



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LUÍSA ZACARIAS MELO

INTRODUÇÃO À COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTOS EM  
SUBESTAÇÕES: UM TUTORIAL

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2013

LUÍSA ZACARIAS MELO

INTRODUÇÃO À COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTOS EM  
SUBESTAÇÕES: UM TUTORIAL

*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 Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Julho de 2013

LUÍSA ZACARIAS MELO

# INTRODUÇÃO À COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTOS EM SUBESTAÇÕES: UM TUTORIAL

*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  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

*Dedico este trabalho à minha família, que  
sempre esteve presente em minha educação, me  
ajudando sempre. Amo muito todos vocês.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e por me dar paciência, força e saúde me ajudando a chegar aonde cheguei.

Agradeço à minha mãe, Fernanda Zacarias, e meu Pai, Carlos Melo, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por serem amigos os quais posso contar sempre. Por confiarem e acreditarem sempre em mim, mesmo quando nem eu acreditava. Por sempre me dar estímulo, apoio, amor e carinho bem como críticas as quais sempre me ajudaram.

A Tia Rosinha, Tio Everaldo, Vovó Creusa, pela participação constante em minha educação. Bem como pelos incentivos, apoios e exemplos que foram essenciais em minha vida.

Ao meu namorado, Rafael Renart que sempre tinha uma palavra de incentivo, de força, de apoio fazendo com que eu superasse todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Aos meus familiares e amigos, que sempre estiveram comigo em horas importantes da minha vida.

Aos meus amigos de curso, que viveram intensamente comigo tudo o que vivi, me ajudando muito nessa caminhada, vocês foram essenciais.

Ao professor Tarso Vilela que me orientou no Projeto de Engenharia Elétrica e estágio integrado, sempre com muita disponibilidade.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## RESUMO

O presente trabalho é um tutorial de como fazer a coordenação de isolamento em um projeto, visando-se proteger os equipamentos de uma subestação de prováveis surtos. Sabe-se que a determinação das sobretensões, que podem ocorrer em um sistema elétrico, é de fundamental importância, uma vez que fornece subsídios para a coordenação do isolamento de redes de distribuição, linhas de transmissão e subestações, bem como para a especificação dos equipamentos.

Destacam-se procedimentos de como fazer a coordenação de isolamentos a partir do estudo de caso da subestação QUIXERÉ, fornecendo informações sobre possíveis falhas no sistema antes de sua ocorrência, e auxiliando a compreensão de suas causas e possíveis meios de prevenção.

Faz-se uma revisão bibliográfica e pesquisas de campo conduzindo a uma apresentação conceitual, bem fundamentada, dos princípios gerais de coordenação de isolamentos, permitindo que um projetista calcule as distâncias elétricas mínimas sem maiores problemas. Concluiu-se a partir do estudo de caso da SE QUIXERÉ que o procedimento tornou-se ainda mais claro, pois mostra um caso real, utilizando valores reais de campo. Por fim, sugeriu-se que, dando segmento a este estudo, seja realizada uma análise sobre o cálculo da distância de segurança como ferramenta essencial para a área de segurança e coordenação de isolamento.

**Palavras-chave:** coordenação de isolamento, subestação, sobretensão

# SUMÁRIO

Agradecimentos.....	5
Resumo.....	vi
Sumário .....	vii
<b>1</b> Introdução.....	8
1.1 Justificativa.....	9
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1 Objetivo Geral.....	10
1.2.1 Objetivos Específicos.....	10
1.3 Metodologia Utilizada.....	10
1.4 Estrutura do Trabalho.....	11
<b>2</b> Referencial Teórico.....	12
2.1 Sobretensão.....	12
2.2 Classificação das Sobretensões.....	12
2.2.1 Sobretensão Temporária.....	12
2.2.2 Sobretensão Transitória.....	13
2.3 Solicitações de Sobretensão.....	15
2.4 Coordenação de Isolamento.....	15
2.4.1 Isolamentos.....	16
2.4.2 Métodos de Coordenação de Isolamento.....	18
2.4.3 Definição de grandezas básicas para a Coordenação de Isolamento.....	20
<b>3</b> Procedimento Utilizado para a Coordenação de Isolamento.....	29
3.1 Itens necessários para o projeto.....	29
3.2 Roteiro para o cálculo da Coordenação de Isolamento.....	29
3.2.1 Definição do Tipo de Isolamento.....	29
3.2.2 Definição do Método.....	30
3.2.3 Conhecer a Solicitação da Sobretensão.....	30
3.2.4 Cálculo do CFO.....	30
3.2.5 Determinação do Fator de GAP.....	30
3.2.6 Determinação da Distância Mínima.....	30
<b>4</b> Estudo de Caso.....	31
4.1 Projeto da Coordenação de Isolamento da SE Quixeré.....	31
4.1.1 Surto de Manobra.....	31
4.1.2 Impulso Atmosférico.....	36
<b>5</b> Conclusões.....	47
Bibliografia.....	48
ANEXO A – TABELAS.....	49

# 1 INTRODUÇÃO

Uma rede de energia elétrica deve ter capacidade para fornecer continuamente a energia elétrica, atendendo às exigências relacionadas à qualidade do serviço. Entretanto, como a confiabilidade de um sistema elétrico de potência está condicionada à ocorrência de surtos e à probabilidade de ruptura de isolamentos, para garantir que não haja ocorrências de falhas de isolamento em linhas e subestações é necessário se fazer uma correta coordenação de isolamento entre os equipamentos e os dispositivos de proteção.

A grande maioria das interrupções de serviço está diretamente relacionada às sobretensões nas redes de distribuição. Estas são provocadas tanto por descargas atmosféricas como por sobretensões de manobra na rede, levando a uma indisponibilidade momentânea ou permanente devido a possíveis defeitos de equipamentos.

Este trabalho apresenta uma introdução à Coordenação de Isolamento (CI), área do Processamento de Energia que tem como um dos seus objetivos viabilizar um contínuo fornecimento de energia elétrica com maior eficiência.

A partir da figura 1 é possível observar as distâncias entre um equipamento e outro. Nesse trabalho será exposto o procedimento para projetar tais distâncias. Os equipamentos estudados nesse trabalho serão: o transformador (TR), o para-raios(PR) e o disjuntor (DJ).

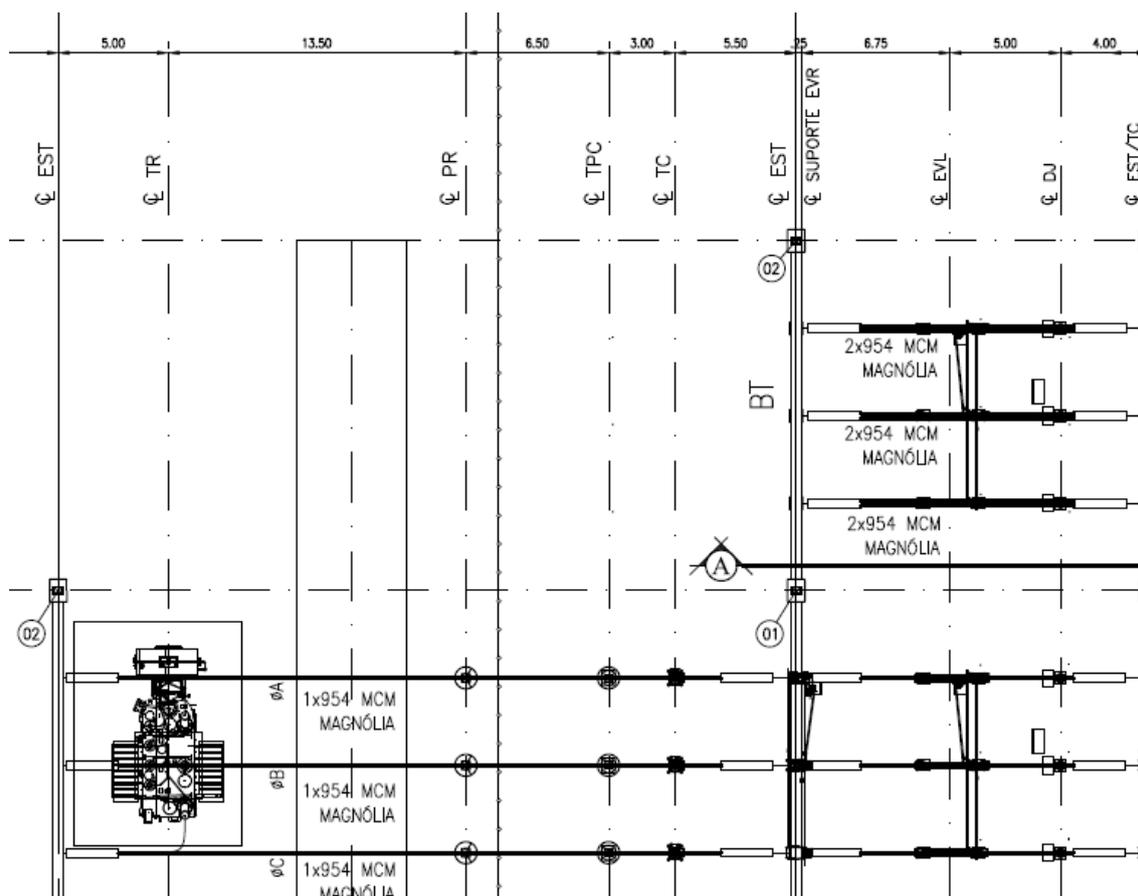


Figura 1. Distâncias Elétricas Mínimas

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A determinação das sobretensões que podem ocorrer em um sistema elétrico é de fundamental importância, uma vez que fornece subsídios para a coordenação do isolamento de redes de distribuição, linhas de transmissão e subestações, bem como para a especificação dos equipamentos.

