

## CAPÍTULO 9

# MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA FRENTE A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS PADRONIZADOS

*Guilherme da Silva Lima  
Alberto Resende De Conti*

---

### 1. Introdução

Descargas atmosféricas são a principal causa de desligamentos não programados em redes de distribuição de energia elétrica (SOUZA *et al.*, 2014). As descargas atmosféricas podem incidir diretamente sobre a linha de distribuição ou em sua vizinhança (VISACRO, 2005, p. 137). A incidência direta de uma descarga atmosférica leva, inevitavelmente, a uma falha de isolamento na linha de distribuição, o que a conduz a um desligamento, interrompendo o fornecimento de energia elétrica. No caso da incidência de descargas na vizinhança da linha, o desligamento pode ocorrer caso a intensidade da tensão induzida pela descarga atmosférica seja suficientemente elevada (DE CONTI *et al.*, 2010).

As redes de distribuição aéreas de energia elétrica têm passado por mudanças construtivas que visam reduzir o número de desligamentos causados tanto por descargas atmosféricas quanto por contatos momentâneos com parte aterradas (GOMES, 2015; LIMA, 2015). A adoção de cabos com cobertura isolante foi uma das mudanças adotadas, o que levou a um aumento significativo no nível de suportabilidade dielétrica da rede de distribuição frente a sobretensões de origem atmosférica (LIMA *et al.*, 2017a). Para as redes convencionais, que utilizam cabos nus, são consagrados na literatura dois tipos de ensaios para obtenção de parâmetros de suportabilidade dielétrica, o método dos acréscimos e decréscimos e a curva tensão versus tempo (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 479; ABNT, 2013, p. 17). Para redes compactas, que utilizam cabos com cobertura isolante, os parâmetros de suportabilidade dielétrica ainda seguem em avaliação (LIMA *et al.*, 2017a; LIMA *et al.*, 2017b; SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019).

Uma limitação dos métodos empregados para a determinação de parâmetros de suportabilidade dielétrica das redes compactas esbarra no pequeno tamanho amostral tipicamente associado aos dados obtidos em laboratório devido à característica destrutiva de ensaios realizados com cabos cobertos (LIMA *et al.*, 2017a). Com isso, a média amostral das tensões impulsivas que levam à perfuração dos cabos cobertos tem sido o parâmetro utilizado para realização das inferências sobre a suportabilidade dielétrica das redes de distribuição compactas (SOUZA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019). Entretanto, a média amostral não é o melhor parâmetro para descrever a suportabilidade dielétrica de um meio isolante. No caso de redes de distribuição compactas, por exemplo, um parâmetro mais relevante seria a sobretensão atmosférica a que essa rede poderia ser submetida com probabilidade menor que 10% de que ocorresse uma perfuração no cabo. Contudo, como o número de amostras disponíveis a partir de ensaios realizados em estruturas de redes de distribuição compactas é reduzido, a análise dos dados obtidos em laboratório requer o emprego de técnicas estatísticas que não estão previstas em norma (ABNT, 2013).

De forma a prover os elementos necessários para uma estimação mais rigorosa da ocorrência de falhas de isolamento causadas por descargas atmosféricas em redes de distribuição compactas, este capítulo descreve métodos estatísticos que podem ser empregados na análise de conjuntos de dados com pequenos números de amostras. Esses métodos são inicialmente aplicados em um estudo de caso hipotético, utilizando simulações computacionais, que têm a função de demonstrar os limites de validade de cada um. Em seguida, esses métodos são aplicados na análise estatística de dados provenientes de testes realizados em estruturas básicas de redes de distribuição de média tensão compactas monofásicas considerando o emprego de condutores nus, situação na qual o meio isolante é o ar, que apresenta propriedades autorrecuperantes. Isso permite avaliar o desempenho dos métodos quando se consideram conjuntos com grande número de amostras. Finalmente, os métodos são aplicados na caracterização estatística dessas mesmas estruturas considerando a situação normal de operação da rede, isto é, condutores com cobertura isolante. Nesse caso, a isolação testada possui natureza não autorrecuperante e a disponibilidade de dados de ensaio é usualmente limitada.

