

## Capítulo IV

# Estudos elétricos de sobretensões, coordenação de isolamento e impactos de campos elétricos e magnéticos

Por Sérgio Feitoza Costa\*

Nesta série de fascículos são apresentados conceitos de engenharia para o projeto e a especificação de equipamentos de subestações de transmissão e distribuição. O primeiro capítulo desta série cobriu aspectos dos estudos do sistema elétrico que servem de base para as especificações técnicas dos equipamentos. O segundo cobriu conceitos sobre curtos-circuitos, ampacidades, sobrecargas e contatos elétricos. Já o terceiro capítulo abordou as técnicas de ensaios de alta potência, laboratórios de ensaios e principais ensaios. Este quarto capítulo abordará o tema “Estudos elétricos de sobretensões,

coordenação de isolamento e impactos de campos elétricos e magnéticos”.

### ESTUDOS ELÉTRICOS DE SOBRETENSÕES

Da mesma forma como são realizados estudos relacionados à circulação de correntes de curto-circuito e correntes nominais, que foram descritos no segundo capítulo desta série, são realizados outros estudos relacionados às tensões permanentes e transitórias que são aplicadas aos equipamentos de uma subestação no dia a dia.

As sobretensões que acontecem em uma rede elétrica podem ser classificadas como “longa duração”, quando duram até dezenas de segundos e as de “curta duração”, que são da ordem de grandeza de 100 a 3.000 microssegundos. Uma típica sobretensão de longa duração é a que ocorre quando, durante um temporal, um galho de árvore toca o cabo de uma das três fases do circuito e provoca um curto fase terra que abre o fusível da chave fusível daquela fase. No momento da interrupção da corrente na fase defeituosa, é provocada uma sobretensão nas duas fases não defeituosas que pode fazer o valor da tensão subir

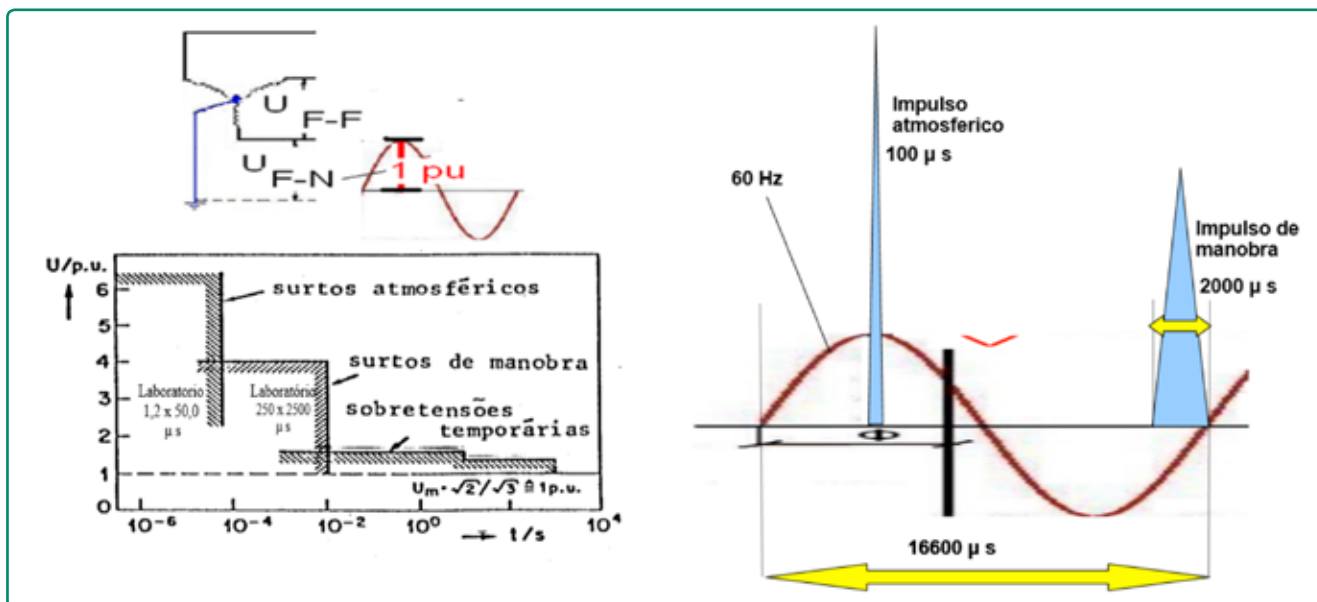


Figura 1 – Exemplos das durações das sobretensões.

do valor fase terra para algo próximo da tensão fase-fase e isso é percebido nas casas com a luz ficando mais forte. Se a duração do evento é maior, pode-se queimar geladeiras, aparelhos de ar condicionado, computadores e outros eletroeletrônicos.