Diante disso, este estudo surgiu para observar procedimentos de como fazer a coordenação de isolamento, fornecendo informações sobre possíveis falhas no sistema antes de sua ocorrência, e auxiliando a compreensão de suas causas e possíveis meios de prevenção.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

- Desenvolver um procedimento para coordenação de isolamento que traga segurança ao sistema elétrico, baseando-se em normas e outras referências bibliográficas.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evidenciar os principais aspectos que influenciam a coordenação de isolamento;
- Desenvolver um tutorial que ofereça os passos iniciais para iniciantes nos estudos de uma coordenação de isolamento.

## 1.3 METODOLOGIA UTILIZADA

Para a realização desse trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos e itens referentes aos assuntos em livros, apostilas, apresentações e normas técnicas, com objetivo de reunir informações importantes sobre a coordenação de isolamentos efetuada nas subestações.

Após isso, fez-se uma pesquisa de campo, na qual foram obtidos dados sobre o caso real da Subestação (SE) Quixeré, para que fosse realizado o estudo de caso com base em uma situação real.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. No capítulo 1, como visto, é dada uma introdução sucinta sobre o tema, quais os objetivos deste trabalho, a motivação para realizá-lo e a metodologia que foi empregada para confeccioná-lo.

No capítulo 2, encontram-se reunidas todas as informações e referências teóricas relativas à coordenação de isolamento, bem como conceitos básicos e necessários para o bom entendimento do trabalho.

O capítulo 3 traz os passos ou técnicas que constituem o tutorial para realizar a coordenação de isolamento. O capítulo 4 representa a parte prática deste estudo monográfico, na qual se aplicou as técnicas descritas no capítulo 3 através de dados reais recolhidos na pesquisa de campo a fim de exemplificar o tema principal deste trabalho, ou seja, neste capítulo mostra-se um estudo de caso em que se apresenta a coordenação de isolamento da SE Quixeré.

Por fim, no capítulo 5, fazem-se as conclusões do trabalho, expondo os resultados do estudo e verificando o cumprimento dos objetivos estabelecidos para este trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

No decorrer deste Capítulo serão apresentadas algumas definições necessárias ao entendimento do tema, bem como conceitos específicos aplicáveis à CI.

### 2.1 SOBRETENSÃO

Segundo a NBR 6939:2000, as sobretensões são distúrbios que ocorrem sobre a tensão nominal do sistema. Esses distúrbios ocorrem entre fases, ou entre fase e terra, e apresentam um valor de crista acima do correspondente à tensão máxima do sistema ( $V_m$ ), deduzida do valor máximo do equipamento ( $V_m \sqrt{2} / \sqrt{3}$ ).

Essa tensão ( $V_m$ ) é a máxima tensão de linha eficaz que pode ser mantida em condições normais de operação, em qualquer instante e em qualquer ponto do sistema. A tensão de equipamento é aquela para a qual os equipamentos e outros componentes do sistema são projetados para operação contínua sem restrições ou deterioração, considerando-se o seu isolamento e outras características.

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS SOBRETENSÕES

Dependendo da forma de onda e duração, as sobretensões podem ser classificadas em sobretensões temporárias ou transitórias.

#### 2.2.1 SOBRETENSÃO TEMPORÁRIA

Uma sobretensão oscilatória com duração relativamente longa (segundos ou até mesmo minutos) se apresenta não amortecida ou com fraco amortecimento, conforme definido na NBR 6939:2000. Essas sobretensões são geralmente oriundas de operações de manobra (operações de chaveamento) como rejeição de carga ou defeito. Por exemplo, falta fase-terra em um sistema aterrado por alta impedância ou não aterrado, ou a partir do efeito de elementos não lineares no sistema ou ainda a partir de uma combinação dessas situações.

### 2.2.2 SOBRETENSÃO TRANSITÓRIA

É uma sobretensão fortemente amortecida, oscilatória ou não oscilatória, duração curta de poucos milissegundos ou menos. Tais sobretensões, de acordo com a NBR 6939:2000, são classificadas em: sobretensões de frente lenta e de frente rápida.

- Sobretensões de frente lenta (Sobretensão de manobra):

A sobretensão usualmente unidirecional pode ser oscilatória, com frente de onda lenta e forte amortecimento. Possui tempo de crista tal que  $20 \mu s < T_1 \leq 5000 \mu s$ , e tempo até o meio valor (na cauda)  $T_2 \leq 20 ms$ . Na Figura 2 é possível identificar os tempos  $T_1$  (Tempo de Crista) e  $T_2$  (Tempo de cauda). Segundo a NBR 6939:2000:

Essas sobretensões podem originar-se de faltas (curto-circuito), operações de chaveamento, operação de manobra. Os principais eventos que provocam esse tipo de sobretensão em sistemas de transmissão são a energização de transformadores, rejeição de carga, energização e religamento de linhas de transmissão e eliminação de faltas. Sobretensões de manobra tornam-se importantes em níveis elevados de transmissão, acima de 245 kV. Uma importante característica é o aspecto probabilístico, uma vez que o exato instante das operações de fechamento ou abertura das chaves, ou da ocorrência de faltas, não pode ser determinado de maneira prévia. Dessa forma os sistemas são projetados considerando a probabilidade de ocorrência das sobretensões e sua distribuição no sistema, além da relação custo-benefício.

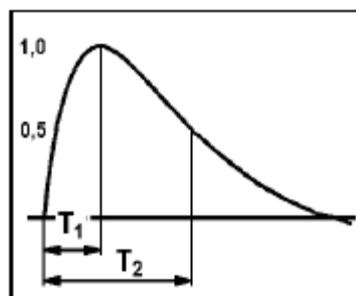


Figura 2. Impulso de Manobra.  
Fonte: NBR 6939:2000.

- Sobretensões de frente rápida (Impulso atmosférico):

É uma sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo de crista, tal que  $0,1 \mu s < T1 \leq 20 \mu s$ , e tempo até o meio valor (tempo de cauda)  $T2 \leq 300 \mu s$ . Podem originar-se de operações de chaveamento, descargas atmosféricas ou faltas. Na Figura 3 identifica-se  $T1$  e  $T2$  para esta Sobretensão.

Sobretensões atmosféricas são causadas pela incidência de descargas elétricas atmosféricas, em um determinado ponto do sistema. Tal incidência pode acontecer diretamente sobre o equipamento, sobre as linhas de transmissão ou de forma indireta, por indução. Graves danos podem ser causados aos equipamentos, como o rompimento do dielétrico ou a diminuição da vida útil por estresse repetitivo. Situações perigosas para seres-vivos podem surgir, além da redução na continuidade dos serviços prestados devido a interrupções (NBR 6939:2000).

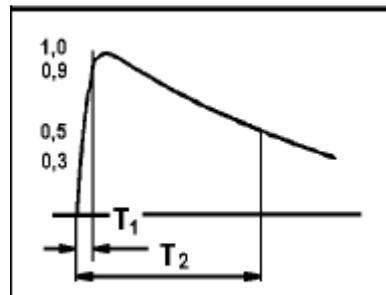


Figura 3. Impulso atmosférico.  
Fonte: NBR 6939:2000

É importante lembrar que as representações das figuras 2 e 3 não ocorrem na prática, são usadas apenas para efeito de estudo.

Além da classificação apresentada, pode-se observar ainda que, de maneira acadêmica, existem dois outros grupos: as sobretensões de origem externa e as sobretensões de origem interna.

No primeiro grupo, as sobretensões são provenientes de causas externas ao sistema considerado, como, por exemplo, as descargas atmosféricas que agem diretamente sobre os sistemas elétricos ou nas suas proximidades. E as sobretensões do segundo grupo causadas por eventos dentro do sistema em consideração, tais como curto circuitos ou manobras de equipamentos. Entretanto, essa classificação não atende aos interesses relacionados à especificação dos equipamentos, sendo mais adequada a classificação, definida pela norma NBR 6939/99 /1.

## 2.3 SOLICITAÇÕES DE SOBRETENSÃO

É necessária a determinação das solicitações impostas ao isolamento, de modo a permitir que se dimensione o isolamento para suportar essas solicitações e não incorrer em um gasto desnecessário e nem subdimensionar o isolamento.

A norma brasileira NBR 8186:1983 classifica os esforços elétricos a que os equipamentos estarão submetidos, de acordo com a amplitude, o tempo de duração e o grau de amortecimento da tensão ou sobretensão, ao invés da localização de sua ocorrência. Tais solicitações são:

- i. Tensões Operativas
- ii. Sobretensões temporárias
- iii. Sobretensões de manobra (frentes de onda lentas)
- iv. Sobretensões de Impulso atmosférico (frentes de onda rápidas)

As solicitações utilizadas para a realização do cálculo da coordenação de isolamento são as sobretensões de manobra (sobretensões internas) e de impulso atmosférico (sobretensões externas) descritas no capítulo anterior.

A análise das solicitações com as suportabilidades dos isolamentos foi feita levando-se em consideração aspectos técnico-econômicos e segurança de instalações, permitindo-se, dessa forma, o adequado dimensionamento dos sistemas elétricos.

## 2.4 COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

As sobretensões não podem ser evitadas em um sistema de potência, nem totalmente eliminadas, mas podem ser obtidos valores menos prejudiciais com a aplicação de métodos de controle. Estes métodos têm o objetivo de limitar as sobretensões a valores compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos. E várias são as formas de controle de sobretensão, sendo um deles a coordenação de isolamento.

A norma NBR 6939: 2000 define a coordenação do isolamento como “um conjunto de procedimentos utilizados na seleção da suportabilidade dielétrica de equipamentos elétricos”. Essa definição é feita considerando-se as tensões que podem se

manifestar no sistema, as sobretensões de manobra ou atmosférica. Leva-se em conta também as características dos dispositivos de proteção de modo a reduzir a níveis econômicos e operacionalmente aceitáveis, bem como a probabilidade de danos aos equipamentos e/ou interrupções do fornecimento de energia, causada por aquelas tensões.