## 2. Metodologia para o levantamento de dados laboratoriais

Para levantar parâmetros de suportabilidade dielétrica que possam ser empregados para caracterizar o comportamento de componentes de sistemas elétricos frente a sobretensões de origem atmosférica, são necessários ensaios de alta tensão. Esses ensaios visam reproduzir situações próximas àquelas a que a rede elétrica ficaria exposta quando submetida a uma solicitação de

origem atmosférica. Neste capítulo, para a realização de ensaios de alta tensão em estruturas de redes de distribuição compactas, foi utilizado um gerador de impulsos do tipo Marx de seis estágios, com amplitude máxima de 600 kV. Mais informações sobre a instrumentação utilizada podem ser encontradas em Lima (2015) e Gomes (2015). Dessa forma, a pesquisa que origina este capítulo é quantitativa, sendo seus resultados um suporte para análises qualitativas referentes ao desempenho de redes de distribuição de média tensão.

O meio dielétrico ensaiado pode assumir características diferentes após a ocorrência de uma disrupção. Quando retorna à sua condição inicial após a ocorrência da disrupção, o meio dielétrico é denominado autorrecuperante. Caso não mantenha as características isolantes após a disrupção, o meio dielétrico é denominado não autorrecuperante (KUFFEL *et al.*, 2000).

O meio dielétrico associado às redes de distribuição de energia convencionais é o ar, que é autorrecuperante. Isso torna os ensaios para obtenção de parâmetros de suportabilidade em redes convencionais, que utilizam condutores nus, bem consolidados através da norma nacional ABNT NBR IEC 60060-1 (2013, p. 17) e da norma internacional IEEE Std. 4 (2013, p. 479). Por outro lado, a presença de cabos com cobertura isolante de polietileno reticulado (XLPE) em redes de distribuição compactas faz com que o meio dielétrico testado nos ensaios de alta tensão realizados em estruturas dessas redes não seja autorrecuperante (LIMA *et al.*, 2017a). Em tais situações, as normas preveem critérios de aceitação de equipamentos e materiais, mas não de determinação de níveis de suportabilidade dielétrica frente a sobretensões atmosféricas (LIMA, 2015).

O procedimento laboratorial mais difundido para ensaios em meios dielétricos autorrecuperantes é o método dos acréscimos e decréscimos (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 480). Este método consiste na aplicação sucessiva de impulsos atmosféricos padronizados com forma de onda do tipo 1,2/50  $\mu$ s (ABNT, 2013, p. 21). O primeiro nível de impulso aplicado é o nível de suportabilidade fornecido pelo fabricante ou, na ausência deste valor, o nível de sobretensão em que não é esperada a ocorrência de uma disrupção. Os próximos níveis de tensão dependem da ocorrência ou não de uma disrupção. Caso ocorra uma disrupção, o próximo nível de tensão é  $\Delta V$  menor que o nível de tensão atual; caso não ocorra uma disrupção, o próximo nível de tensão é  $\Delta V$  maior que o nível de tensão atual. O valor de  $\Delta V$  é escolhido dentro da faixa de 1,5% e 3% do valor do nível de suportabilidade fornecido pelo fabricante ou esperado para o ensaio (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 480). Obtêm-se no mínimo vinte amostras úteis, isto é, amostras resultantes de ensaios realizados após a ocorrência da primeira disrupção (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 480). Com os dados amostrais obtidos através do método dos acréscimos e decréscimos, é possível determinar os níveis de sobretensão em que ocorrem 10%, 50%

e 90% das disrupções dielétricas para a aplicação de impulsos atmosféricos padronizados (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 482; HAUSCHILD; MOSCH, 1992). Isso é objeto de estudo da próxima seção.

Os ensaios laboratoriais que envolvem meios isolantes não autorrecuperantes têm características destrutivas. Por essa razão, o método dos acréscimos e decréscimos deixa de ser válido. Para determinar a suportabilidade de cabos com cobertura isolante, procedimentos de ensaios foram propostos por Lee *et al.* (1982), Nakamura *et al.* (1986) e He *et al.* (2008). Esses foram aprimorados por Lima *et al.* (2017a) para se adequar às particularidades das estruturas das redes de distribuição compactas utilizadas por concessionárias de energia elétrica no Brasil e, em especial, na área de concessão da CEMIG D.