As sobretensões de longa duração são de frequência da ordem de 50-60 Hz e seus harmônicos. São em geral sustentadas e pouco amortecidas, podendo alcançar amplitudes da ordem de 1,5 P.U. Sua efetiva duração vai depender do sistema de controle de tensão do sistema.

Exemplos de causas destas sobretensões são a perda súbita de carga em sistemas radiais, as faltas para a terra desbalanceadas, a desconexão de cargas indutivas, a conexão de cargas capacitivas e a energização de linhas em vazio.

A perda súbita de carga ocorre quando uma linha com a maior parte da energia de um gerador é desligada, em que os geradores aceleram e a tensão sobe. A magnitude da sobretensão depende de

comprimento, da potência de curto-circuito local e grau de compensação da linha. Quanto mais malhado o sistema, menor será a sobretensão, sendo que, como ordem de grandeza, estas sobretensões podem variar da ordem de 20% a 95% dependendo da rapidez dos reguladores de velocidade e do grau de compensação.

No caso da manobra de correntes capacitivas, a tensão de restabelecimento transitória (TRT) nos terminais de cada fase do disjuntor cresce lentamente, facilitando a interrupção, mas a tensão máxima de pico pode chegar a 2 pu e provocar reacendimento do arco se não há suficiente separação dos contatos, reconectando a capacitância C à fonte. Neste caso, se uma nova interrupção acontece próxima do zero de corrente, a tensão pode ir duplicando e, inclusive, levar à explosão do disjuntor.

Um caso frequente e fácil de explicar com um exemplo é o das faltas para a terra desbalanceadas mencionadas anteriormente. No Brasil, como não se dá

valor à estética dos sistemas de distribuição de energia, é comum encontrar pelas ruas gambiarras (Figura 2) que seriam inaceitáveis em alguns países do primeiro mundo.

Nas zonas mais abastadas, nas quais circulam turistas e moram as autoridades, como a Zona Sul do Rio de Janeiro, a estética ainda tem algum valor, mas no restante da cidade é comum a existência dessas vergonhosas e perigosas instalações. É usual também encontrar transformadores muito próximos a janelas de apartamentos, como na foto que foi mostrada no Capítulo 1 do fascículo. Este tipo de situação tem sido inclusive motivo de ações judiciais. A reportagem exibida no Bom Dia Brasil da TV Globo em 27/09/2012 (que pode ser encontrada no site da [www.globo.com](http://www.globo.com)) retrata bem a questão das “gambiarras” dos sistemas aéreos de distribuição brasileiros.

A reportagem mostra também a questão dos apagões e as desculpas de que chuvas e vendavais são os culpados pela operação



Figura 2 – Situações em que é fácil acontecer um curto fase terra durante um temporal causando sobretensões.

deficiente. Cabe notar que os sistemas subterrâneos, embora um pouco mais caros, dão muito menos defeitos e não estão expostos aos ventos e chuvas. Por isso, são muito usados nos países desenvolvidos. Nosso setor elétrico claramente andou para trás nos últimos 15 anos em todos os aspectos possíveis.

Considerando estas classificações, as sobretensões de curta duração são as que ocorrem devido às descargas atmosféricas e os chamados impulsos de manobra. Os impulsos atmosféricos são os nossos “raios”. Frequentemente, são considerados os vilões dos apagões, quando não se quer tornar claro que houve um erro de manobra ou de planejamento. Entretanto, as descargas atmosféricas são um dos eventos mais

previsíveis e controláveis, sendo estudadas e monitoradas há muitas décadas e suas formas de onda e valores típicos são como mostrados na Figura 3. Os valores a aplicar nos testes de laboratório para classe de tensão são especificados em normas técnicas como IEC, ABNT, entre outras.

