

I Natureza das sobretensões, classificação dos isolamentos, efeitos das sobretensões sobre os isolamentos e princípios básicos de coordenação do isolamento.

I.1 Natureza das sobretensões

Os sistemas elétricos estão submetidos esporadicamente a várias formas de fenômenos transitórios, envolvendo variações súbitas de tensão e corrente provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores e chaves seccionadoras.

Os estudos das sobretensões nos sistemas elétricos tem adquirido uma maior importância nos últimos anos, a medida que se tem elevado os níveis de tensão dos sistemas e devido a necessidade de sistemas cada vez mais confiáveis e econômicos.

Uma sobretensão pode ser definida como qualquer tensão entre fase e terra, ou entre fases, cujo valor de crista excede o valor de crista deduzido da tensão máxima do equipamento ($U_m \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$ ou $U_m \cdot \sqrt{2}$, respectivamente).

Entende-se por tensão máxima de um sistema, 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 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.

De uma maneira acadêmica, as sobretensões podem ser classificadas em dois grupos:

- **Sobretensões de origem externa**, provenientes de causas externas ao sistema considerado, como por exemplo as descargas atmosféricas que agem diretamente sobre os sistemas elétricos ou nas suas proximidades.
- **Sobretensões de origem interna**, causadas por eventos dentro do sistema em consideração, tais como curto-circuitos ou manobras de equipamentos. Os níveis das sobretensões de origem interna podem ser determinados a partir de avaliações durante a fase projeto, que consistem em: estudar as condições de ocorrência de curto-circuito no sistema e determinar as possíveis sobretensões causadas pelas operações de manobra.

Essa classificação não atende, no entanto, aos interesses relacionados a especificação dos equipamentos, sendo mais adequada a seguinte classificação para as sobretensões, definida pela norma NBR 6939/99 /1/ de acordo com a forma da sobretensão, sua duração e seu efeito sobre a isolação ou sobre o dispositivo de proteção:

- **Sobretensão temporária** – caracterizada por uma sobretensão de frequência fundamental de duração relativamente longa.

Podem originar-se de faltas, operações de chaveamento (como por exemplo rejeição de carga), condições de ressonância, não linearidades (ferro-ressonâncias) ou por uma combinação dessas.

- **Sobretensão transitória** – caracterizada por uma sobretensão de curta duração, de alguns milisegundos ou menos, oscilatória ou não oscilatória, usualmente fortemente amortecida.

De acordo com a NBR 6939/99, as sobretensões transitórias apresentam a seguinte classificação:

- **Sobretensões de frente lenta:** sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $20 \mu s < T_1 \leq 5000 \mu s$, e tempo até o meio valor (na cauda) $T_2 \leq 20 \text{ ms}$. Podem originar-se de faltas, operações de chaveamento ou descargas atmosféricas diretas nos condutores de linhas aéreas.
- **Sobretensões de frente rápida:** sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $0,1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$, e tempo até o meio valor (na cauda) $T_2 \leq 300 \mu s$. Podem originar-se de operações de chaveamento, descargas atmosféricas ou faltas
- **Sobretensões de frente muito rápida:** sobretensão transitória, usualmente unidirecional, com tempo até a crista tal que $T_1 \leq 0,1 \mu s$, duração total $T_t \leq 3 \text{ ms}$, e com oscilações superimpostas de frequências $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$. Podem originar-se de faltas ou operações de chaveamento em subestações isoladas a gás (GIS);
- **Sobretensão combinada (temporária, frente lenta, frente rápida e frente muito rápida)** - consiste de duas componentes de tensão simultaneamente aplicadas entre cada um dos terminais de fase de uma isolação fase-fase (ou longitudinal) e a terra. É classificada pela componente de maior valor de crista.

Podem ter qualquer uma das origens mencionadas acima. Ocorrem entre as fases de um sistema (fase-fase) ou na mesma fase entre partes separadas de um sistema (longitudinal).

I.1.1 Sobretensões temporárias:

As sobretensões temporárias são caracterizadas por suas amplitudes, forma de onda e duração. Todos esses parâmetros dependem da origem das sobretensões e as amplitudes e forma de onda podem inclusive variar durante o seu período de ocorrência.

As sobretensões temporárias são de natureza oscilatória, de baixa amplitude (em geral inferior a 1,5 pu), duração relativamente longa (tempo de duração superior a dezenas de milissegundos) e fracamente amortecida ou não amortecida. Essas sobretensões também chamadas de sobretensões sustentadas permanecem no sistema até que o sistema seja modificado ou que a causa que lhe deu origem seja eliminada.

Apesar das suas amplitudes serem inferiores às demais sobretensões, as sobretensões temporárias podem ser determinantes no projeto dos isolamentos internos e externos e na especificação dos equipamentos, que terão de suportar a essas sobretensões por um longo tempo. No caso dos pára-raios, por exemplo, as sobretensões temporárias têm importância fundamental na definição da tensão nominal do pára-raios, tomando-se como base a necessidade dos pára-raios serem capazes de absorver a energia associada a essas sobretensões.

Para fins de coordenação do isolamento, a sobretensão temporária representativa é considerada como tendo a forma da tensão normalizada de frequência fundamental de curta duração (1 minuto). Sua amplitude pode ser definida por um valor máximo assumido, um conjunto de valores de crista ou uma distribuição estatística completa de valores de crista. A amplitude selecionada da sobretensão temporária representativa deve levar em conta:

- a amplitude e duração da sobretensão real em serviço;
- a característica amplitude / duração da suportabilidade a frequência fundamental da isolação considerada

Se esta última característica não for conhecida, a amplitude selecionada pode ser definida como sendo igual à máxima sobretensão real em serviço, que tenha uma duração real de menos que um minuto, e a duração pode ser considerada como de um minuto.

As sobretensões temporárias são geralmente causadas por:

- Faltas nos sistemas
- Perda súbita de carga (rejeição de carga);
- Efeito ferranti;
- Ressonância e ferro-ressonância;
- Sobretensões longitudinais durante sincronização

Em sistemas com tensões máximas de operação até 242 kV, geralmente as faltas que ocorrem nos sistemas são as responsáveis pelas máximas amplitudes das sobretensões temporárias.

O tipo de falta mais comum que aparece em um sistema é o curto-circuito monofásico. A ocorrência de uma falta fase-terra em um dado ponto do sistema, acarreta na elevação de tensão nas fases sãs, sendo a amplitude diretamente relacionada com o tipo de aterramento do neutro do sistema no ponto em consideração. A duração da sobretensão corresponde a duração da falta.