Em outras palavras, a coordenação do isolamento é um processo de correlação da suportabilidade dielétrica dos equipamentos elétricos com as sobretensões esperadas e as características dos equipamentos para proteção contra surtos.

A coordenação de isolamento envolve a determinação das sobretensões aos quais as redes de distribuição, linhas de transmissão e equipamentos no interior da subestação estão submetidas. Envolve também a seleção adequada das suportabilidades elétricas e das distâncias de isolamento, considerando-se as características dos dispositivos de proteção disponíveis.

#### 2.4.1 ISOLAMENTOS

Em sistemas elétricos, o isolamento é o fator primordial, pois sem ele nenhum equipamento e nenhuma instalação podem funcionar. As solicitações sobre o isolamento são variadas, desde a solicitação permanente, na qual o isolamento fica submetido enquanto está ligado, passando por sobretensões temporárias que decorrem de condições operacionais ou defeitos no sistema, até as sobretensões provocadas por descargas atmosféricas (conforme comentado no tópico 2.3.).

O isolamento deve ser dimensionado para suportar essas solicitações, uma vez que, se uma falha de isolamento ocorre, o sistema elétrico deixa de funcionar pelo menos numa parte. Entretanto, o isolamento apresenta um custo e dificuldades de fabricação.

Como dito anteriormente, a coordenação de isolamento envolve a suportabilidade do isolamento, esta por sua vez é definida pela tensão de ruptura, também conhecida como tensão suportável, que é o valor de tensão de ensaio a ser aplicado nas condições especificadas em um ensaio de tensão suportável, durante o qual um número especificado de descargas disruptivas é tolerado. De acordo com a

NBR 8186:1983, a tensão suportável é designada como ( $P_w$  representa a probabilidade de suportar a descarga):

Tensão suportável assumida convencional, quando o número de descargas disruptivas tolerado é zero. Seu significado corresponde a uma probabilidade de suportar  $P_w = 100\%$ . Tensão suportável estatística, quando o número de descargas disruptivas tolerado é relacionado a uma probabilidade de suportar especificada. Nesta Norma a probabilidade especificada é  $P_w = 90\%$ .

Ou seja, a tensão de disrupção é a maior tensão que um equipamento pode ser submetido sem que ocorra a disrupção do meio. Conforme Melo (2013), a suportabilidade do isolamento é afetada por vários fatores, dentre os quais, se podem destacar os seguintes:

- Amplitude, forma de onda e polaridade da tensão aplicada;
- Tipo do isolamento (sólido, líquido, gasoso) e a homogeneidade ou conteúdo de impurezas;
- Condições ambientais (temperatura, umidade, pressão);
- Deterioração provocada por solicitações previamente aplicadas ao isolamento;
- Efeitos da interface entre o isolamento e a superfície do condutor e do formato dos eletrodos.

Assim, torna-se importante diferenciar os tipos de isolação em função do seu comportamento frente a uma descarga. Dentro desse conceito, as isolações podem ser classificadas, de acordo com a NBR 6939:2000, como isolação autorrecuperante ou isolação não autorrecuperante.

As isolações autorrecuperantes, também chamadas de isolamento autorregenerativo, são aquelas que recuperam integralmente as suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma disrupção. Essas propriedades são recuperadas pela própria renovação do meio dielétrico. Os isolamentos externos em ar, alguns isolamentos internos em gás e alguns isolamentos líquidos apresentam propriedades autorrecuperantes.

Em um sistema elétrico, esse tipo de isolação pode ser encontrado nas superfícies externas de cadeias de isoladores; na parte externa das buchas e

transformadores, bem como nos isolamentos em ar, correspondentes aos espaçamentos entre condutores, condutor-estrutura e barramento-estrutura.

As isolações não autorrecuperantes, também chamadas de isolamento não autorregenerativo, são aquelas que perdem parcialmente ou não recuperam integralmente as suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga disruptiva, ou seja, após uma descarga, ocorre a danificação parcial ou total das suas propriedades dielétricas. Os dielétricos sólidos apresentam propriedades não recuperantes.

A isolação não autorrecuperante é normalmente uma parte interna dos equipamentos de um sistema de potência e consiste de uma combinação de diferentes tipos de materiais sólidos, líquidos ou gasosos. Constitui os equipamentos mais importantes de uma subestação.

É importante notar que nos isolamentos não autorregenerativos, o efeito de degradação é cumulativo e provoca o que pode ser denominado envelhecimento do isolamento.

#### 2.4.2 MÉTODOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

Existem dois métodos nos quais a coordenação de isolamento é possível de ser realizada em função das sobretensões, e ambos os métodos procuram estabelecer a resistência do isolamento em nível superior ao da solicitação resultante das sobretensões. São eles: o Método Convencional e o Método Estatístico.

O método convencional, também conhecido como método determinístico é apropriado para isolamentos não autorregenerativos, como é o caso de um enrolamento interno de um transformador, devido ao desconhecimento do risco de falha envolvido. Como os testes para estes equipamentos são normalmente destrutivos, não são conhecidas as curvas probabilísticas, e o equipamento não admite uma probabilidade de ruptura. Este método é baseado no dimensionamento dos isolamentos de maneira que esses apresentem níveis de suportabilidade mínimos superiores às máximas sobretensões possíveis de serem impostas ao isolamento através da utilização de uma margem de segurança.

O método convencional para a definição da coordenação do isolamento tem sido bastante utilizado para sistemas elétricos em todas as faixas de tensão, em especial para sistemas até 245 kV.

O princípio básico da coordenação do isolamento pelo método determinístico está ilustrado na Figura 4. A curva superior indica a característica de suportabilidade da isolação, no caso um transformador, enquanto que a curva inferior indica a característica do dispositivo de proteção.

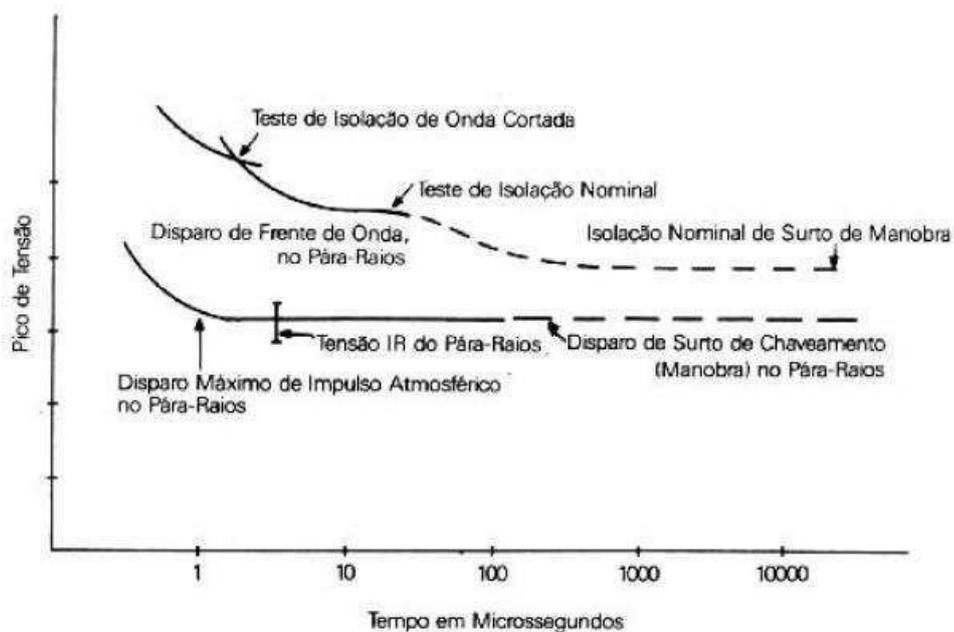


Figura 4. Princípio Básico da Coordenação de Isolamento pelo Método Convencional  
Fonte: COLEON, 2011, p.21.

O Método Estatístico, também conhecido como método probabilístico, é baseado na seleção dos níveis de isolamento através de um determinado risco de falha selecionado, levando em consideração a natureza estatística das sobretensões e da suportabilidade do dielétrico. Com a determinação desse risco de falha, é possível utilizá-lo como nível de segurança na determinação da isolação.

Nesse método, o isolamento é dimensionado de tal forma que a probabilidade de cedência seja inferior ou igual a um valor fixado de antemão e que caracteriza o nível de segurança necessário.

Os níveis de isolamentos considerados no método são padronizados e ditados pela tensão nominal de operação dos equipamentos. Eles são chamados de Nível Básico de Isolamento (NBI) ou BIL (*Basic Impulse Level*), que estabelece a suportabilidade do equipamento em relação à sobretensões de origem externa, e o Nível de Impulso de Manobra (NIM) ou BSL (*Basic Switching Level*), que estabelece a suportabilidade do equipamento para sobretensões de origem interna.

A aplicação do método estatístico é mais apropriada à isolação autorrecuperante, na qual sua suportabilidade estatística pode ser determinada através das descargas disruptivas. Sua utilização é para tensões acima de 245 kV.

No caso de isolamentos autorrecuperantes, como isoladores de linhas de transmissão, as tensões nominais suportáveis admitem uma probabilidade de disrupção. Para esses isolamentos, é importante conhecer a tensão com 50% de probabilidade de disrupção, denominada tensão crítica de disrupção ou de descarga ( $V_{50\%}$ ). Também chamada de *Critical Flashover Voltage* (CFO), essa tensão é utilizada para calcular a distância elétrica de projeto, tanto para sobretensões de manobra como sobretensões atmosféricas. O valor de  $V_{50\%}$  é o valor médio. Vale ressaltar que existem dois valores de CFO, um para sobretensões de manobra, e outro para sobretensões atmosféricas.