O procedimento de ensaio proposto em (LIMA *et al.*, 2017a) para obtenção dos níveis de suportabilidade das redes de distribuição compactas consiste na aplicação de impulsos atmosféricos padronizados em patamares de tensão até a ocorrência de uma disrupção. O primeiro patamar de tensão é o nível de tensão mais elevado para o qual não se espera a ocorrência de uma disrupção dielétrica. São aplicados cinco impulsos padronizados em cada patamar de tensão avaliado. Caso não ocorra uma disrupção, o patamar é elevado somando-se 10 kV ao último nível testado. Após a aplicação de cada impulso de tensão, verifica-se a indução de cargas superficiais na cobertura isolante do cabo (NAKAMURA *et al.*, 1986). Para eliminar essas cargas é realizada a limpeza da cobertura do cabo com uma escova metálica aterrada (GOMES, 2015). Quando ocorre a disrupção dielétrica, tem-se como resultado a perfuração da cobertura isolante do cabo, o que faz o material perder suas propriedades dielétricas originais (SOUZA *et al.*, 2018). Dessa forma, a cada disrupção o cabo deve ser trocado, fato que limita o número de amostras obtidas em laboratório para a caracterização da suportabilidade de estruturas da rede de distribuição compacta (LIMA *et al.*, 2017a).

As estruturas básicas da rede de distribuição compacta monofásica com classe de tensão de 15 kV que foram testadas em laboratório são a CM1, CM2 e CM3, apresentadas na Figura 1. A estrutura CM1 opera com ângulos inferiores a 6°, a estrutura CM2 opera com ângulos de até 60° e a estrutura CM3 é utilizada em finais de linhas (ABNT, 2011). Nas redes compactas monofásicas, o condutor fase é coberto por uma camada de XLPE, sendo sustentado por espaçadores poliméricos ancorados em um cabo mensageiro de aço nu (LIMA *et al.*, 2017a). Outros materiais poliméricos também têm sido utilizados na cobertura do condutor fase, como o HDPE (polietileno de alta densidade), mas o XLPE é ainda o principal isolante utilizado com essa finalidade (SOUZA *et al.*, 2019).

Nos ensaios realizados no Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (LRC – *Lightning Research Center*),

localizado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), foram utilizados cabos com seção reta de 50 mm<sup>2</sup> e cobertura isolante de XLPE com espessura de 3 mm. Para eliminar o efeito de descargas superficiais que ocorrem ao longo da cobertura isolante (SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2018), foram utilizados cabos cobertos de 5 m de comprimento, para as estruturas CM1 e CM2, dispostos simetricamente em relação à estrutura, e cabos de 2,5 m de comprimento para a estrutura CM3 (LIMA *et al.*, 2017a). Para as estruturas CM1 e CM2, foram obtidas dez amostras, ao passo que para a estrutura CM3 foram obtidas cinco amostras. A quantidade menor de amostras obtidas para a estrutura CM3 se deve ao comportamento dielétrico distinto apresentado por essa estrutura, que é fortemente influenciado pela técnica de isolamento empregada na terminação do cabo nos ensaios realizados em laboratório. Essa técnica, que reproduz a prática adotada pela CEMIG D., consiste em isolar a ponta do cabo com fitas de autofusão e isolante (LIMA *et al.*, 2017a). Enquanto os resultados de tensão disruptiva obtidos para as estruturas CM1 e CM2 se mostraram dispersos em uma ampla faixa de valores, a fragilidade da camada dielétrica utilizada na terminação do cabo fez com que os resultados obtidos para a estrutura CM3 apresentassem menor dispersão.

### 3. Metodos estatísticos para análise dos dados

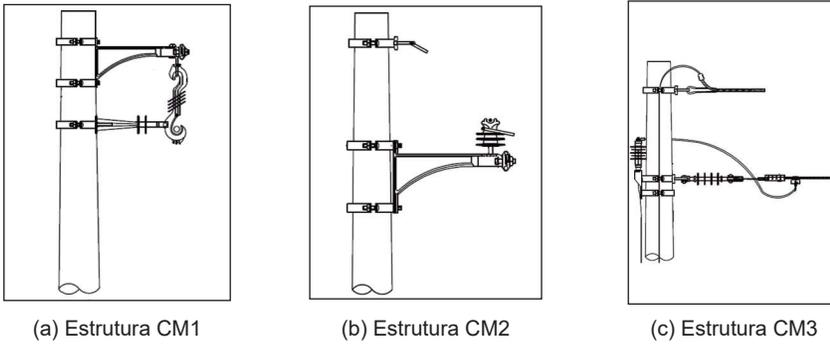
Nesta seção são descritos métodos estatísticos para a obtenção de parâmetros de suportabilidade dielétrica de estruturas da rede de distribuição compacta frente a descargas atmosféricas. Em sequência, o escopo de aplicação dos métodos apresentados são analisados em um estudo de caso numérico.