As amplitudes das sobretensões temporárias devido a faltas que ocorrem nos sistemas podem ser determinadas, de forma simplificada, pela equação a seguir:

$$TOV_{SIST.} = K \cdot U_{max}$$

$TOV_{SIST.}$	Amplitude da sobretensão no ponto considerado;
K	Fator de sobretensão (fator de aterramento), dependente do tipo de aterramento do neutro do sistema;
U_{max}	Amplitude da máxima tensão fase-terra de operação do sistema antes da ocorrência da falta = $U_m / \sqrt{3}$

O fator de aterramento consiste na relação entre o máximo valor eficaz de tensão fase-terra de frequência fundamental em uma fase sã, durante uma falta fase-terra afetando uma ou mais fases em qualquer ponto do sistema, e o valor eficaz de tensão fase-terra de frequência fundamental que seria obtido no mesmo local na ausência de tal falta, ou seja, em condições de regime permanente.

Desprezando o efeito da resistência de falta, o fator de aterramento para uma falta fase-terra pode ser definido por:

$$K = 0,5 \cdot \left(\frac{3 \cdot Z_0 / Z_1}{2 + Z_0 / Z_1} \pm j \cdot \sqrt{3} \right)$$

Z_0	Impedância de seqüência zero do sistema	$\rightarrow Z_0 = R_0 + jX_0$
Z_1	Impedância de seqüência positiva do sistema	$\rightarrow Z_1 = R_1 + jX_1$

Para sistemas com neutro efetivamente aterrado ($0 \leq X_0 / X_1 \leq 3$ e $0 \leq R_0 / X_1 \leq 1$) o fator de aterramento é inferior a 1,4, ou seja, as sobretensões temporárias atingem no máximo 80% da tensão fase-fase do sistema. A tensão nas fases sãs será:

$$TOV_{SIST.} \leq 1,4 \cdot U_{max.}$$

A duração das sobretensões devido a uma falta fase-terra para um sistema efetivamente aterrado é normalmente inferior a 0,2 segundos para proteção de linha e 1 segundo no caso de proteção de “Back-up”.

Para sistemas com neutro isolado as sobretensões nas fases sãs podem exceder à tensão fase-fase do sistema, ou seja, o fator de aterramento é de 1,73 ou acima. Isto se deve ao fato de que esse tipo de sistema é acoplado à terra através de suas capacitâncias parasitas. A tensão nas fases sãs será:

$$TOV_{SIST.} \approx 1,73 \cdot U_{max.}, \text{ ou acima}$$

A duração da falta pode ser de poucos segundos a algumas horas, em função da corrente de falta bem como do dispositivo de detecção / abertura da falta.

A Tabela I.1 apresenta os valores típicos normalmente utilizados para o fator de aterramento em função do tipo de aterramento do neutro do sistema.

Tabela I.1 - Fatores de aterramento – Valores típicos

Tipo de Sistema	Caracterização	Fator de aterramento K
A	Multi aterrado	$\leq 1,30$
B	Eficazmente aterrado	$\leq 1,40$
C	Não eficazmente aterrado	1,73
D	Isolado	$\geq 1,73$ (1,90)

Maiores informações referentes às sobretensões temporárias, tais como suas causas e características principais, podem ser encontradas em literaturas específicas /2/ e /3/.

I.1.2 Sobretensões de frente lenta

As sobretensões de frente lenta se caracterizam como sobretensões entre fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido a operação de um equipamento de manobra, uma falta ou a outra causa qualquer, cuja forma de onda apresente tempos até a crista com durações entre algumas dezenas e alguns milhares de microsegundos e tempos até o meio valor (tempos de cauda) com durações da mesma ordem de magnitude. Essas sobretensões em geral são fortemente amortecidas.

Para fins de coordenação do isolamento, a forma de onda da tensão representativa é o impulso de manobra normalizado utilizado nos ensaios, apresentando tempo até a crista de 250 μ s, e tempo até o meio valor de 2500 μ s.

As sobretensões de frente lenta normalmente se originam de:

- Energização e religamento de linhas;
- Aplicação e eliminação de faltas;
- Rejeição de carga;
- Energização de transformadores;
- Chaveamento de correntes capacitivas e indutivas;
- Descargas atmosféricas distantes do ponto considerado nos condutores fase de linhas aéreas.

Em muitos dos casos, a amplitude e duração dessas sobretensões dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das condições em que o sistema se encontra no instante da manobra. Assim, para uma determinada condição de manobra pode-se obter diferentes valores de sobretensões, uma vez que esse valor dependerá não somente da dispersão nos instantes de fechamento do disjuntor, como também do instante da onda de tensão onde ocorreu o fechamento.

Esta variação significativa na amplitude das sobretensões faz com que seja extremamente difícil prever o valor máximo de sobretensão que irá ocorrer para uma manobra específica. Daí advém o conceito de sobretensão de manobra estatística, definida como uma sobretensão de manobra, aplicada a um dado equipamento, devido a uma perturbação específica no sistema, cujo valor de crista tem uma probabilidade estatística de 2% de ser excedido.

$$U_{2\%} = U_{50} \cdot (1 + 2,05 \cdot \sigma)$$

No caso de descargas atmosféricas incidindo nos condutores fase de linhas aéreas, sobretensões de frente lenta ocorrem quando a corrente de descarga que incide sobre o condutor é suficientemente baixa para não provocar a ruptura da isolação da linha e quando a descarga ocorre a uma distância suficientemente longa do ponto considerado, de modo a produzir uma sobretensão de menor amplitude e de frente lenta, devido aos efeitos de atenuação e distorção na onda de tensão.

Maiores informações referentes as sobretensões de frente lenta, suas causas e características principais, podem ser obtidas nas referências /2/ e /3/.

I.1.3 Sobretensões de frente rápida:

As sobretensões de frente rápida se caracterizam como sobretensões entre fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido a uma descarga atmosférica ou a outra causa qualquer, cuja forma de onda apresente tempos até a crista com durações entre 0,1 μ s a 20 μ s e tempos até o meio valor (tempos de cauda) até 300 μ s. Essas sobretensões em geral são fortemente amortecidas.

Para fins de coordenação do isolamento, a forma de onda da tensão representativa é o impulso atmosférico normalizado utilizado nos ensaios, apresentando tempo até a crista de 1,2 μ s, e tempo até o meio valor de 50 μ s. A amplitude representativa é dada ou como um valor máximo assumido ou por uma distribuição de probabilidade de valores de crista em função da taxa de retorno das sobretensões.

As sobretensões de frente rápida normalmente se originam de:

- Sobretensões devido às descargas atmosféricas incidindo diretamente nos condutores fase de linhas aéreas, nos cabos pára-raios ou nas estruturas de linhas de transmissão ou por descargas a terra ou em estruturas próximas à linha considerada (sobretensões induzidas);
- Sobretensões devido às descargas atmosféricas afetando as subestações;
- Operações de manobra e faltas.