### 2.4.3 DEFINIÇÃO DE GRANDEZAS BÁSICAS PARA A COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

#### 2.4.3.1 SOBRETENSÃO DE MANOBRA

##### a) Tensão Suportável FASE-TERRA (BSL)

A configuração de isolação fase-terra é, segundo a NBR 6939:2000, uma configuração de isolação trifásica em que dois terminais de fase são desconsiderados, exceto em casos particulares quando o terminal de neutro é aterrado.

Segundo a NBR 8186-1983, no Método Estatístico, podem ser feitas rápidas avaliações do risco de falha, em que os cálculos são realizados, fazendo-se algumas suposições, geralmente aceitáveis, com respeito às leis matemáticas. As distribuições reais das sobretensões e das probabilidades de descarga das isolações são representadas supondo-se que elas são distribuições de Gauss, com desvios padrões conhecidos. Assim, as distribuições reais das sobretensões tornam-se o surto estatístico ( $V_{\delta}$ ) e as probabilidades de descarga das isolações tornam-se a tensão suportável estatística ( $V_w$ ). Na figura 5 segue a curva de probabilidade da distribuição de Gauss.

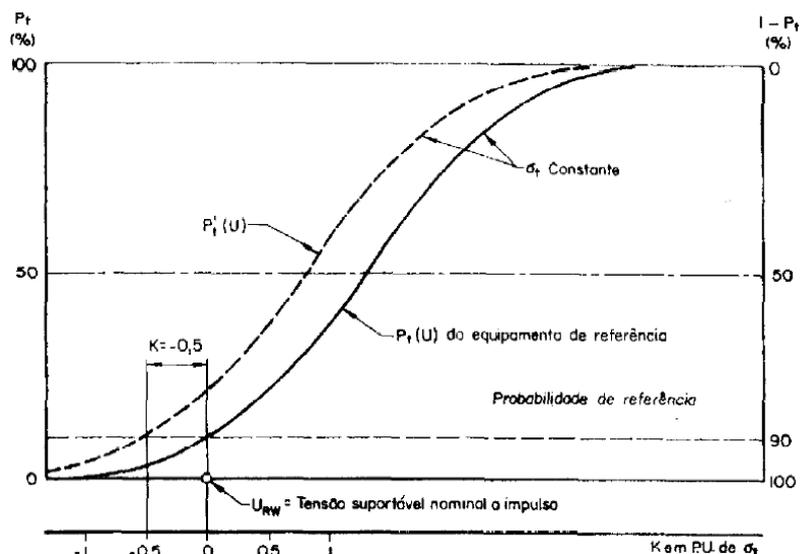


Figura 5. Curva de Probabilidade  
Fonte: NBR 8183:1983

Tensão de manobra de ensaio que um isolamento autorregenerativo tem, por exemplo, 90% de probabilidade de suportar (10 % de probabilidade de descarga). Em uma distribuição normal esta tensão situa-se a menos de  $1,3\sigma$  do valor de 50% (CFO). Pois  $k$  é uma constante definida conforme apresentado na Tabela 1.

No caso de sobretensões de manobra, o  $\sigma$  é normatizado e vale  $\sigma = 6\%$ .

$$BSL = V_{50\%} (1 - k \cdot \sigma) \quad (1)$$

Os valores de BSL, que devem ser usados como referência, encontram-se na Tabela 3, apresentada no Anexo A.

Tabela 1

Relação da probabilidade de suportar com valor da constante  $k$ . Fonte: VAREJÃO, 2010, p10.

Probabilidade de suportar	Valor de $k$
90%	1,3
98%	2,05
99,97%	3,00

No Método Convencional, a tensão suportável fase-terra é o valor de crista especificado de uma tensão de surto de manobra para o qual não deve ocorrer descarga disruptiva em uma isolação submetida a um número determinado de aplicações, em

condições especificadas. Este conceito é aplicável somente ao isolamento não autorregenerativo e é normalmente denominada de tensão suportável convencional.

Realiza-se o cálculo conforme o método anterior, porém a tensão encontrada ainda não é a tensão de suportabilidade, ou seja, a tensão suportada pelo isolamento. Para tanto, é necessário ainda multiplicar pela margem de segurança.

$$V_w = MS * V_\delta \quad (2)$$

em que  $V_\delta$  representa a sobretensão e  $V_w$  é a suportabilidade.

#### b) Distância Elétrica Mínima

As distâncias elétricas mínimas fase-terra e fase-fase nos isolamentos autorregenerativos são aquelas que quando submetidas às tensões de manobra tem, por exemplo, 90% de probabilidade de não apresentar descarga.

#### c) Metodologia de Cálculo

$$V_{90\%} = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma) \quad (3)$$

em que,  $V_{90\%}$  é a tensão com 90% de probabilidade de não apresentar descarga e  $V_{50\%}$  é a tensão de disrupção 50% em kV.

Para surtos de manobra:  $V_{90\%} = BSL \rightarrow \sigma = 6\%$  assim,

$$BSL = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma)$$

$$V_{50\%} = \frac{BSL}{(1 - 1,3\sigma)}$$

Obtido o valor de CFO, é possível calcular através de duas equações distintas, dois valores de distância. Porém, visando a segurança apenas um dos valores será usado na hora do projeto da subestação.

$$V_{50\%} = Km * 500 * D^{0,6}$$

$$V_{50\%} = Km * \frac{3400}{1 + \frac{8}{D}}$$

em que  $V_{50\%}$  é a tensão de ruptura 50% em kV pico,  $D$  é distância em metros,  $Km$  é o fator de intervalo (GAP), caracterizando a forma dos eletrodos. A Tabela 4 (apresentada no Anexo A) mostra os diversos fatores de GAP ( $Km$ ).

$$D = \sqrt[0,6]{\frac{V_{50\%}}{500 * Km}} \quad (4)$$

$$D = \frac{8 * V_{50\%}}{3400Km - V_{50\%}} \quad (5)$$

Tendo feito uso das duas equações, e obtidas às duas distâncias escolhe-se a de maior valor. Esta será a distância para sobretensão de manobra.

d) Tensão Suportável FASE-FASE (BSL)

Essa é uma configuração de isolamento trifásica onde um terminal de fase é desconsiderado. Em casos particulares, o terminal de neutro e o terminal de terra são também desconsiderados. (NBR 6939:2000)

e) Distância Elétrica Mínima

Até o início da década de 1970, a literatura existente para a determinação das distâncias entre fases não era extensa, e as normas não apresentavam recomendações para as especificações de ensaio ou para os níveis de isolamento. No decorrer dessa década, a publicação de Paris et al.(1974), recomendava que, para níveis de isolamento superiores a 650 kV, os espaçamentos entre fases definidos para os esforços de manobra suportam as solicitações de origem atmosférica.

A máxima sobretensão teórica de manobra seria igual ao dobro da máxima tensão fase terra, considerando a presença em duas fases adjacentes sobretensões fase-terra de valor igual, com pico ocorrendo simultaneamente e polaridade oposta.

Na falta de valores propostos por norma foi sugerido um “**fator P vezes**” para se multiplicar pelo nível básico de isolamento adotado.

$P = 1.6$  para valores de Nível Básico de Isolamento de Manobra Fase-Terra entre 650 e 950 kV.

$P = 1.7$  para valores de Nível Básico de Isolamento de Manobra Fase-Terra entre 1050 e 1175 kV.

$P = 1.8$  para valores de Nível Básico de Isolamento de Manobra Fase-Terra igual ou superiores a 1300 kV.

Com base em um trabalho posterior de *Gallet G., Autzler B., Riu J.P.*, no ano de 1978, intitulado *Analysis of the Switching Impulse Strenght of Phase to Phase Air Gaps* – IEEE, sugere-se que se use a equação (5) usada na determinação da distância de isolamento fase-terra, apresentada anteriormente, para cálculo das distâncias fase-fase.

f) Metodologia de Cálculo

$$V_{90\%} = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma)$$

Para surtos de manobra:  $V_{90\%} = BSL(ff) = P * BSL(ft) \rightarrow \sigma = 6\%$ ; assim

$$BSL(ff) = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma)$$

$$V_{50\%} = \frac{BSL(ff)}{(1 - 1,3\sigma)}$$

$$V_{50\%} = Km * \frac{3400}{1 + \frac{8}{D}}$$

$$D = \frac{8 * V_{50\%}}{3400Km - V_{50\%}}$$

### 2.4.3.2 SOBRETENSÃO ATMOSFÉRICA

#### a) Tensão Suportável FASE-TERRA (BIL)

A configuração de isolamento fase-terra é, segundo a NBR 6939:2000, uma configuração de isolamento trifásica onde dois terminais de fase são desconsiderados e, exceto em casos particulares, o terminal de neutro é aterrado.

No Método Estatístico, a tensão de impulso de ensaio que um isolamento autorregenerativo tem, por exemplo, 90% de probabilidade de suportar (10% de probabilidade de descarga). Em uma distribuição normal esta tensão situa-se a menos de  $1,3\sigma$  do valor de 50% (CFO). Pois  $k$  é uma constante tabelada. (ver Tabela 1).

No caso de surto atmosférico o valor de  $\sigma$  é normatizado e vale  $\sigma = 3\%$

$$BIL = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma) \quad (6)$$

No Método Convencional, a tensão de impulso de ensaio é aquela que um isolamento não regenerativo é capaz de suportar sem apresentar descarga.

#### b) Distância Elétrica Mínima

As distâncias elétricas mínimas fase-terra nos isolamentos autorregenerativos são aquelas que quando submetidas às tensões de impulso tem, por exemplo, 90% de probabilidade de não apresentar descarga.

