00	3,97	95	0,230	0,100	3,00	0,69	162,79	207,00	180
52-6	Retificador 1 - 125 Vcc (QR1) - C11	16,34	0,80	A, B, C	1	30,00	B2	1,00	1,00	1,00	24,83	24,83	24,83	4,00	3,97	10	2,190	0,130	7,00	1,19	35,47	46,00	40
52-7	Retificador 2 - 125 Vcc (QR2) - C12	16,34	0,80	A, B, C	1	30,00	B2	1,00	1,00	1,00	24,83	24,83	24,83	4,00	3,97	10	2,190	0,130	7,00	1,19	35,47	46,00	40

Obs.: Cabos de cobre, unipolares, isolamento 0,6/1kV, PVC 70°C

ANEXO I - Os valores de Fator de Capacidade (K) Baterias Estacionárias Ventiladas – Tipo OPzS da Fulguris.



Fonte: Manual Técnico de Baterias Estacionárias Ventiladas – Fulguris.

ANEXO II - Resistências elétricas e reatâncias indutivas de fios e cabos isolados em PVC, HEPR e XLPE em condutos fechados (valores em Ω/km)

Resistências elétricas e reatâncias indutivas de fios e cabos isolados em PVC, HEPR e XLPE em condutos fechados (valores em Ω/km)			
Seção (mm ²)	Rcc	Rca	XL
1,5	12,1	14,48	0,16
2,5	7,41	8,87	0,15
4	4,61	5,52	0,14
6	3,08	3,69	0,13
10	1,83	2,19	0,13
16	1,15	1,38	0,12
25	0,73	0,87	0,12
35	0,52	0,63	0,11
50	0,39	0,47	0,11
70	0,27	0,32	0,1
95	0,19	0,23	0,1
120	0,15	0,19	0,1
150	0,12	0,15	0,1
185	0,099	0,12	0,094
240	0,075	0,094	0,098
300	0,06	0,078	0,097
400	0,047	0,063	0,096
500	0,037	0,052	0,095
630	0,028	0,043	0,093
800	0,022	0,037	0,089
1000	0,018	0,033	0,088

Fonte: Condumax.

ANEXO III – Comportamento da resistência interna de acumuladores (valores em mΩ) e da corrente de curto circuito em função do tipo de acumulador.

Elemento chumbo ácido ventilado	Corrente de curto circuito (A)	Resistencia interna (mOhms) a 25°C
2 OPzS-100	1680	1,19
3 OPzS-150	2000	1,00
4 OPzS-200	2500	0,80
5 OPzS-250	2857	0,70
6 OPzS-300	3636	0,55
5 OPzS-350	4000	0,50
6 OPzS-420	4444	0,45
7 OPzS-500	5000	0,4
6 OPzS-600	5405	0,37
7 OPzS-700	5714	0,35

Fonte: Manual Técnico da Fulguris.