Os testes de laboratório que visam simular os efeitos das descargas atmosféricas são realizados aplicando-se uma onda padrão de forma de onda 1,2 / 50  $\mu$ s. Estes valores buscam representar um certo valor de crista que ocorre nas redes elétricas, assim como os tempos de subida e de descida da tensão. Para equipamentos de classe de tensão mais baixa que 230 kV, os impulsos atmosféricos são considerados

como as sobretensões mais relevantes.

Os impulsos de manobra surgem devido à abertura e ao fechamento dos disjuntores, seccionadores e outros dispositivos de manobra instalados nos sistemas. As formas de onda típicas são também mostradas na Figura 3. São simulados em laboratório por impulsos de tensão com uma forma de onda de 250 x 2.500  $\mu$ s, sendo o primeiro valor o tempo de frente e o segundo associado ao tempo de cauda.

As ondas de impulso aplicadas em laboratório são produzidas por geradores de impulso. Estes são equipamentos compostos por capacitores, resistores e centelhadores. Por meio do ajuste dos valores destes componentes, obtém-se as ondas desejadas.

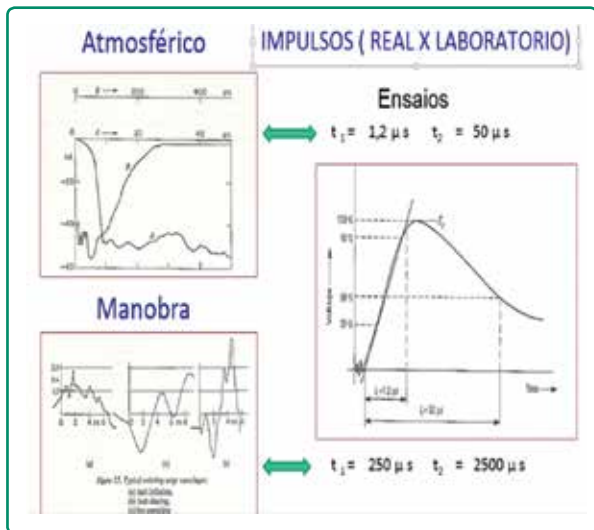


Figura 3 – Sobretensões de impulso.

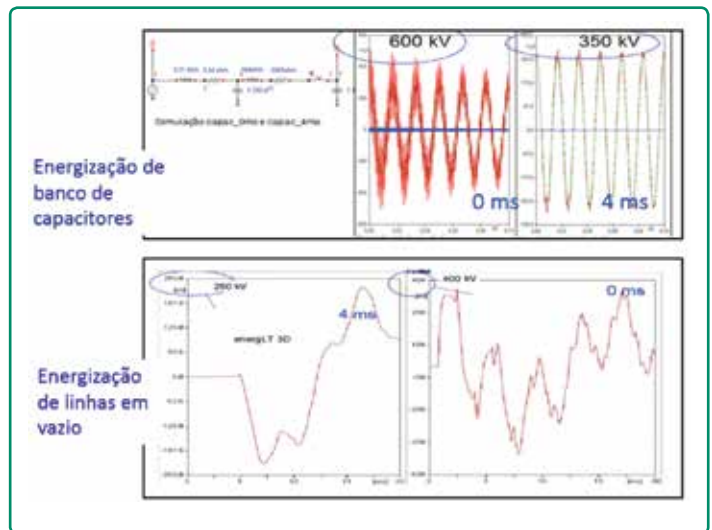


Figura 4 – Exemplo de uso de sincronizadores.