#### 3.1 Metodologias investigadas

Após o levantamento dos dados em laboratório, que podem indicar níveis de suportabilidade dielétrica tanto para meios autorrecuperantes quanto para meios não autorrecuperantes, o passo seguinte é avaliar os dados obtidos de forma consistente. Os trabalhos que estudam o comportamento dielétrico das estruturas de redes de distribuição compactas realizam suas análises avaliando a média dos valores de tensão que levam à ocorrência de uma perfuração no cabo (LIMA, 2015; GOMES, 2015; LIMA *et al.*, 2017a, SOUZA *et al.*, 2016, SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019). Entretanto, a tensão disruptiva média não é capaz de indicar o nível de sobretensão atmosférica a que a rede poderia ser submetida sem risco significativo de sofrer ruptura dielétrica ou, por outro lado, o nível de tensão que possivelmente a levaria a uma ruptura. Assim, mais relevantes que o valor médio da tensão disruptiva são os níveis de sobretensão em que se espera a ocorrência de

disrupções dielétricas com 10% ou 90% de probabilidade. Dessa forma, é desejável determinar parâmetros para meios não autorrecuperantes que sejam equivalentes aos já consolidados para meios dielétricos autorrecuperantes. Uma das contribuições deste capítulo é descrever uma formulação geral que seja válida para a análise de dados em ambas as situações e que seja de fácil aplicação por técnicos em laboratórios de alta tensão.

**Figura 1 – Estruturas básicas da rede de distribuição compacta**



Fonte: ABNT (2011).

Para iniciar a análise estatística, pode-se considerar que os dados obtidos em laboratório são oriundos de uma variável aleatória  $X$  que descreve a ocorrência de uma disrupção no meio dielétrico. Conhecer todos os valores que a variável  $X$  pode assumir não é plausível. O que se tem é o acesso a alguns dos valores que  $X$  pode assumir. Estes valores acessíveis constituem o espaço amostral da variável aleatória. Uma maneira de descrever o comportamento da variável aleatória  $X$  e assim fazer inferências sobre a população que  $X$  descreve, é obter o intervalo de tolerância que captura uma dada parcela da população. Assim, pode-se afirmar de forma consistente dentro de qual faixa de valores existe a maior probabilidade de ocorrência de uma disrupção no meio dielétrico.

Um intervalo de tolerância é descrito genericamente pela equação (1). Essa equação diz que, dada uma variável aleatória  $X$  com uma função densidade de probabilidade  $P_x$ , é possível obter um intervalo  $[L, U]$  que captura uma porcentagem  $h$  da população com um nível de confiança no resultado igual a  $1 - \alpha$  (WALD; WOLFOWITZ, 1946).

$$P\left[P_x(L \leq X \leq U)h\right] = 1 - \alpha \quad (1)$$

A definição matemática da equação (1) pode ter vários desdobramentos dependendo da aplicação (HOWE, 1969; HOFFMAN, 2010; DE GRYZE *et al.*, 2007; RUCKER, 2014). Ao utilizar variáveis aleatórias, várias podem ser as funções densidade de probabilidade que descrevem o seu comportamento. A escolha da função  $P_x$  impacta na largura do intervalo de tolerância  $[L, U]$ . Por um lado, escolher a função densidade de probabilidade normal conduz a limites mais estreitos para o intervalo de tolerância. Por outro lado, escolher uma função não paramétrica produz limites mais largos, devido à maior incerteza acerca da função  $P_x$ . Assim, buscando resultados mais restritivos, parte-se do pressuposto de que a variável aleatória advém de uma distribuição normal e, posteriormente, verifica-se se essa premissa de normalidade é válida para os dados amostrais obtidos em laboratório.

Considerando que a função densidade de probabilidade dos dados é normal, verifica-se a partir da equação (1) que o nível de confiança esperado para os resultados também afeta os limites  $[L, U]$ . Em ensaios de alta tensão, usados para o levantamento de parâmetros de suportabilidade dielétrica, o valor comumente utilizado para o nível de confiança é de 95%, o que implica um nível de significância dos resultados de 5% (ABNT, 2013; IEEE, 2013). Este nível de confiança é utilizado como referência nos resultados apresentados neste capítulo.