O efeito das sobretensões devido às descargas atmosféricas nas subestações e suas taxas de ocorrência dependem basicamente de:

- do desempenho das linhas aéreas conectadas a subestação frente às descargas atmosféricas;
- do arranjo físico da subestação, seu tamanho e, em particular, do número de linhas conectadas a ela;
- do valor instantâneo da tensão de operação (no momento da descarga).

A severidade das sobretensões atmosféricas no equipamento da subestação é determinada pela combinação desses três fatores e diversas etapas são necessárias para assegurar uma adequada proteção /2/.

Sobretensões de manobra de frente rápida ocorrem quando o equipamento é conectado ou desconectado do sistema através de conexões curtas, principalmente em subestações. Sobretensões de frente rápida podem também ocorrer quando da ocorrência de uma disrupção na isolação externa de um equipamento. Tais eventos podem causar solicitações particularmente severas sobre isolações internas próximas (por exemplo sobre enrolamentos) /2/.

Como a ocorrência simultânea de sobretensão de manobra de frente rápida em mais de uma fase é altamente improvável, pode-se assumir a não existência de sobretensões entre fases com amplitudes maiores do que as sobretensões entre fase e terra.

Maiores informações referentes as sobretensões de frente rápida, suas causas e características principais, podem ser obtidas na referência /2/.

I.1.4 Sobretensões de frente muito rápida:

Sobretensões de frente muito rápida são decorrentes da operação de seccionadores ou de faltas dentro de uma subestação isolada a SF₆ (GIS), devido à disrupção rápida da isolação gasosa e à propagação praticamente não amortecida do surto dentro da GIS. Suas amplitudes são rapidamente amortecidas ao sair da GIS, por exemplo nas buchas, e seus tempos de frente são geralmente aumentados, atingindo a faixa dos tempos representativos de sobretensões de frente rápida. Sobretensões de frente muito rápida podem também ocorrer em transformadores secos de média tensão com conexões curtas aos equipamentos de manobra.

A forma da sobretensão é caracterizada por um rápido aumento da tensão até um valor próximo a seu valor de crista, resultando num tempo de frente geralmente inferior a 0,1 μ s. Para operações de seccionadores esta frente é tipicamente seguida por uma oscilação com frequências acima de 1 MHz. A duração dessas sobretensões é inferior a 3 ms, podendo ocorrer várias vezes. A amplitude da sobretensão depende do projeto construtivo do seccionador e da configuração da subestação.

Nos terminais de equipamentos conectados a uma GIS através de uma linha aérea de transmissão de alta tensão curta, as oscilações das sobretensões apresentam frequências na faixa de 0,2 MHz a 2,0 MHz e amplitudes de até 1,5 vezes a tensão de descarga. Por outro lado, o conteúdo de frequências das sobretensões pode ainda causar grandes solicitações internas em enrolamentos de transformadores por causa de ressonâncias em parte dos enrolamentos.

A representação desse tipo de sobretensão em laboratório ainda não pode ser estabelecida, uma vez que padronizações adequadas não estão disponíveis até o presente momento.

Detalhes sobre as classes e formas das solicitações de tensão, definidas pela NBR 6939/99 são apresentados na Figura I.1 /1/.

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Continua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Figura I.1 – Representação das classes e formas das solicitações de tensão

I.2 Classificação da isolamento e efeito das sobretensões sobre os isolamentos

Os isolamentos abrangem os espaçamentos de ar, os isolamentos sólidos e os imersos em líquido isolante e os gases, podendo ser classificados como sendo para uso externo ou interno.

É sabido que diversos fatores influenciam a rigidez dielétrica da isolamento, entre os quais podem ser citados /2/:

- a amplitude, forma do impulso e a polaridade da tensão aplicada;
- a distribuição do campo elétrico na isolamento: campo elétrico uniforme ou não uniforme, eletrodos adjacentes ao espaçamento considerado e seu potencial;

- o tipo de isolante utilizado, se gasoso, líquido, sólido ou compósito;
- o conteúdo de impurezas e a presença de não-homogeneidades localizadas;
- o estado físico da isolação: temperatura, pressão e outras condições ambientais, solicitações mecânicas, etc;
- a deformação da isolação sob solicitação, os efeitos químicos, os efeitos de superfície dos condutores, etc.

Para o estudo de sobretensões, há a necessidade de se diferenciar o comportamento dos materiais isolantes, pois o efeito das sobretensões sobre os isolamentos dos sistemas elétricos / equipamentos depende basicamente das características de suportabilidade e de regeneração da isolação. A importância desta classificação pode ser observada quando se consideram os critérios probabilísticos de projeto e os critérios de ensaio.

A falha de isolamento em um transformador, por exemplo, resulta na queima do transformador e na necessidade de sua retirada do sistema. Já em uma linha de transmissão, a ruptura do isolamento externo de uma cadeia de isoladores acarreta no desligamento transitório ou permanente do sistema, sem no entanto provocar danos permanentes à cadeia.

Desta forma, há a necessidade de se 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 6939/99, como isolação auto-recuperante ou isolação não auto-recuperante.

As isolações auto-recuperantes são aquelas que recuperam integralmente as suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga disruptiva provocada pela aplicação de uma tensão de ensaio. Os isolamentos externos em ar, alguns isolamentos internos em gás e alguns isolamentos líquidos apresentam propriedades auto-recuperantes.

Em um sistema elétrico, esse tipo de isolação pode ser encontrado nas superfícies externas de cadeias de isoladores; parte externa das buchas e transformadores, bem como nos isolamentos em ar, correspondentes aos espaçamentos entre condutores, condutor-estrutura e barramento-estrutura.

A descarga disruptiva num espaçamento em ar é fortemente dependente da configuração do espaçamento, da polaridade e da forma da onda da tensão aplicada. Além disso, as condições atmosféricas relativas afetam a rigidez dielétrica, independentemente da forma e da polaridade da solicitação de tensão aplicada. As características da rigidez dielétrica do ar, provenientes de medições em laboratório, são referidas às condições atmosféricas normalizadas de referência, definidas na NBR 6936:

- temperatura: 20°C;
- pressão: 101,3 kPa (1013 mbar);
- umidade absoluta: 11 g/m³.

As isolações não auto-recuperantes são aquelas que perdem parcialmente ou não recuperam integralmente as suas propriedades isolantes após a ocorrência de uma descarga disruptiva provocada pela aplicação de uma tensão de ensaio, 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 auto-recuperante 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. Sua finalidade é prover a separação entre diferentes elementos condutores sem que haja falhas quando submetidas a condições operativas.

Equipamentos importantes, tais como transformadores de distribuição e de força, parte interna de transformadores de corrente e de potencial, entre outros, apresentam esse tipo de isolamento.