Para minimizar o efeito das sobretensões de manobra nas redes elétricas de alta tensão, são utilizados dispositivos de controle de sobretensões, tais como:

- Resistores de pré-inserção: usados para reduzir sobretensões em manobras de energização e religamento de linhas (no fechamento). Também são aplicados na redução da amplitude das tensões de restabelecimento transitórias de disjuntores (se utilizados na abertura);
- Para-raios: para impedir sobretensões superiores àquelas para os quais os equipamentos foram projetados;
- Capacitores nos terminais de disjuntores: para reduzir taxa de crescimento da TRT;
- Blindagem de linhas e subestações contra descargas atmosféricas (cabos para-raios e hastes de proteção): para evitar incidência direta nos condutores;
- Sincronizadores: para redução das sobretensões ou sobrecorrentes por controle do ângulo de fechamento na tensão. São especialmente úteis na energização de linhas em vazio e bancos de capacitores, assim como para evitar correntes de "inrush" em transformadores. A Figura 4 exibe um exemplo típico de aplicação, mostrando como as sobretensões são reduzidas pelo simples controle do ângulo de fechamento ou abertura da tensão na manobra.

Os estudos elétricos de sobretensões são feitos com o suporte de programas de

computador, como o ATP / ATPDRAW. Este programa, que pode ser baixado livremente na internet, quando utilizado por especialistas com certa experiência na análise de seus resultados, permite simular os efeitos das condições de configurações e manobras operativas que vão dar origem a sobretensões de curta ou longa duração. Com base nos valores obtidos nestes estudos é que será baseada a coordenação do isolamento daquela rede elétrica.

### COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

Os procedimentos e definições são explicados na norma 60071-1 – Coordenação de Isolamento e correspondentes normas nacionais. Esta norma começa com uma série de definições e conceitos, entre as quais as classificações dos tipos de isolamentos em: (a) Auto-recuperantes, por exemplo, as distâncias entre fases no ar e a parte externa de isoladores (b) Não auto-recuperantes, como o papel impregnado a óleo de transformadores, a parte interna de buchas e a especificação das distâncias de escoamento (kV / mm) de isolamentos que são selecionadas com base na tensão máxima de operação, poluição, umidade e densidade do ar.

A norma define também as tensões suportáveis como aquelas a serem aplicadas em ensaio durante o qual um número específico de descargas destrutivas é tolerado. A tensão suportável é designada

como: (a) convencional, quando o número de descargas toleradas é zero (probabilidade de suportar  $P_w = 100\%$ ) e (b) estatística, quando o número de descargas toleradas é relacionado a uma probabilidade de suportabilidade especificada, por exemplo, 90%.

Neste segundo caso dos 90%, durante um teste de impulso atmosférico, o equipamento seria aprovado se, em cada série de quinze impulsos, ocorresse, no máximo, duas descargas por polaridade em meio auto-recuperante e nenhuma descarga em meio não auto-recuperante.

Também é mostrado como selecionar as tensões suportáveis e níveis de isolamento nominal do equipamento em função dos valores máximos de tensões que podem ocorrer na rede, obtidos nos estudos de sobretensões. Para tal, são apresentadas, nas tabelas da norma, listas de valores para as tensões suportáveis de impulso e para as tensões suportáveis à frequência industrial. A Figura 5 mostra parte de uma tabela típica, no caso, da ABNT NBR 7282.

Deve-se notar que, para um mesmo valor de tensão nominal, pode haver mais de uma lista de valores de tensões suportáveis. Em algumas normas, estes valores são descritos como isolamento pleno ou isolamento reduzido. Na verdade, o que está atrás das diferentes alternativas de tensões suportáveis é que representam práticas em diferentes países ou diferentes regiões com suas condições atmosféricas e

TABELA 1 – NÍVEIS DE ISOLAMENTO NOMINAIS (SÉRIE I)

Tensão nominal $U_r$ kV (valor eficaz)	Tensão suportável à frequência industrial durante 1 minuto (eficaz) $U_c$ kV (valor eficaz)		Tensão suportável de impulso atmosférico $U_m$ kV(pico)	
	Valor Comum	Através da distância de isolamento	Valor Comum	Através da distância de isolamento
17,5	38	45	75	85
			95	110
24	50	60	95	110
			125	145
36	70	80	145	165
			170	195
145	230	265	550	630
	275	315	650	750

de poluição específicas.