Por fim, para determinação dos limites  $[L, U]$  duas abordagens são possíveis: (i) considerar um dos limites infinito, chamada de abordagem unilateral (*one-sided*) (HOFFMAN, 2010); ou (ii) considerar os dois limites com valores numéricos finitos, chamada de abordagem bilateral (*two-sided*) (HOWE, 1969). A abordagem unilateral deve ser utilizada quando se tem interesse em um dos limites,  $L$  ou  $U$ , enquanto a abordagem bilateral deve ser utilizada quando os dois limites são requeridos simultaneamente. Levando-se em conta a situação problema, ou seja, determinar os níveis de sobretensão em que ocorrem 10% e 90% das disrupções dielétricas, o valor de  $h$  deve ser 0,9 e 0,8 quando se usa a abordagem unilateral e a abordagem bilateral, respectivamente.

Apresentadas as premissas e as definições anteriores, é possível escrever as equações (2) e (3), que realizam o cálculo dos limites inferior,  $L$ , e superior,  $U$ , do intervalo de tolerância (WALD e WOLFOWITZ, 1946). Nessas equações,  $\hat{\mu}$  é a média amostral,  $\hat{\sigma}$  é o desvio padrão amostral e  $\lambda$  é o fator de tolerância.

$$L = \hat{\mu} - \lambda \hat{\sigma} \quad (2)$$

$$U = \hat{\mu} + \lambda \hat{\sigma} \quad (3)$$

Para meios autorrecuperantes, a norma ABNT NBR IEC 60060-1 (2013, p. 5) nomeia o limite inferior,  $L$ , como tensão estatística suportável,  $U_{10}$ , enquanto o limite superior,  $U$ , é denominado tensão disruptiva assegurada,  $U_{90}$ . O valor médio recebe o nome padronizado de tensão de descarga disruptiva a 50%,  $U_{50}$ .

A média amostral e o desvio padrão amostral são determinados através das equações (4) e (5), respectivamente, onde  $N$  é o número de amostras obtidas em laboratório e  $U_i$  é a amplitude do valor da tensão disruptiva medida (ABNT, 2013, p. 4).

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N U_i^2 - \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N U_i \right)^2} \quad (4)$$

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (5)$$

Os resultados obtidos para a média amostral e para o desvio padrão amostral podem ser utilizados tanto em análises em meios dielétricos autorrecuperantes (ABNT, 2013; IEEE, 2013) quanto em análises feitas em meios dielétricos não autorrecuperantes (LIMA, 2015; LIMA *et al.*, 2017a, SOUZA *et al.*, 2016, SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019). Entretanto, a determinação do fator de tolerância requer maior atenção. As normas, como a ABNT NBR IEC 60060-1 (2013), usam o fator de tolerância constante e igual a 1,3 para a avaliação de meios autorrecuperantes. A utilização deste valor para o fator de tolerância é válida quando os dados advêm de uma função de densidade de probabilidade normal, o que é assegurado para grandes tamanhos amostrais,  $N$ , e pequenos desvios padrão percentuais. Essas duas hipóteses são válidas para meios autorrecuperantes e a aplicação deste fator de tolerância conduz a erros pequenos (LIMA *et al.*, 2017b). Entretanto, essas hipóteses não são razoáveis para a avaliação da suportabilidade dielétrica das estruturas da rede de distribuição compacta com cabos cobertos, posto que nesta situação os dados têm desvios padrão maiores e tamanho amostral reduzido (LIMA *et al.*, 2017a).

Para pequenos tamanhos amostrais, o fator de tolerância pode ser calculado através da abordagem unilateral, equação (6), e da abordagem bilateral, equação (7) (HOFFMAN, 2010; HOWE, 1969). Nessas equações,  $t_{\gamma, N-1, \delta}$  é a distribuição de probabilidade  $t$  não centralizada, com  $N - 1$  graus de liberdade,  $\gamma$  é o percentil do intervalo de tolerância e  $\delta$  é o parâmetro de não centralidade. O parâmetro  $\delta$  é definido como  $\Phi^{-1}(P)/\sqrt{N}$ , e  $\Phi^{-1}(P)$  é a função cumulativa inversa de densidade de probabilidade normal com probabilidade  $P$ . O termo  $\chi_{1-\alpha/2}^2$  é a função densidade de probabilidade Qui-quadrado com  $N - 1$  graus de liberdade e nível de significância  $\alpha$ .