É importante ressaltar que as definições acima aplicam-se somente quando a descarga disruptiva é causada pela aplicação de uma tensão de ensaio durante um ensaio dielétrico. Descargas disruptivas que ocorrem nos sistemas podem fazer com que uma isolação auto-recuperante perca parcialmente, ou completamente, as suas propriedades isolantes originais.

O comportamento de suportabilidade de uma isolação frente às sobretensões apresenta, em geral, uma natureza aleatória. Uma isolação submetida a uma solicitação dielétrica devido a uma sobretensão, poderá apresentar descarga. Portanto, é possível associar o comportamento do material isolante à probabilidade de falha da isolação.

Se considerarmos sobretensões de mesma forma de onda porém com diferentes amplitudes, é possível associar para cada amplitude V_i uma probabilidade de falha da isolação $P(U_i)$, estabelecendo-se uma relação $P(U)$ definida como função probabilidade de descarga da isolação considerada, conforme Figura I.2.

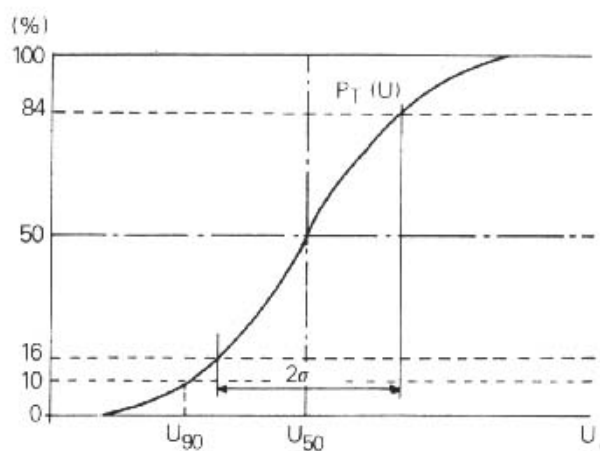


Figura I.2 – Curva de probabilidade de descarga da isolação

A probabilidade de falha para isolações auto-recuperantes pode ser facilmente determinada através da realização de ensaios elétricos, os quais têm por finalidade a obtenção da tensão com 50% de probabilidade de descarga (tensão crítica de descarga da isolação).

Dois métodos de ensaios têm sido usualmente utilizados:

- **Método dos níveis múltiplos:**

Este método consiste em aplicar sobre o isolamento uma quantidade N (pelo menos dez) de impulsos em cada um dos níveis de tensão de ensaio, mantendo-se a forma de onda definida. A variação da amplitude entre os níveis de tensão ΔU deve ser aproximadamente igual ao desvio padrão σ .

Para cada amplitude de tensão deve-se aplicar N solicitações. A probabilidade de falha do isolamento, para cada solicitação, poderá ser definida pela relação n/N , onde n corresponde ao número de falhas verificadas no isolamento para uma dada solicitação. Quanto maior o número de aplicações N, mais exatos serão os resultados obtidos. A partir dos resultados obtidos é traçada em um papel adequado, uma reta que melhor represente esses pontos, determinando-se dessa forma, o valor com 50% de probabilidade de falha da isolação.

- **Método dos acréscimos e decréscimos (Up and Down)**

O método dos acréscimos e decréscimos (ou “Up and Down”), consiste em aplicar sobre o isolamento em análise uma solicitação de tensão U_k próxima do valor com 50% de probabilidade de falha. Também é escolhido um degrau de tensão ΔU , aproximadamente igual ao desvio-padrão σ . Se a tensão U_k não causar descarga disruptiva no isolamento, a próxima solicitação terá uma amplitude $U_k + \Delta U$. Se ocorrer uma descarga disruptiva durante a solicitação U_k , a próxima solicitação deverá apresentar uma amplitude $U_k - \Delta U$. O mesmo procedimento deverá se repetir para as demais aplicações. Devem ser aplicadas pelo menos 20 solicitações de tensão.

O valor de tensão com 50% de probabilidade de falha (U_{50}) e seu respectivo desvio padrão σ , podem ser obtidos a partir das equações abaixo:

$$U_{50} = \frac{\sum n_v \cdot U_v}{\sum n_v} \pm \frac{\Delta U}{2}$$

$$\delta = \frac{1,62}{\Delta U} \cdot \frac{\left[\sum n_v \cdot U_v^2 - \frac{\left(\sum (n_v \cdot U_v) \right)^2}{\sum n_t} \right]}{\sum n_t} + 0,047 \cdot \Delta U$$

n_v Número de descargas ou não descargas, dependendo qual o menor
 ΔU Degrau de tensão utilizado durante o ensaio

O sinal da equação para a determinação de U_{50} é negativo quando o cálculo se baseia em descargas e positivo em caso contrário.

Existe ainda a possibilidade de se utilizar o **método dos acréscimos e decréscimos expandido**, cujo procedimento de ensaio é semelhante ao método dos acréscimos e decréscimos descrito anteriormente, porém são considerados sete impulsos por nível de tensão, ao invés de um impulso do método anterior. Nesse método, a tensão de ensaio é aumentada para $U_k + \Delta U$, se não ocorrer descarga em nenhuma das sete aplicações.

Apesar desse método ser mais exato, há a necessidade de um maior tempo de laboratório para a sua realização.

Exemplo 1 - Procedimentos para a determinação da tensão crítica de descarga (tensão com 50% de probabilidade de descarga) para impulso atmosférico em um isolador polimérico, aplicado a sistemas com tensão nominal de 230 kV, pelo método dos acréscimos e decréscimos. Os valores obtidos durante o ensaio estão apresentados na Tabela I.2 abaixo:

Tabela I.2 – Resultados obtidos durante o ensaio

Aplicação	Polaridade positiva			Polaridade negativa		
	U_{ens} (kV)	descarga	não desc.	U_{ens} (kV)	descarga	não desc.
1	1507	X		1557	X	
2	1462		X	1510		X
3	1507	X		1559	X	
4	1462	X		1512		X
5	1416		X	1557	X	
6	1462		X	1512		X
7	1507	X		1557	X	
8	1462		X	1513		X
9	1507	X		1557	X	
10	1462		X	1513		X
11	1507	X		1557	X	
12	1462	X		1512		X
13	1417		X	1557	X	
14	1462		X	1513	X	
15	1507	X		1467		X
16	1462		X	1513		X
17	1507	X		1560	X	
18	1462	X		1513		X
19	1417		X	1557	X	
20	1462		X	1513		X
21	1507	X		1559	X	
22	1462		X	1513		X
23	1507	X		1560	X	
24	1462		X	1512		X

Tabela I.2 – Resultados obtidos durante o ensaio (continuação)

Aplicação	Polaridade positiva			Polaridade negativa		
	U _{ens} (kV)	descarga	não desc.	U _{ens} (kV)	descarga	não desc.
25	1507	X		1560	X	
26	1461	X		1513		X
27	1417		X	1559	X	
28	1462	X		1513	X	
29	1417		X	1468		X
30	1462		X	1513		X
	1416	0	5	1467	0	2
	1462	5	10	1512	2	13
	1508	10	0	1557	13	0

A partir dos valores apresentados na tabela acima é possível obter, com base nas equações apresentadas, os seguintes valores para as tensões com 50% de probabilidade de descarga, polaridades positiva e negativa, e seus respectivos desvios padrão:

	Tensão crítica de descarga	Desvio-padrão
Polaridade positiva	1469,0	18,0
Polaridade negativa	1528,5	10,5

(*) Considerou-se para a determinação dos parâmetros, o número de descargas

No caso de **isolamentos não auto-recuperantes**, não é viável economicamente definir-se a probabilidade de falha através de ensaios elétricos.