#### c) Metodologia de Cálculo

$$V_{90\%} = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma)$$

Para surtos atmosféricos:  $V_{90\%} = BIL \rightarrow \sigma = 3\%$  assim,

$$BIL = V_{50\%} (1 - 1,3\sigma)$$

$$V_{50\%} = \frac{BIL}{(1 - 1,3\sigma)}$$

A partir daí acha-se a distância através da Figura 6, utiliza-se o fator de GAP do projeto (ver Tabela 4, no Anexo A), encontra-se a relação  $\frac{V_{50\%}}{D}$  e iguala-se essa relação ao valor do CFO ( $V_{50\%}$ ) anteriormente calculado.

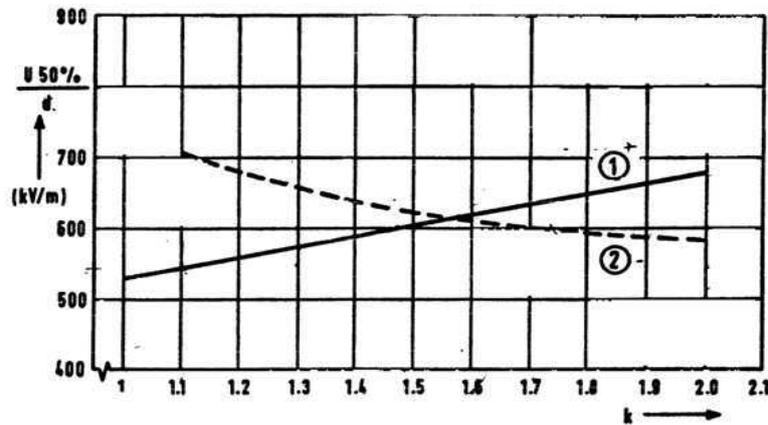


Figura 6. Coeficiente de ruptura  $\frac{V_{50\%}}{D}$  dos intervalos em ar sem cadeia de isoladores para impulsos atmosféricos em função de K; (1) Polaridade positiva, a seco e sob chuva; (2) Polaridade negativa, a seco e sob chuva. Fonte: VAREJÃO, 2010, p.19

E assim:

$$D = \frac{V_{50\%}}{\text{Relação Encontrada}} \quad (7)$$

As distâncias relativas às solicitações atmosféricas são calculadas pela figura 6, em que:

Para polaridade positiva e  $Km \leq 1.6$

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 550 \quad Km = 1.1$$

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 570 \quad Km = 1.3$$

E para polaridade negativa e  $Km > 1.6$

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 600 \quad Km = 1.7$$

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 585 \quad Km = 2.0$$

Fazendo uma interpolação linear na função, tem-se;

Para polaridade positiva:

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 440 + 100Km$$

Para polaridade negativa:

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 685 - 50Km$$

Assim,

$$D(+)=\frac{V_{50\%}}{440+100Km} \quad (8)$$

$$D(-)=\frac{V_{50\%}}{685-50Km} \quad (9)$$

Agora que as distâncias foram calculadas, escolhe-se a favor da segurança escolhendo assim a maior delas.

d) Tensão Suportável FASE-FASE (BIL)

Essa é uma configuração de isolamento trifásica onde um terminal de fase é desconsiderado. Em casos particulares, o terminal de neutro e o terminal de terra são também desconsiderados. (NBR 6939:2000)

Para isolação fase-fase, tensão de 1kV até 245kV, a tensão suportável normalizada fase-fase de impulso atmosférico é igual à tensão suportável fase-terra de impulso atmosférico.

e) Distância Elétrica Mínima

Tendo em vista que as entradas de linha são protegidas por para-raios de óxido de zinco visualizam-se as seguintes hipóteses para indicar a máxima solicitação atmosférica entre fases:

- Dobro da tensão residual (IR) do para-raios ZnO para uma corrente compatível com o Nível de Isolamento;
- Nível básico de isolamento fase-terra acrescido da margem de 20%.

Nesse trabalho será usada essa segunda hipótese. Segundo Varejão (2010, p.25), recomenda-se também utilizar a expressão  $V_{50\%} = 550D$  para todos os tipos de configuração.

f) Metodologia de Cálculo

$$BIL(ff) = 1,2 * BIL(ft)$$

$$V_{50\%} = \frac{BIL(ff)}{(1 - 1,3\sigma)} \rightarrow \sigma = 3\%$$

$$V_{50\%} = 550D$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{550}$$

## 3 PROCEDIMENTO UTILIZADO PARA A COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

Neste capítulo, encontra-se o procedimento passo a passo para se realizar uma coordenação de isolamento.

### 3.1 ITENS NECESSÁRIOS PARA O PROJETO

Para iniciar o projeto coordenação de isolamento, são necessários alguns dados pré-definidos e dados de projeto. São eles:

- Definir o tipo de isolamento, conforme item 2.4.1;
- Definir o método a ser usado no projeto de coordenação de isolamento, conforme 2.4.2;
- Conhecer o tipo de solicitação de sobretensão, conforme 2.3;
- Calcular o CFO ( $V_{50\%}$ );
- Determinar fator de GAP;
- Calcular a distância mínima.

Esses são os itens necessários para o projeto de coordenação de isolamento. Os subitens que se seguem estão na ordem do projeto da coordenação de isolamento.

### 3.2 ROTEIRO PARA O CÁLCULO DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

#### 3.2.1 DEFINIÇÃO DO TIPO DE ISOLAMENTO

A isolação de uma subestação depende do local em que está situada a subestação, devido ao espaço disponível, do custo e da proposta da mesma.

É importante saber qual o isolamento da subestação para saber o método a ser usado no cálculo da coordenação de isolamento.

### 3.2.2 DEFINIÇÃO DO MÉTODO

Como visto anteriormente, dois são os métodos que podem ser usados para o cálculo da coordenação de isolamento. Este será definido dependendo do isolamento utilizado na subestação.

### 3.2.3 CONHECER A SOLICITAÇÃO DA SOBRETENSÃO

A solicitação de sobretensão pode ser de origem atmosférica ou de manobra. A partir do conhecimento da solicitação é possível definir os níveis de isolamento (BIL e BSL).

### 3.2.4 CÁLCULO DO CFO

Após a definição da solicitação de sobretensão calcula-se o CFO para cada caso, pois existem CFO's para ambos os tipos de solicitação. Feito usando a equação. O cálculo do CFO é feito por meio das equações (1) e (6) (ver p.21 à p.25).

### 3.2.5 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE GAP

Para determinar o fator de GAP, deve-se verificar o intervalo em que o equipamento em estudo se encontra (ver tabela 4).

### 3.2.6 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA

Conhecido o fator de GAP a distância elétrica mínima é obtida utilizando as equações (4), (5), (8), (9), (ver p.22 à 27).

## 4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo mostrará o cálculo da coordenação de isolamento da SE QUIXERÉ 230 kV. Foram utilizados os dados de campo reais, coletados e fornecidos pela empresa responsável pelo projeto eletromecânico da SE QUIXERÉ.

### 4.1 PROJETO DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DA SE QUIXERÉ

Por meio da empresa responsável pelo projeto da SE QUIXERÉ foram obtidos os dados necessários ao cálculo. Dessa forma, têm-se os seguintes valores de BIL e de BSL, os quais respeitam os dados de referência da Tabela 3:

	BIL	BSL
Transformador	850 kV	750Kv
Para-Raios	936 kV	750 kV
Disjuntor	950 kV	750 kV

#### 4.1.1 SURTO DE MANOBRA

Para o cálculo da Coordenação de Isolamento no caso de Surto de Manobra serão usados os valores de BSL fornecidos. É importante saber que a SE QUIXERÉ (230 kV) é isolada a ar. Desse modo, o método utilizado é o estatístico, pois os isolamentos são autorrecuperantes.

##### a) Tensão Suportável FASE-TERRA (BSL)

Será feito o cálculo da distância elétrica mínima fase-terra em isolamentos autorregenerativos quando submetidos às tensões de manobra com 99,97% probabilidade de não apresentar descarga.

Como o BSL é o mesmo para o transformador, o para-raios e o disjuntor e é igual a 750 kV, o cálculo abaixo será feito para todos.

Da equação (1):

$$BSL = V_{50\%} * (1 - k * \sigma)$$

Como a probabilidade de suportar, fornecida pela empresa projetista é de 99,97% o valor da constante  $k$ , de acordo com a tabela 1, é de 3. Para surtos de manobra o valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) é de 6%. Dessa forma:

1º) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$750 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,06)$$

$$750 \text{ kV} = V_{50\%} * (0,82)$$

$$V_{50\%} = \frac{750 \text{ kV}}{0,82}$$

$$V_{50\%} = 914,6 \text{ kV}$$

2º) Cálculo da distância mínima para surto de manobra.

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{V_{50\%}}{500 * Km}}$$

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{914,6}{500 * Km}}$$

Define-se o fator de GAP do projeto analisando as estruturas para cada equipamento (ver Tabela 4). Assim, o fator de GAP ( $Km$ ) utilizado é: 1,3 para todos

uma vez que possuem a forma condutor-estrutura, ou seja, o dielétrico é entre o condutor do circuito energizado e a estrutura que suporta o disjuntor, o transformador e o para-raios.

Para o Transformador, Disjuntor e Para-raios

$$Km = 1,3$$

A distância mínima é dada por:

$$D = \frac{8 * V_{50\%}}{3400Km - V_{50\%}}$$

$$D = \frac{8 * 914,6}{3400 * 1,3 - 914,6}$$

$$D = 2,09 \text{ m}$$

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{V_{50\%}}{500 * Km}}$$

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{914,6}{500 * 1,3}}$$

$$D = 1,77 \text{ m}$$

3º) Definição da distância mínima fase-terra para surto de manobra. A partir das duas equações foram obtidos dois valores de distância mínima. Porém, a mais segura e a utilizada foi a de maior valor. Assim, para o Transformador, Disjuntor e Para-raios, a distância considerada de surto de manobra fase-terra é:

$$D = 2,09 \text{ m}$$

b) Tensão Suportável FASE-FASE (BSL)

Será feito o cálculo da distância elétrica mínima fase-fase em isolamentos autorregenerativos quando submetidos às tensões de manobra com 99,97% probabilidade de não apresentar descarga.