$$\lambda = \frac{t_{\gamma, N-1, \delta}}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{N}}{\chi_{1-\alpha/2, N-1}^2} \Phi^{-1}(P) \left[ 1 + \frac{N-3 - \chi_{1-\alpha/2, N-1}^2}{2(N+1)^2} \right]} \quad (7)$$

O fator de tolerância obtido através da equação (6) é válido para qualquer valor de  $N$  (HOFFMAN, 2010), ao passo que o fator de tolerância dado pela equação (7) é válido somente para tamanhos amostrais reduzidos (HOWE, 1969). Nessas duas equações, os valores percentuais do desvio padrão amostral não são fatores limitantes para a sua aplicabilidade. O que limita sua aplicabilidade são as premissas assumidas de que a função densidade de probabilidade que descreve o comportamento dos dados é normal e que as amostras são independentes. Dessa forma, garantir a normalidade e a independência dos dados é essencial para as análises desenvolvidas através de intervalos de tolerância, que são obtidos através do fator de tolerância determinado a partir das equações (6) e (7).

Para ensaios envolvendo meios autorrecuperantes, não se levantam dúvidas sobre a normalidade e a independência dos dados amostrais (ABNT, 2013; IEEE, 2013). Entretanto, para ensaios com meios não autorrecuperantes envolvendo cabos cobertos, tanto a normalidade dos dados quanto a independência estatística dos dados são questionáveis. Em primeiro lugar, deve-se questionar a normalidade dos dados devido ao pequeno tamanho amostral disponível a partir de ensaios destrutivos. Nesta situação, não é atendida a lei dos grandes números e a normalidade não é intuitiva (STEVEN, 2006). Por sua vez, a independência estatística dos dados também deve ser colocada em xeque devido às características de ensaio, ou seja, a indução de cargas estáticas na cobertura isolante após a aplicação de cada impulso.

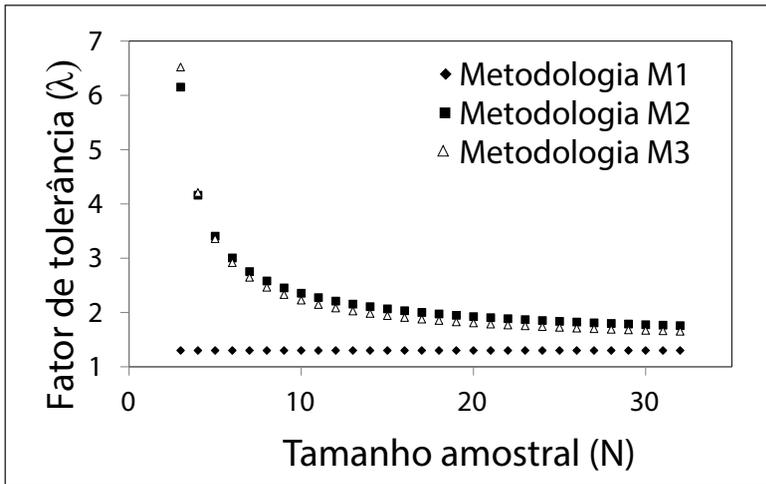
Para garantir a validade das inferências realizadas, antes de utilizar os fatores de tolerância apresentados, testes de hipótese foram aplicados nos dados amostrais. Nestes testes de hipótese é avaliado se os dados podem ser considerados normais e independentes dentro de um nível de confiança. Todos os resultados apresentados neste capítulo passaram por testes de hipótese e não apresentaram evidências para rejeitar as hipóteses de normalidade e independência dos dados dentro do nível de confiança de 95%. Mais detalhes sobre testes de hipóteses para verificação de normalidade e independência de dados amostrais podem ser encontrados em (SHAPIRO; WILK, 1965) e em (DURBIN; WATSON, 1950). Antes de aplicar as metodologias no estudo da suportabilidade dielétrica de estruturas monofásicas da rede de distribuição

compacta frente a sobretensões atmosféricas, desenvolveu-se um estudo de caso numérico para se realizar uma análise de sensibilidade sobre a aplicação dos métodos estatísticos analisados.