Para esse tipo de isolamento, a suportabilidade elétrica pode ser alterada devido a dois fatores: o primeiro, em virtude dos ciclos térmicos e mecânicos que alteram a composição física e química dos materiais isolantes, tendendo a reduzir a suportabilidade, que deve ser portanto projetada a partir de ensaios de envelhecimento acelerado. O segundo fator, corresponde a uma excessiva tensão em um determinado ponto específico da isolamento, resultando em um processo de ionização sustentado que pode acarretar uma falha localizada na isolamento e posterior dano total a isolamento. Desta forma, uma isolamento não auto-recuperante deve ser projetada de modo que a tensão de início de ionização em pontos críticos seja bastante superior à máxima solicitação a que a isolamento possa estar submetida sob condições de regime normal de operação /3/.

Uma vez conhecida a probabilidade de 50% de falha de uma isolamento, é possível se obter uma dada probabilidade (p) de suportabilidade dessa isolamento, para uma determinada solicitação de tensão, a partir da equação mostrada abaixo:

$$U_p = U_{50} \cdot (1 - Z \cdot \sigma)$$

- U_p Tensão suportável da isolação para uma probabilidade p .
 U_{50} Tensão com 50% de probabilidade de falha.
 Z Valor obtido da Tabela A.1, apresentada no Anexo A /4/
 σ Desvio padrão, o qual depende praticamente do tipo de solicitação, sendo considerado 3% para impulsos atmosféricos e 6% para impulsos de manobra.

Com base nessa equação é possível definir alguns conceitos de suportabilidade, fundamentais para a seleção dos pára-raios e para o estudo de coordenação do isolamento:

- **Tensão Crítica de Descarga do isolamento (U_{50}):**

Corresponde a amplitude de tensão, para uma determinada forma de onda, que aplicada a um determinado tipo de isolação tem 50% de probabilidade de provocar a falha dessa isolação. Para avaliação de riscos de falha de uma isolação, é conveniente expressar as curvas de probabilidade de descarga em termos da sua tensão crítica de descarga.

Uma curva típica da tensão crítica de descarga de um dielétrico em função do tipo de solicitação é apresentada na Figura I.3.

V_d representa a tensão crítica de descarga da isolação.

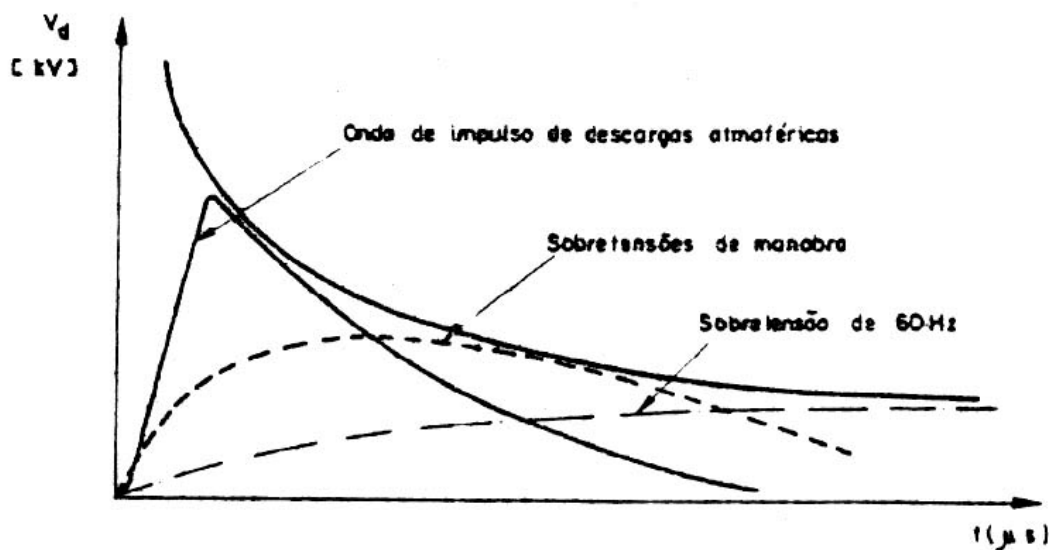


Figura I.3 – Característica ‘tensão crítica de descarga x tempo’ para um material isolante

- **Tensão suportável assumida convencional de impulso atmosférico (ou de impulso de manobra):**

Valor de crista especificado de uma tensão de impulso atmosférico (ou de manobra), para o qual o número de descargas disruptivas tolerado é zero, ou seja, não deve ocorrer descarga disruptiva na isolação submetida a um número determinado de aplicações, em condições especificadas. Este conceito é aplicável somente a isolações não auto-recuperantes.

$$U_{\text{CONV.}} = U_{50} \cdot (1 - 3 \cdot \delta)$$

$U_{\text{CONV.}}$ Tensão suportável assumida convencional de impulso atmosférico (ou de impulso de manobra)

σ Desvio padrão

- **Tensão suportável estatística de impulso atmosférico (ou impulso de manobra):**

Valor de crista de uma tensão de ensaio de impulso atmosférico (ou de manobra), para o qual a probabilidade de ocorrerem descargas disruptivas na isolação é de 10%, ou seja, a probabilidade de suportabilidade da isolação é de 90%. Esse conceito é aplicável a isolações auto-recuperantes.

$$U_{\text{CONV.}} = U_{50} \cdot (1 - 1,29 \cdot \delta)$$

U_{EST} Tensão suportável estatística de impulso atmosférico (ou de manobra)

σ Desvio padrão

As tensões suportáveis assumida convencional e estatística para impulsos atmosféricos e de manobra são genericamente denominadas como nível de isolamento a impulso atmosférico ou de manobra, respectivamente.

Desta forma, podemos considerar as seguintes definições:

TSNIA	Tensão suportável nominal para impulso atmosférico (estatística ou convencional)
TSNIM	Tensão suportável nominal para impulso de manobra (estatística ou convencional)

Os valores de crista das tensões suportáveis normalizados de impulso atmosférico e de manobra são definidos pela NBR 6939/99, em função das tensões máximas dos equipamentos.