Como o BSL é o mesmo para o transformador, os para-raios e o disjuntor e é igual a 750 kV, o cálculo abaixo será feito para todos. A probabilidade de suportar, fornecida pela empresa projetista, é de 99,97% o valor da constante  $k$ , de acordo com a tabela 1, é de 3. Para surtos de manobra o valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) é de 6%.

Aqui, o valor de BSL dado não será o usado diretamente na equação 1. Para tanto, deve-se multiplicar tal valor por um fator  $P$ , que para esse caso, conforme explicado anteriormente, é de 1,6. Dessa forma,

1°) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$V_{99,97\%} = BSL * P$$

$$V_{99,97\%} = 1200 \text{ kV}$$

$$V_{99,97\%} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,06)$$

$$V_{50\%} = \frac{1200 \text{ kV}}{0,82}$$

$$V_{50\%} = 1463,4 \text{ kV}$$

2°) Cálculo da distância mínima para surto de manobra.

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{V_{50\%}}{500 * Km}}$$

$$D = \frac{8 * V_{50\%}}{3400Km - V_{50\%}}$$

Define-se o fator de GAP do projeto analisando as estruturas para cada equipamento (ver tabela 4). Assim, o fator de GAP ( $Km$ ) utilizado é:

Para o Transformador, Disjuntor e Para-raios

$$Km = 1,3$$

E assim a distância mínima é:

$$D = \frac{8 * V_{50\%}}{3400Km - V_{50\%}}$$

$$D = \frac{8 * 1463,4}{3400 * 1,3 - 1463,4}$$

$$D = 3,96 m$$

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{V_{50\%}}{500 * Km}}$$

$$D = \sqrt[0.6]{\frac{1463,4}{500 * 1,3}}$$

$$D = 3,86 m$$

3º) Definição da distância mínima fase-fase para surto de manobra.

A partir das duas equações foram obtidos dois valores de distância mínima. Porém, a mais segura e a utilizada foi a de maior valor. Assim, para o Transformador, Disjuntor e Para-raios, a distância considerada de surto de manobra fase-fase é:

$$D = 3,96 m$$

c) Distância Elétrica Mínima para Surto de Manobra

Deve-se definir a distância mínima para surto de manobra considerando as distâncias fase-terra e fase-fase. Em que se considera a maior delas, assim a distância elétrica mínima para surto de manobra para todos os equipamentos, uma vez que todos possuem os mesmos dados, é dada por:

$$D_{projeto} = 3,96 m$$

#### 4.1.2 IMPULSO ATMOSFÉRICO

Para o cálculo da Coordenação de Isolamento no caso de Impulso Atmosférico serão usados os valores de BIL fornecidos pela empresa projetista. É importante saber que a SE QUIXERÉ (230 kV) é isolada a ar. Desse modo, o método utilizado é o estatístico, pois os isolamentos são autorrecuperantes.

##### a) Tensão Suportável FASE-TERRA (BIL)

Como o BIL para o transformador é 850 kV, para o para-raios é 936 kV e para o disjuntor é 950kV. Os cálculos serão realizados de maneira isolada.

- Para o Transformador

Da equação (1)

$$BIL = V_{50\%} * (1 - k * \sigma)$$

Como, a probabilidade de suportar é de 99,97% o valor da constante  $k$ , de acordo com a tabela 1, é de 3. Para impulsos atmosféricos o valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) é de 3%. Dessa forma,

1°) Acha-se a tensão de ruptura (CFO).

$$850 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,03)$$

$$850 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 0,09)$$

$$850 \text{ kV} = V_{50\%} * (0,91)$$

$$V_{50\%} = \frac{850 \text{ kV}}{0,91}$$

$$V_{50\%} = 934,06 \text{ kV}$$

2°) Cálculo da distância mínima para impulso atmosférico.

Define-se o fator de GAP do projeto analisando as estruturas para cada equipamento (ver tabela 4). Assim, o fator de GAP ( $Km$ ) utilizado para o transformador é:

$$Km = 1,3$$

Obtido o fator de GAP, analisa-se a figura 6 e obtêm-se a relação  $\frac{V_{50\%}}{D}$ , em que igualando a essa expressão é possível encontrar duas distâncias mínimas, uma para polaridade positiva e outra para polaridade negativa, ambas a seco e úmidas.

Para polaridade positiva

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 570$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{570}$$

$$D(+)= \frac{934,06}{570}$$

$$D(+)= 1,64 \text{ m}$$

Para polaridade negativa

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 620$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{620}$$

$$D(-)= \frac{934,06}{620}$$

$$D(-)= 1,44 \text{ m}$$

Também é possível calcular as distâncias mínimas para impulsos atmosféricos a partir da equação abaixo obtida por uma interpolação.

$$D(+)= \frac{V_{50\%}}{440 + 100 * Km}$$

$$D(-)= \frac{V_{50\%}}{685 - 50 * Km}$$

3°) Definição da distância mínima fase-terra para impulso atmosférico.

A partir das duas equações foram obtidos dois valores de distância mínima. Porém a mais segura e a utilizada foi a de maior valor. Assim, a distância elétrica mínima fase-terra para o transformador é:

$$D = 1,64 \text{ m}$$

- Para o Disjuntor

Da equação (1)

$$BIL = V_{50\%} * (1 - k * \sigma)$$

Como, a probabilidade de suportar é de 99,97% o valor da constante  $k$ , de acordo com a tabela 1, é de 3. Para impulsos atmosféricos o valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) é de 3%. Dessa forma,

1°) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$950 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,03)$$

$$950 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 0,09)$$

$$950 \text{ kV} = V_{50\%} * (0,91)$$

$$V_{50\%} = \frac{950 \text{ kV}}{0,91}$$

$$V_{50\%} = 1043,96 \text{ kV}$$

2°) Cálculo da distância mínima para impulso atmosférico. Define-se o fator de GAP do projeto analisando as estruturas para cada equipamento (ver tabela 4). Assim, o fator de GAP ( $Km$ ) utilizado para o disjuntor é:

$$Km = 1,3$$

Obtido o fator de GAP, analisa-se a figura 6 e obtêm-se a relação  $\frac{V_{50\%}}{D}$ , em que igualando a essa expressão é possível encontrar duas distâncias mínimas, uma para polaridade positiva e outra para polaridade negativa, ambas a seco e úmidas.

Para polaridade positiva:

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 570$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{570}$$

$$D(+)= \frac{1043,96}{570}$$

$$D(+)= 1,83 \text{ m}$$

Para polaridade negativa:

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 620$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{620}$$

$$D(-)= \frac{1043,96}{620}$$

$$D(-)= 1,68 \text{ m}$$

Também é possível calcular as distâncias mínimas para impulsos atmosféricos a partir da equação abaixo obtida por uma interpolação.

$$D(+)= \frac{V_{50\%}}{440 + 100 * Km}$$

$$D(-)= \frac{V_{50\%}}{685 - 50 * Km}$$

3º) Definição da distância mínima fase-terra para impulso atmosférico.

A partir das duas equações foram obtidos dois valores de distância mínima. Porém, a mais segura e a utilizada foi a de maior valor. Assim a distância elétrica mínima fase-terra para o disjuntor é:

$$D = 1,83 \text{ m}$$

- Para o Para-raios

Da equação (1)

$$BIL = V_{50\%} * (1 - k * \sigma)$$

Como, a probabilidade de suportar é de 99,97% o valor da constante  $k$ , de acordo com a tabela 1, é de 3. Para impulsos atmosféricos o valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) é de 3%. Dessa forma,

1º) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$936 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,03)$$

$$936 \text{ kV} = V_{50\%} * (1 - 0,09)$$

$$936 \text{ kV} = V_{50\%} * (0,91)$$

$$V_{50\%} = \frac{936 \text{ kV}}{0,91}$$

$$V_{50\%} = 1028,6 \text{ kV}$$

2º) Cálculo da distância mínima para impulso atmosférico.

Define-se o fator de GAP do projeto analisando as estruturas para cada equipamento (ver tabela 4). Assim, o fator de GAP ( $Km$ ) utilizado para o para-raios é:

$$Km = 1,3$$

Obtido o fator de GAP, analisa-se a Figura 6 e obtêm-se a relação  $\frac{V_{50\%}}{D}$ , em que igualando a essa expressão é possível encontrar duas distâncias mínimas, uma para polaridade positiva e outra para polaridade negativa ambas, a seco e úmidas.

Para polaridade positiva:

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 570$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{570}$$

$$D(+)= \frac{1028,6}{570}$$

$$D(+)= 1,80 \text{ m}$$

Para polaridade negativa:

$$\frac{V_{50\%}}{D} = 620$$

$$D = \frac{V_{50\%}}{620}$$

$$D(-)= \frac{1028,6}{620}$$

$$D(-)= 1,66 \text{ m}$$

Também é possível calcular as distâncias mínimas para impulsos atmosféricos a partir da equação abaixo obtida por uma interpolação.

$$D(+)= \frac{V_{50\%}}{440 + 100 * Km}$$

$$D(-)= \frac{V_{50\%}}{685 - 50 * Km}$$

3º) Definição da distância mínima para impulso atmosférico.

A partir das duas equações foram obtidos dois valores de distância mínima. Porém a mais segura e a utilizada foi a de maior valor. Dessa forma, a distância elétrica mínima fase-terra para o para-raios é:

$$D = 1,80 \text{ m}$$

Assim, as distâncias elétricas mínimas fase-terra para cada equipamento são:

- Transformador:  $D = 1,64 \text{ m}$
- Disjuntor:  $D = 1,83 \text{ m}$
- Para-raios:  $D=1,80 \text{ m}$

b) Tensão Suportável FASE-FASE (BIL)

Será feito o cálculo da distância elétrica mínima fase-fase em isolamentos autorregenerativos quando submetidos às tensões de manobra com 99,97% probabilidade de não apresentar descarga.