A sequência para realizar a coordenação de isolamento é, portanto:

- Determinar as sobretensões: magnitude, duração e probabilidade de ocorrência;
- Selecionar os níveis de isolamento empregando um dos métodos:
- Método convencional considerando as sobretensões + margem de segurança (por exemplo 25%).
- Método estatístico: selecionar um certo risco de falha.
- Especificar nas especificações técnicas os ensaios dielétricos:
- Frequência industrial.
- Impulso de manobra ( $250 \times 2.500 \mu S$ ).
- Impulso atmosférico ( $1,2 \times 50 \mu S$ ).
- Onde for aplicável, é necessário prever o uso de dispositivos de proteção para reduzir

sobretensões e, eventualmente, reduzir os níveis de isolamento a especificar.

Outro aspecto a considerar, no caso do projeto de subestações, é a seleção dos espaçamentos e distâncias de segurança. A norma IEC 61936 sobre instalações de potência de alta tensão é muito didática no que diz respeito aos conceitos para

distâncias elétricas mínimas. Esta norma vai além disso e explica outros aspectos do projeto eletromecânico, como a questão das distâncias de segurança entre transformadores e construções, distâncias relativas a aspectos de incêndios e subestações ou mesmo alguns aspectos do aterramento e tensões de passo e toque (Figura 5).

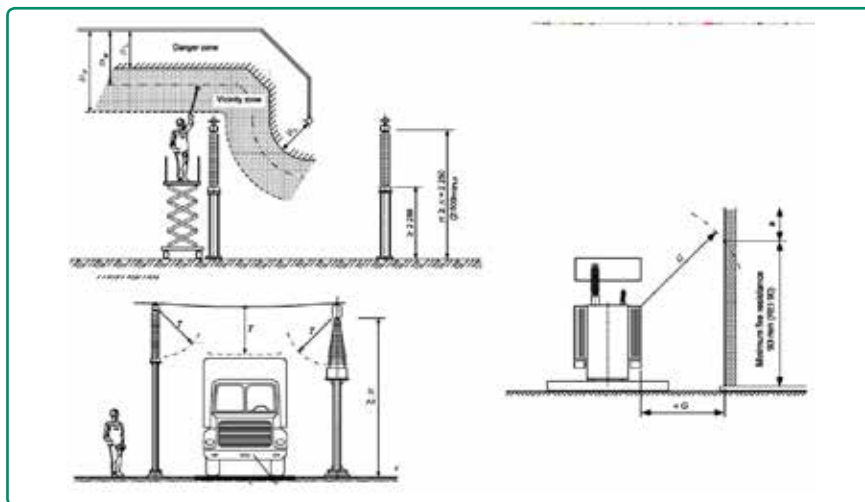


Figura 5 – Distâncias de segurança (IEC 61936).