Exemplo 2 – A partir dos resultados obtidos no exemplo 1, determinar as tensões suportáveis estatísticas de impulso atmosférico do isolador para as polaridades positivas e negativas. Considere os fatores de correção devido às condições atmosféricas de 0,95 e 0,96 para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

Os valores de tensão crítica de descarga obtidos para o isolador nas polaridades positiva e negativa foram de 1469,0 kV e 1528,5 kV, respectivamente. Considerando o fator de correção devido às condições atmosféricas, os valores de tensão crítica de descarga corrigidos são de 1395,6 kV para a polaridade positiva e 1467,4 kV para a polaridade negativa.

Como os valores referentes aos desvios padrão obtidos foram inferiores a 3% do valor obtido para a tensão crítica de descarga, será considerado o desvio de 3%.

Polaridade positiva: $U_{EST.} = 1395,6 \cdot (1 - 1,29 \cdot 0,03) \Rightarrow U_{EST.} = 1342 \text{ kV}$

Polaridade negativa: $U_{EST.} = 1467,4 \cdot (1 - 1,29 \cdot 0,03) \Rightarrow U_{EST.} = 1411 \text{ kV}$

Exemplo 3 – Calcular o risco de falha de um equipamento com isolação não auto-recuperante apresentando uma tensão suportável assumida convencional para impulso de manobra de 1050 kV, com $\sigma = 6\%$, em condições atmosféricas padronizadas, para uma sobretensão de 2,9 pu em um sistema de 460 kV.

Para uma isolação não auto-recuperante: $U_{CONV.} = U_{50} \cdot (1 - 3 \cdot \sigma)$

$1050 = U_{50} \cdot (1 - 3 \cdot 0,06) \Rightarrow U_{50} = 1050 / 0,82 \Rightarrow U_{50} = 1281 \text{ kV}$

Uma sobretensão de 2,9 pu equivale a: $2,9 \times (460 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}) = 1090 \text{ kV}$

$1090 = 1281 \cdot (1 - Z \cdot 0,06) \Rightarrow 0,06 \cdot Z = 1 - (1090 / 1281) \Rightarrow Z = 2,49$

Da Tabela A.1, para $Z = 2,49 \rightarrow F(2,49) = 1 - (0,5 + 0,4936) = 0,0064$

A probabilidade de falha da isolação para uma sobretensão de manobra de 2,9 pu será de 0,64%.

- **Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração:**

Valor eficaz especificado da tensão de frequência fundamental, que um equipamento deve suportar em condições de ensaio especificadas e durante um período de tempo igual a 1 minuto.

Os valores eficazes das tensões suportáveis normalizados de frequência fundamental de curta duração são definidos pela NBR 6939/99, em função das tensões máximas dos equipamentos.

- **Faixas para a tensão máxima do equipamento:**

A NBR 6939 / 1999 define as tensões máximas normalizadas dos equipamentos, as quais são divididas em duas faixas:

- Faixa 1: Superior a 1,0 kV e igual ou inferior a 245 kV.
- Faixa 2: Superior a 245 kV.

A faixa 1 abrange os sistemas de distribuição e de transmissão. Os diferentes aspectos operacionais devem, no entanto, serem levados em consideração na seleção do nível de isolamento nominal do equipamento.

Para sistemas situados na faixa 1, o principal risco para os equipamentos advém das descargas atmosféricas diretas, indiretas e induzidas nas redes de distribuição e linhas de transmissão aéreas conectadas. Em sistemas com cabos não conectados a linhas aéreas, as sobretensões devido a faltas ou operações de manobra tem maior probabilidade de ocorrência. Em casos raros, entretanto, sobretensões de origem atmosférica induzidas podem também ser geradas.

Para sistemas situados na faixa 2, em adição aos fatores da faixa 1, sobretensões de manobra tornam-se fenômenos importantes, aumentando sua importância para sistemas com tensões mais elevadas.

De acordo com a NBR 6939/99, o nível de isolamento normalizado do equipamento é definido pelas seguintes tensões suportáveis normalizadas:

- **Para equipamentos na Faixa 1:**

- Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico, e
- Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração;

- **Para equipamentos na Faixa 2:**

- Tensão suportável normalizada de impulso de manobra, e
- Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico;

Os níveis de isolamento normalizados definidos pela NBR 6939/99, estão apresentados nas Tabelas A.2 e A.3 do Anexo A.

É importante salientar que a característica de suportabilidade de um material isolante é dependente das condições ambientais e da altitude. As características dielétricas de um isolante se reduzem para altitudes superiores a 1.000 metros acima do nível do mar, a uma proporção de aproximadamente 1% para cada 100 metros acima de 1.000 metros. Assim sendo, fatores de correção devem ser considerados quando da análise de suportabilidade da isolação submetida ao meios externos e a altitudes acima do nível considerado.

Maiores informações referentes a isolação dos equipamentos e o efeito das solicitações de tensão sobre os isolamentos podem ser obtidos nas normas de Coordenação do Isolamento, referências /1/ e /2/.

I.3 Princípios básicos de coordenação do isolamento

Os transformadores e demais equipamentos do sistema devem suportar as sobretensões que podem ocorrer nos sistemas elétricos, de modo a permitir que esses realizem a sua função de transportar energia de forma contínua, confiável e econômica. Para tal, é necessário que as características de isolação dos equipamentos e das redes elétricas sejam compatíveis com as sobretensões encontradas no sistema.

A norma NBR 6939 / 1999 define a coordenação do isolamento como um conjunto de procedimentos utilizados na seleção de equipamentos elétricos, tendo-se em vista as tensões que podem se manifestar no sistema e levando-se em conta as características dos dispositivos de proteção, de modo a reduzir a níveis econômico e operacionalmente aceitáveis, a probabilidade de danos aos equipamentos e/ou interrupções do fornecimento de energia, causadas 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 submetidos, seguido da seleção adequada das suportabilidades elétricas e das distâncias de isolamento, levando-se em consideração as características dos dispositivos de proteção disponíveis.

Existem dois métodos em uso para se definir a coordenação do isolamento em função das sobretensões transitórias: o método determinístico (ou convencional) e o método estatístico. No entanto, muitos dos procedimentos aplicados são uma mistura de ambos os métodos. Por exemplo, alguns fatores utilizados no método determinístico foram derivados de considerações estatísticas ou algumas variações estatísticas têm sido desprezadas no método estatístico.

I.3.1 Método estatístico de coordenação do isolamento /2/

O método estatístico tenta quantificar o risco de falha através de uma análise numérica de natureza estatística das sobretensões e da suportabilidade elétrica da isolação, para ser utilizado como índice de segurança na determinação da isolação.