Como o BIL para o transformador é 850 kV, para o para-raios é 936 kV e para o disjuntor é 950kV. O cálculo será realizado de maneira isolada.

Como a probabilidade de suportar, fornecida pela empresa projetista é de 99,97% o valor da constante  $k$ , de acordo com a tabela 1, é de 3.

Para impulsos atmosféricos o valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) é de 3%.

Aqui, o valor de BIL dado não será o usado diretamente na equação 1, para tanto deve-se multiplicar tal valor por uma margem de segurança, que a utilizada no projeto, é de 20%. Dessa forma,

- Para o Transformador

1°) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$V_{99,97\%} = BIL * 1,2$$

$$V_{99,97\%} = 1020 \text{ kV}$$

$$V_{99,97\%} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,03)$$

$$V_{50\%} = \frac{1020 \text{ kV}}{0,91}$$

$$V_{50\%} = 1120,9 \text{ kV}$$

2°) Cálculo da distância mínima para impulso atmosférico.

$$V_{50\%} = 550 * D$$

$$D = \frac{1120,9 \text{ kV}}{550}$$

$$D = 2,038 \text{ m}$$

- Para o Disjuntor

1°) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$V_{99,97\%} = BIL * 1,2$$

$$V_{99,97\%} = 1140 \text{ kV}$$

$$V_{99,97\%} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,03)$$

$$V_{50\%} = \frac{1140 \text{ kV}}{0,91}$$

$$V_{50\%} = 1252,75 \text{ kV}$$

2°) Cálculo da distância mínima para impulso atmosférico.

$$V_{50\%} = 550 * D$$

$$D = \frac{1252,75 \text{ kV}}{550}$$

$$D = 2,3 \text{ m}$$

- Para o Para-raios

1°) Acha-se a tensão de disrupção (CFO).

$$V_{99,97\%} = BIL * 1,2$$

$$V_{99,97\%} = 1123,2 \text{ kV}$$

$$V_{99,97\%} = V_{50\%} * (1 - 3 * 0,03)$$

$$V_{50\%} = \frac{1123,2 \text{ kV}}{0,91}$$

$$V_{50\%} = 1234,3 \text{ kV}$$

2º) Cálculo da distância mínima para impulso atmosférico.

$$V_{50\%} = 550 * D$$

$$D = \frac{1234,3 \text{ kV}}{550}$$

$$D = 2,24 \text{ m}$$

3º) Definição da distância mínima fase-fase para surto de manobra.

A partir das duas equações foram obtidos dois valores de distância mínima. Porém a mais segura e a utilizada foi a de maior valor. Assim, as distâncias elétricas mínimas fase-fase para impulso atmosférico de cada equipamento são:

- Transformador:  $D = 2,038 \text{ m}$
- Disjuntor:  $D = 2,3 \text{ m}$
- Para-raios:  $D = 2,24 \text{ m}$

c) Distância Elétrica Mínima para Impulso atmosférico

Comparando-se nas duas distâncias mínimas obtidas para cada equipamento, fase- fase e fase-terra, foi utilizada a de maior valor para cada equipamento assim:

- Transformador

FASE-TERRA	FASE-FASE
$D = 1,64 \text{ m}$	$D = 2,038 \text{ m}$

Usa-se o maior dos valores e assim:

$$D_{transformador} = 2,038 \text{ m}$$

- Disjuntor

FASE-TERRA	FASE-FASE
D = 1,83 m	D = 2,3 m

Usa-se o maior dos valores e assim :

$$D_{disjuntor} = 2,3 \text{ m}$$

- Para-raios

FASE-TERRA	FASE-FASE
D = 1,80 m	D = 2,24 m

Usa-se o maior dos valores e assim:

$$D_{para-raios} = 2,24 \text{ m}$$

De forma resumida, pode-se observar na tabela 2 as distâncias mínimas para Surtos de Manobra e para Impulso Atmosférico usados no projeto da SE QUIXERÉ.

*Tabela 2*  
*Distâncias Mínimas usadas na SE QUIXERÉ para os três equipamentos estudados. Fonte:ABA Engenharia 2012*

	SURTO DE MANOBRA	IMPULSO ATMODFÉRICO
Transformador	D = 3,96 m	D = 2,038m
Disjuntor	D = 3,96 m	D = 2,3 m
Para-Raios	D = 3,96 m	D = 2,24 m

Agora se considera a maior distância de todas calculadas de forma a garantir a segurança. Assim,

$$D_{projeto} = 3,96 \text{ m}$$

É importante ressaltar que as distâncias calculadas no estudo de caso não são compatíveis com as distâncias que se encontram no projeto em si. Pois no projeto, figura 7, é acrescentando a distância de segurança.

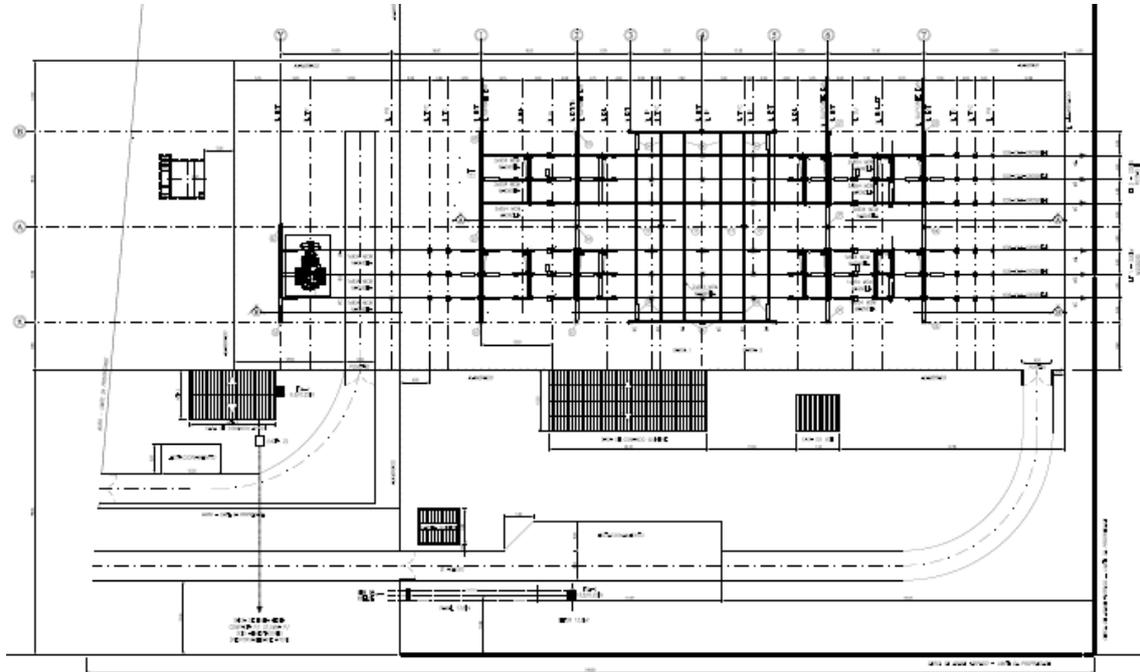


Figura 7. Arranjo Físico – Planta – SE Quixeré

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou como proceder em um projeto de coordenação de isolamento a partir do estudo de caso da SE QUIXERÉ, visando-se proteger os equipamentos de uma subestação de prováveis surtos.

No tutorial, mostrou-se, passo a passo, como se calcular a coordenação de isolamento. Escrito de forma clara, o roteiro permite que dentro dos procedimentos de segurança exigido por norma e de posse dos dados, um projetista calcule as distâncias elétricas mínimas sem maiores problemas. O estudo de caso da SE QUIXERÉ deixou o procedimento ainda mais claro, pois mostra um caso real, utilizando valores reais de campo e de sistema.

Assim deve-se saber sobre o afastamento mínimo necessário para que uma pessoa trabalhe em segurança na subestação. A distância de segurança é o espaço desenergizado nas instalações que permite a execução, em seu interior, de quaisquer trabalhos sem riscos decorrentes de aproximação e contatos indevidos a pontos energizados. Dessa forma, deve-se considerar um espaço suficiente para que a pessoa manipule ferramentas e faça os movimentos necessários para a manutenção, respeitando a coordenação de isolamento. Portanto, sugere-se aqui que em um trabalho futuro se possa realizar uma análise para o cálculo dessa distância de segurança considerada uma ferramenta importante para o auxílio na coordenação de isolamento.

## BIBLIOGRAFIA

COLEON, Richard. Natureza das Sobretensões, classificação dos isolamentos,efeitos das sobretensões sobre os isolamentos e princípios básicos de coordenação do isolamento,2011. Disponível em:<http://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-1.pdf>. Acesso em 21 de Maio de 2013.

COTRIM, Ademaro.Instalações Elétricas . 4ª edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2003.  
JÚNIOR,Luiz.Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Potência.Editora da Universidade São Paulo, 2003.

GALLET G., AUTZER B., RIU J.P, Analysis of the Switching Impulse Strenght of Phase to Phase Air Gaps – IEEE,1978.

LEITE, Reinaldo. Apostila de Equipamentos elétricos. Disponível em:  
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFQBkAF/apostila-equipamentos-eletricos?part=5>. Acesso em: 21 de Maio de 2013.

MARCELO, Varejão. Apostila de Subestação. Escola Politécnica de Pernambuco,2010.

MIGUEL, PABLO MOURENTE. Considerações sobre coordenação de isolamento em geradores. Apostila de curso, Rio de Janeiro,Julho de 2005.