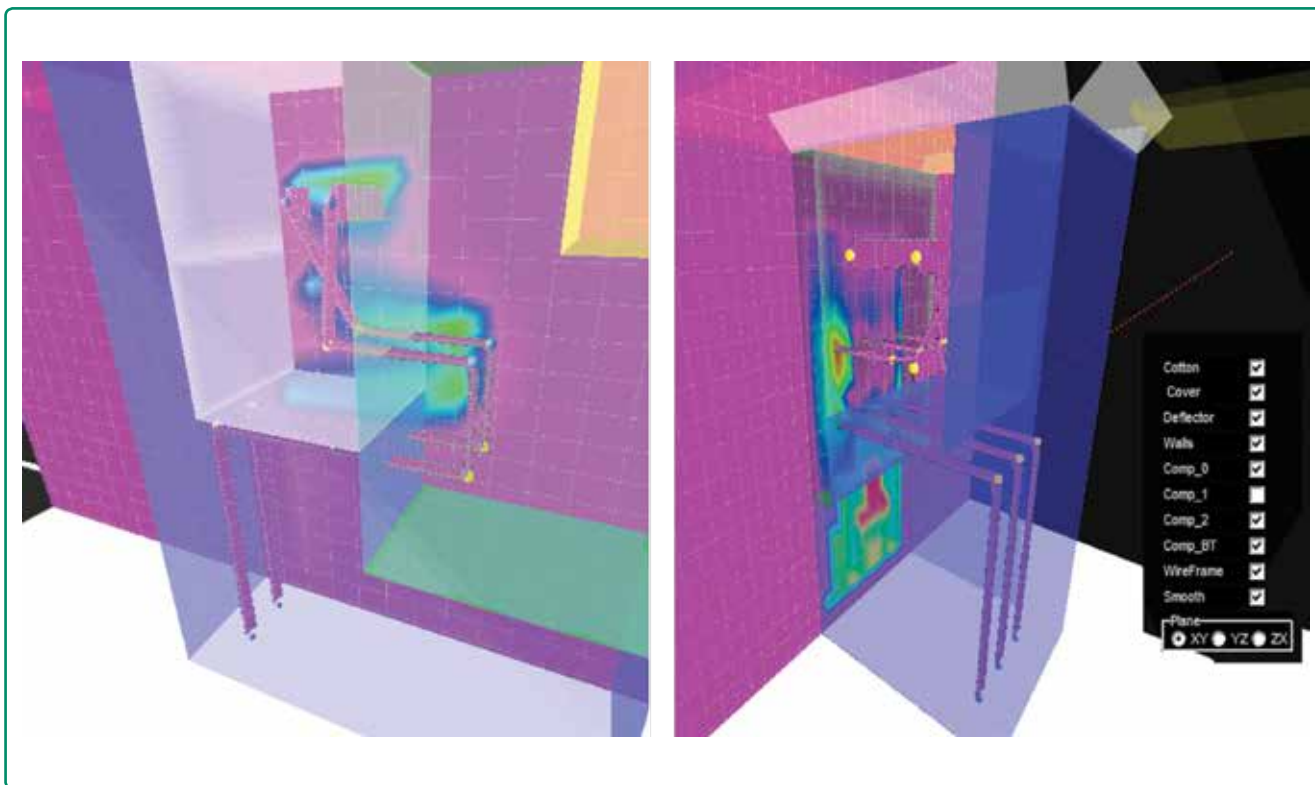


Figura 6 – Campo magnético (à esquerda) e campo elétrico (à direita).

### EFEITOS E IMPACTOS DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

Como foi mostrado no Capítulo 1 desta série, a circulação de correntes permanentes elevadas produz campos magnéticos que, se ficarem acima de certos níveis, podem ser prejudiciais a pessoas (saúde) e a instalações (aquecimentos indevidos e problemas de compatibilidade eletromagnética).

Do ponto de vista dos impactos à saúde, há toda uma legislação que deve ser obedecida durante o projeto de uma subestação de energia. Esta legislação estabelece um certo limite para a exposição do público em geral e de operadores, tanto para campos magnéticos como para campo elétrico.

Os campos magnéticos são tão maiores quanto maiores são as correntes circulantes. Nos aspectos mencionados de aquecimentos e impactos à saúde, as correntes de interesse são as correntes permanentes / nominais.

Em alguns aspectos dos problemas de compatibilidade eletromagnética (CEM) em subestações, as correntes nominais também são de interesse. Entretanto, para a CEM, no que diz respeito à imunidade a campos no projeto de equipamentos, as correntes elevadas de curto-circuito são mais importantes. O motivo é que, durante o curto-circuito, os campos magnéticos produzidos são muito elevados e podem interferir no funcionamento de componentes eletrônicos, relés e outros tipos de componentes usados no comando e proteção da subestação.

O bom conhecimento dos campos elétricos e magnéticos permite saber em qual lugar não instalar componentes sensíveis a interferências eletromagnéticas. Na Figura 6, a título de exemplo, são mostrados os campos magnéticos no interior de um painel elétrico submetido a uma corrente permanente trifásica, assim como o campo elétrico. É possível notar que,

em algumas regiões, os campos são reduzidos, mas, em outras, são muito elevados. Nestas, não se deve colocar componentes sensíveis, como os eletrônicos, relés, contadores, etc. Estes resultados foram obtidos com o software SwitchgearDesign.

Em um dos capítulos finais deste fascículo serão mostrados mais detalhes sobre a descrição das técnicas para simulação de ensaios de alta potência e aplicações no desenvolvimento e certificação de produtos.

*\*Sergio Feitoza Costa é engenheiro eletricista, com mestrado em sistemas de potência. É diretor da Cognitor, Consultoria, P&D e Treinamento.*

#### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para [redacao@atitudeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeditorial.com.br)