Esse método é baseado na frequência de ocorrência de uma origem específica, na distribuição da probabilidade de ocorrência de sobretensões devido a esta origem, e na probabilidade de descarga da isolação.

Alternativamente, o risco de falha pode ser determinado combinando a sobretensão e o cálculo de probabilidade de descarga simultaneamente, impulso por impulso, levando em conta a natureza estatística das sobretensões e das descargas por procedimentos adequados, por exemplo: usando método de Monte Carlo. Repetindo os cálculos para diferentes tipos de isolações e para diferentes estados da rede a taxa de falha total do sistema, devido a falhas da isolação, pode ser determinada.

Assim, a aplicação da coordenação do isolamento estatística dá a possibilidade de estimar a frequência das falhas diretamente como uma função dos aspectos de projeto do sistema considerado. Em princípio, mesmo a otimização do isolamento pode ser possível, se os custos das falhas puderem ser relacionados aos diferentes tipos de faltas. Na prática isto é muito difícil devido a dificuldades de se avaliar as consequências mesmo para falhas da isolação em diferentes modos de operação do sistema e devido à incerteza do custo da energia não suprida. Assim, é usualmente melhor sobredimensionar ligeiramente a isolação do sistema do que otimizá-la. O projeto da isolação do sistema baseia-se então na comparação dos riscos correspondentes às diferentes alternativas.

A aplicação desse método é mais apropriada à isolação auto-recuperante, na qual sua suportabilidade estatística pode ser determinada através das descargas disruptivas.

1.3.2 Método determinístico (ou convencional) de coordenação do isolamento

O método determinístico é normalmente aplicado quando nenhuma informação estatística, obtida mediante ensaios, sobre possíveis taxas de falha do equipamento esperadas durante a operação, está disponível /2/.

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 nível de isolamento é determinado de forma a se obter uma margem suficiente entre a máxima sobretensão e a mínima suportabilidade. Essa margem, definida como margem de proteção, determina um fator de segurança que não deve ser inferior a um valor adequado, em função da experiência das instalações existentes, e destina-se a cobrir as incertezas na determinação das sobretensões, incluindo o efeito – distância ou desvios nas características do isolamento dos equipamentos e do dispositivo de proteção que resultem em falha do equipamento.

$$MP = \frac{\text{Tensão mínima suportável do isolamento}}{\text{Máxima sobretensão imposta ao isolamento}}$$

A Tabela I.3, apresenta as margens de proteção usualmente recomendadas entre o nível de suportabilidade da isolação e a máxima tensão imposta ao isolamento:

Tabela I.3 – Margens de proteção recomendadas

Tensão máxima de operação (kV_{ef})	Sobretensões atmosféricas	Sobretensões de manobra
1 a 245	1,20	-----
> 245	1,25	1,15

O método determinístico é o único que pode ser utilizado no dimensionamento de isolamentos não auto-recuperantes, visto não ser possível expressar o comportamento estatístico desses isolamentos frente às sobretensões.

Pela equação acima fica evidente a necessidade de se reduzir o efeito das máximas sobretensões que são impostas aos isolamentos dos equipamentos e sistemas, garantindo assim um aumento na confiabilidade desses.

Dentre os possíveis dispositivos atualmente utilizados para reduzir o efeito das sobretensões sobre os equipamentos instalados nas redes elétricas, o pára-raios tem se mostrado como o mais eficaz. **Os pára-raios tem como função principal limitar as sobretensões transitórias elevadas nos terminais dos equipamentos por ele protegidos a níveis pré-estabelecidos, de modo que o isolamento desses equipamentos não fiquem com as suas características afetadas após a ocorrência de uma sobretensão.**

Geralmente, a tensão máxima imposta ao isolamento do equipamento protegido é superior a tensão nos terminais dos pára-raios, devido a presença de oscilações nos cabos de ligação e da distância elétrica entre os pára-raios e o equipamento protegido. Esta elevação de tensão ocorre pelo efeito dos cabos de conexão e pelo efeito da distância de separação, e será discutida em seções posteriores.

Desta forma, a tensão nos terminais do equipamento protegido deve incluir o efeito da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido, quando esse for significativo. Caso contrário, a tensão nos terminais do equipamento protegido é igual ao nível de proteção oferecido pelo pára-raios acrescido da queda de tensão nos seus cabos de conexão.

De forma simplificada, quando os efeitos de separação entre o pára-raios e o equipamento protegido ou das conexões de ligação do pára-raios podem ser considerados desprezíveis, existem três relações de proteção em uso que comparam os níveis de proteção dos pára-raios com os níveis de suportabilidade do equipamento protegido correspondentes, conforme mostram as equações abaixo:

$$MP_1 = \frac{TSIACF}{NPFO}$$

TSIACF Tensão suportável de impulso atmosférico cortado do equipamento
NPFO Nível de proteção do pára-raios para frente de onda

$$MP_2 = \frac{TSNIA}{NPIA}$$

TSNIA Tensão suportável nominal de impulso atmosférico do equipamento
NPIA Nível de proteção do pára-raios para impulso atmosférico

$$MP_3 = \frac{TSNIM}{NPIM}$$

TSNIM Tensão suportável nominal de impulso de manobra do equipamento
NPIM Nível de proteção do pára-raios para impulso de manobra

O método determinístico 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 I.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.

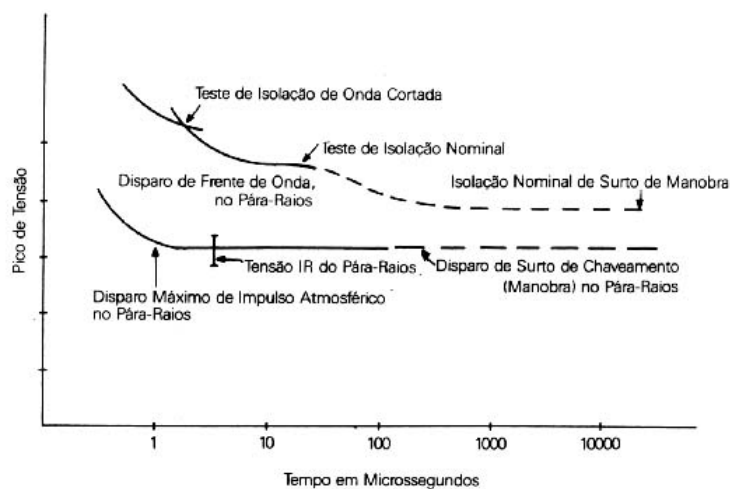


Figura I.4 – Princípio básico da coordenação do isolamento pelo método determinístico

No caso de surtos de manobra, a máxima sobretensão imposta ao sistema pode ser determinada conhecendo-se a distribuição das sobretensões de manobra registradas ao longo da linha (V_{50}) e o seu respectivo desvio padrão σ_V , considerando-se uma sobretensão de manobra cujo valor de crista tem uma probabilidade estatística de 2% de ser excedida.