MOREIRA, André.A coordenação de isolamento nas linhas aéreas de distribuição e a melhoria na qualidade de serviço. Dissertação,Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em:  
<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58092/1/000144536.pdf>. Acesso em: 21 de Maio de 2013.

NBR 6939:2000 Coordenação de Isolamento – Procedimento, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2000.

NBR 8186:1983 Guia de Aplicação de Coordenação de Isolamento-Procedimento, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas,Rio de Janeiro 1983.

ROSÁRIO, Miguel. Coordenação de Isolamentos em Linhas Aéreas. Dissertação, 2011. Disponível em:  
<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/935909/1/Dissertacao%20linhas%20aereas%20-%20final.pdf>. Acesso em 24 de Maio de 2013.

SOBRETENSÃO. Disponível em: <http://www.futureng.pt/sobretensao>. Acesso em: 21 DE Maio de 2013.

## ANEXO A – TABELAS

TABELA 3.1

Valores de BSL e BIL normalizados para isolamentos com  $1 < V_m \leq 245 \text{ kV}$ . Fonte: NBR 6939:2000.

Tensão máxima do equipamento $U_m$ [kV <sub>eficaz</sub> ]	Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [kV <sub>eficaz</sub> ]	Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV <sub>crista</sub> ]
0,6* (nota 1)	4*	-
1,2*)	10	30*)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
15*)	34*)	95 110*)
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170 200*)
52	95	250
72,5	140	325 350*)
92,4*)	150*)	380*)
	185	450
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

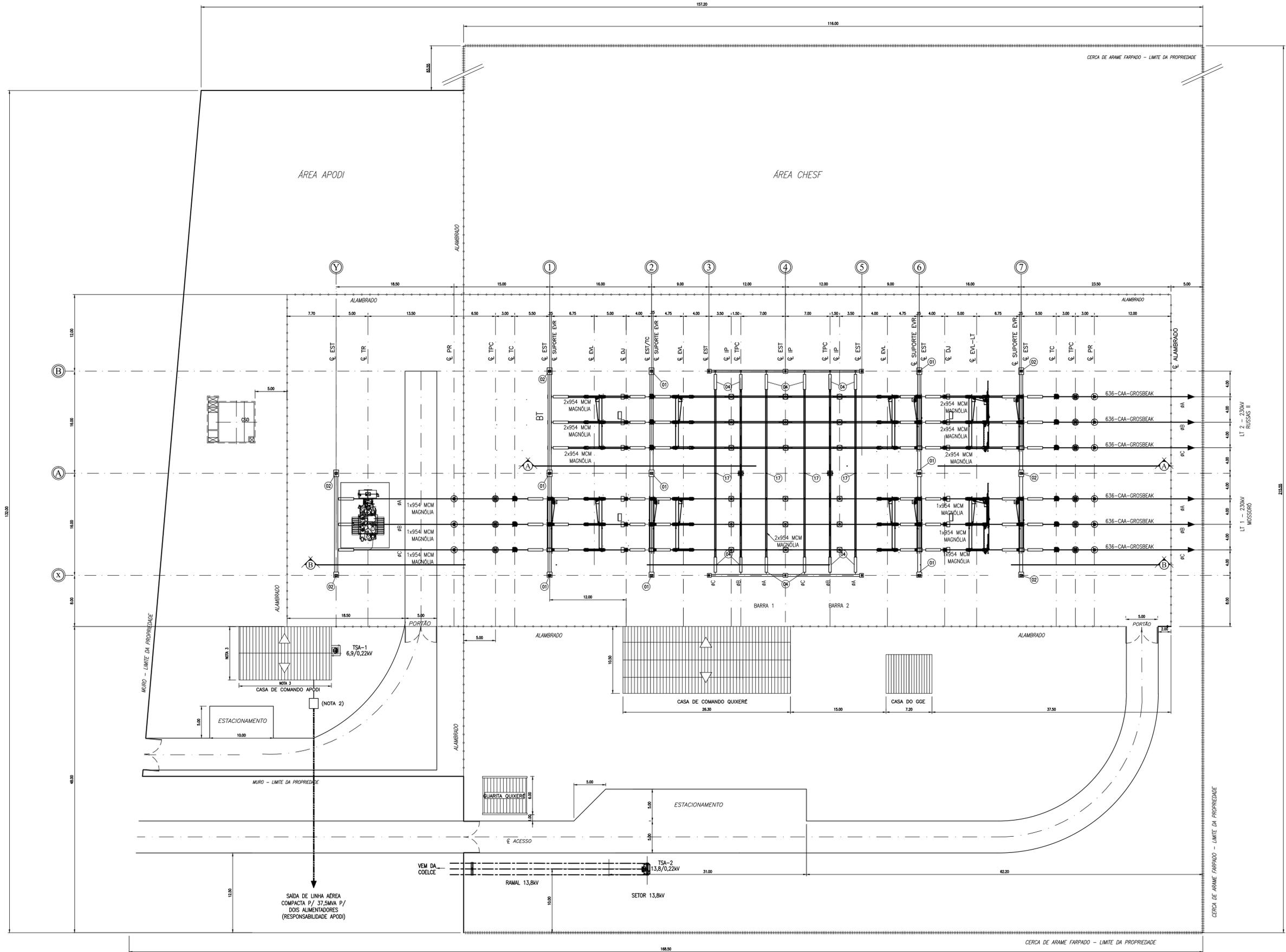
TABELA 3.2

Valores de BSL e BIL normalizados para isolamentos com  $V_m > 245$  kV. Fonte: NBR 6939:2000.

Tensão máxima do equipamento $U_m$ [kV <sub>eficaz</sub> ]	Tensão suportável normalizada de impulso de manobra			Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV <sub>crista</sub> ]
	Isolação longitudinal (nota 1) [kV <sub>crista</sub> ]	Fase-terra [kV <sub>crista</sub> ]	Fase-fase (relação para o valor de crista fase-terra)	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1 050
362	850	850	1,50	950 1 050
	850	950	1,50	1 050 1 175
420	850	850	1,60	1 050 1 175
	950	950	1,50	1 175 1 300
420/460*)	950	1 050	1,50	1 300 1 425
525	950	950	1,70	1 175 1 300
525/550*)	950	1 050	1,60	1 300 1 425
	950	1 175	1,50	1 425 1 550
550*)	950	1 300	1,50	1 550 1 675
765	1 175	1 300	1,70	1 675 1 800
765/800*)	1 175	1 425	1,70	1 800 1 950
	1 175	1 550	1,60	1 950 2 100

*TABELA 4*  
*Fatores de Intervalo (GAP). Fonte: VAREJÃO, 2010, p. 14.*

Configuração dos eletrodos	K
haste – plano	1,00
Haste – estrutura	1,05
condutor – plano	1,15
condutor – janela	1,20
condutor - estrutura (condutor acima)	1,30
haste - haste (h=3m)	1,30
Condutor - estrutura (cond. ao lado ou embaixo)	1,35
haste - haste (h=6m)	1,40
condutor - condutor (perpendicular)	1,40
condutor – haste (h=3m, embaixo)	1,65
condutor – haste (h=6m, embaixo)	1,90
condutor - haste (haste acima)	1,90



LEGENDA:  
 — MURO  
 - - - ALAMBRADO  
 + + + + + CERCA DE ARAME FARRAPADO  
 — LINHA AÉREA PARA ALIMENTAR A FÁBRICA

NOTAS:  
 1. DIMENSÕES EM METRO, COTAS SUBLINHADAS ESTÃO FORA DE ESCALA.  
 2. PONTO ONDE HÁVER UMA TRANSIÇÃO DE CIRCUITO SUBTERRÂNEO PARA CIRCUITO AÉREO.  
 3. DIMENSÕES E LOCAÇÃO DA CASA DE COMANDO APODI DEVEM SER CHECKADAS NO DESENHO DE LOCAÇÃO DE BASES E EDIFICAÇÕES, Nº 18.078/018.

DESENHOS DE REFERÊNCIA:  
 -18.078/061 - PROJETO EXECUTIVO - DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO.

REV.	DESCRIÇÃO	DATA	PROJ.	VERIF.	APROV.
4	INCLUSÃO DA ÁREA EXIGIDA PELO ONS E REVISÃO CONFORME COMENTÁRIOS MULTITEMPREDIMENTOS, CARTA MPE-DE-379-13.	07.06.13	FGA	NIA	ACL
3	REVISÃO AS DISTÂNCIAS ENTRE OS CHAVES SECCIONADORAS E E OS PORTÕES DE ENTRADA, DIVISÃO DA SE ENTRE APODI E CHESF.	22.01.13	FGA	NIA	ACL
2	DELOCAMENTO DO MURO EM FUNÇÃO DA PLANTA DE SITUAÇÃO, E INCLUSÃO DA LISTA DE MATERIAL DE BARRAMENTO.	19.07.12	FGA	NIA	ACL
1	ATENDE COMENTÁRIOS SIEMENS	25.05.12	FGA	RFS	ACL
0	EMISSÃO INICIAL	23.05.12	FGA	RFS	ACL

 ENGENHARIA LTDA		 VERIFICADO: DES.:		 Companhia Hidro Elétrica do São Francisco	
PROJETO:	VERIFICADO:	DES.:	PROJETO:	VERIFICADO:	DES.:
FGA	RFS	FGA	-	-	-
DATA:	REF. ABA:	18.078-063	DATA:	REF. SIEMENS:	750P-00477.P
23/05/12	-		-	-	
APPROVADO:	ANTONIO CAETANO C. LIMA CREA-23.067-6/RJ		APPROVADO:	REGIS AREDES CREA-96022275-2	

		Companhia Hidro Elétrica do São Francisco	
SE QUIXERÉ 230/6,9 kV PROJETO EXECUTIVO			
ARRANJO FÍSICO - SETOR 230 kV PLANTA			
DES. Nº:	18.078-063	ESCALA:	1/300
FOLHA:	01/01	REV.:	4