$$V_{MAX.} = V_{50} \cdot (1 + 2,05 \cdot \sigma_V)$$

Utilizando-se uma margem de proteção de 1,15 entre a sobretensão máxima e a tensão suportável mínima, haverá uma probabilidade muito pequena de descarga no isolamento, sendo possível determinar a sua tensão crítica de descarga, conforme mostrado a seguir:

$$MP = 1,15 = \frac{\text{Tensão suportável mínima do isolamento}}{V_{50} (1 + 2,05 \cdot \sigma_V)}$$

$$\text{Tensão suportável mínima do isolamento} = U_{MIN.} = U_{50} \cdot (1 - 3 \cdot \sigma_D)$$

$$U_{50} = \frac{1,15 \cdot V_{50} \cdot (1 + 2,05 \cdot \sigma_V)}{(1 - 3 \cdot \sigma_D)}$$

U_{50} é a tensão crítica de descarga do isolamento auto-recuperante para atender as condições de coordenação do isolamento.

Exemplo 4 – Utilizar o método determinístico de coordenação do isolamento para determinar as margens de proteção oferecidas pelo pára-raios a um equipamento com tensão máxima de operação de 145 kV, apresentando uma tensão suportável para impulso atmosférico de 550 kV.

Dados do pára-raios: Tensão nominal: 120 kV
 Tensão residual para impulso íngreme - 10 kA: 344 kV
 Tensão residual p/ impulso atmosférico - 10 kA: 324 kV
 Tensão residual p/ impulso de manobra - 0,5 kA: 244 kV

Desprezar os efeitos dos cabos de conexão e da distância de separação entre o pára-raios e o equipamento a ser protegido.

Determinação da margem de proteção 1 (ondas de frente íngreme)

$$\begin{aligned} \text{TSIACF} &= 1,15 \cdot \text{TSNIA} \quad \rightarrow \quad \text{TSIACF} = 1,15 \cdot 550 \quad \rightarrow \quad \text{TSIACF} = 633 \text{ kV} \\ \text{NPFO} &= 344 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$MP_1 = \frac{TSIACF}{NPFO} \qquad MP_1 = \frac{633}{344} \qquad MP_1 = 1,84 = 84\%$$

Determinação da margem de proteção 2 (impulso atmosférico normalizado)

$$TSNIA = 550 \text{ kV} \quad NPIA = 324 \text{ kV}$$

$$MP_2 = \frac{TSNIA}{NPIA} \qquad MP_2 = \frac{550}{324} \qquad MP_2 = 1,70 = 70\%$$

Determinação da margem de proteção 3 (impulsos de manobra)

$$TSNIM = 0,83 \cdot TSNIA \quad \rightarrow \quad TSNIM = 0,83 \cdot 550 \rightarrow TSNIM = 457 \text{ kV}$$

$$NPIM = 244 \text{ kV}$$

$$MP_3 = \frac{TSNIM}{NPIM} \qquad MP_3 = \frac{457}{244} \qquad MP_3 = 1,87 = 87\%$$

I.4 Referências bibliográficas

- /1/ NBR 6939 / 1999 – “Coordenação do Isolamento - Procedimento” – 1º Projeto de Revisão da NBR 6939 / 1987.
- /2/ Draft da NBR 8186 / 2000 – “Coordenação do Isolamento – Guia de Aplicação”.
- /3/ Dájuz, Ary. Et alii, “Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão”, Furnas Centrais Elétricas, Universidade Federal Fluminense / EDUFF, 1987.
- /4/ Lapponi, J. C., “Estatística usando EXCEL 5 e 7”, Lapponi Treinamento e Editora Ltda., 1997.
- /5/ Dájuz, Ary. Et alii, “Equipamentos Elétricos – Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão”, Furnas Centrais Elétricas, Universidade Federal Fluminense / EDUFF, 1985
- /6/ Harper, G. E., “Técnicas Computacionales en Ingenieria de Alta tensión”, Editora Limusa, 1987.
- /7/ Gervás, F., “Guia para la Coordinación de Aislamiento en Subestaciones de Alta Tension”, 1981.
- /8/ Chagas, F. A. & Verdolin, R. T., “Análise Estatística dos Resultados dos Ensaio de Alta Tensão”, I Encontro Nacional sobre Técnicas de Ensaio de Alta Tensão, São Paulo, Novembro – 1987.

Tabela A.1 – Área submetida pela curva normal reduzida de 0 a $Z/4$.

Z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,00	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,10	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,20	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,30	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,40	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,50	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,60	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,70	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,80	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,90	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,00	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,10	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,20	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,30	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,40	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,50	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,60	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,70	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,80	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,90	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,00	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,10	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,20	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,30	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,40	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,50	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,60	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,70	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,80	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,90	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,00	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,10	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,20	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,30	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,40	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998
3,50	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998
3,60	0,9998	0,9998	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,70	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,80	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
3,90	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
4,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabela A.2 Níveis de isolamento normalizados para $1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$

Tensão máxima do equipamento U_m [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV _{crista}]
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	1050

NOTAS

1 O nível de isolamento correspondente à $U_m = 0,6 \text{ kV}$ só é aplicável a secundário de transformador, cujo primário tem U_m superior a 1 kV .

2 Se os valores entre parêntesis forem considerados insuficientes para provar que as tensões suportáveis fase-fase especificadas são satisfeitas, ensaios adicionais de suportabilidade fase-fase são necessários.

* Indica valores não constantes na IEC 60071-1.

Tabela A.3 – Níveis de isolamento normalizados para $U_m > 245 \text{ kV}$

Tensão máxima do equipamento U_m [kV _{eficaz}]	Tensão suportável normalizada de impulso de manobra			Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico [kV _{crista}]
	Isolação longitudinal (nota 1) [kV _{crista}]	Fase-terra [kV _{crista}]	Fase-fase (relação para o valor de crista fase-terra)	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1050
362	850	850	1,50	950 1050
	850	950	1,50	1050 1175
420	850	850	1,60	1050 1175
	950	950	1,50	1175 1300
420/460*	950	1050	1,50	1300 1425
525	950	950	1,70	1175 1300
525/550*	950	1050	1,60	1300 1425
	950	1175	1,50	1425 1550
550*	950	1300	1,50	1550 1675
765	1175	1300	1,70	1675 1800
765/800*	1175	1425	1,70	1800 1950
	1175	1550	1,60	1950 2100
<p>NOTAS</p> <p>1 Valor da componente do impulso do ensaio combinado aplicável.</p> <p>2 A introdução de U_m 1050 kV e 1200 kV e das tensões suportáveis associadas estão sob consideração.</p> <p>* Indica valores não constantes na IEC 60071-1.</p>				