### 3.2 Estudo de caso numérico

Para aliviar a notação, a partir deste momento, as formas de cálculo do intervalo de tolerância propostas pela norma ABNT NBR IEC 60060-1 (2013), pela abordagem unilateral (HOFFMAN, 2010) e pela abordagem bilateral (HOWE, 1969) são referenciadas como metodologias M1, M2 e M3, respectivamente. Como o único termo que não é comum nas três metodologias é o fator de tolerância, este merecerá maior destaque nesta seção. A Figura 2 apresenta o comportamento de  $\lambda$  em função do crescimento do tamanho amostral. Percebe-se que à medida que o tamanho amostral aumenta, as três metodologias convergem para o mesmo valor, ou seja, aproximadamente 1,3. Entretanto, para tamanhos amostrais pequenos, a diferença entre a metodologia M1 e as metodologias M2 e M3 é significativa.

**Figura 2 – Fator de tolerância em função do tamanho amostral para as metodologias avaliadas**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para investigar e quantificar as diferenças conceituais entre as metodologias M2 e M3 foi desenvolvida a seguinte rotina computacional baseada em procedimentos análogos aos propostos em (STEVEN, 2006). O procedimento é o seguinte: (i) gera-se uma população com 10 milhões de pontos oriundos de uma função densidade de probabilidade normal padrão, ou seja, com média

zero e desvio padrão unitário; (ii) retiram-se  $N$  amostras da população de forma aleatória e em seguida se calcula a média amostral e o desvio padrão amostral; (iii) utilizando-se as metodologias M1, M2 e M3 se obtêm os limites do intervalo de tolerância  $[L, U]$  com um nível de confiança de 95%; (iv) a partir dos intervalos de tolerância gerados, dois testes independentes são realizados: o primeiro é verificar se o intervalo de tolerância gerado captura ao menos 80% da população e o segundo é verificar se o limite inferior captura 10% da população ou menos; em caso afirmativo, é computado um acerto para o teste que teve sucesso; (v) repetem-se os passos (i) a (iv) cem mil vezes para cada tamanho amostral. Ao final deste procedimento, somam-se todos os acertos em um dado teste e divide-se o resultado pelo número de repetições. Assim, é possível verificar o nível de confiança nos limites de tolerância para cada metodologia. Quanto mais próximo estiver o nível de confiança calculado do nível de confiança especificado (95%), mais confiável é a metodologia.

Na Tabela 1 são apresentados os níveis de confiança que se tem do intervalo de tolerância  $[L, U]$  capturar 80% da população. Neste tipo de investigação, lida-se com a abordagem bilateral, ou seja, os dois limites são de interesse simultâneo. Conforme indica a Tabela 1, a metodologia M3 é a única que apresenta o nível de confiança calculado igual ao nível de confiança especificado de 95% para pequenos tamanhos amostrais onde a formulação é válida. Por outro lado, a metodologia M1 tem nível de confiança muito menor que o requerido e a metodologia M2 tem nível de confiança maior que o necessário, isto para pequenos tamanhos amostrais, que é o caso de interesse.

A Tabela 2 avalia o nível de confiança que se tem do limite inferior do intervalo de tolerância ser capaz de capturar 10% ou menos da população. Esta é a abordagem unilateral, onde só um dos limites é requerido nas análises. Verifica-se que a metodologia M2 é a única que apresenta o nível requerido de 95%. Por outro lado, a metodologia M3 tem nível de confiança levemente menor que o requerido e a metodologia M1, um nível de confiança significativamente menor que o estipulado.

**Tabela 1 – Nível de confiança estimado para o intervalo  $[L, U]$  capturar 80% da população**

Tamanho amostral	Metodologia M1 (%)	Metodologia M2 (%)	Metodologia M3 (%)
10	39,0	96,5	95,0
15	42,0	97,1	95,0
20	43,4	97,5	95,0
100	53,2	98,6	95,0
1000	72,1	99,1	95,1
5000	90,4	99,1	95,2
10000	97,5	99,1	95,5

Fonte: Elaborada pelos autores.

Esses primeiros resultados numéricos trazem um peso significativo na escolha da metodologia a ser usada nas análises dos resultados deste capítulo. Lembrando que se deseja determinar o nível de sobretensão impulsiva à qual a rede de distribuição pode ser submetida e que leve a menos de 10% de desligamento no fornecimento de energia, a metodologia M2 se mostra mais representativa. Isto ocorre porque, após escolher o nível de confiança requerido, deseja-se somente um dos limites do intervalo de tolerância.

**Tabela 2 – Nível de confiança estimado para o intervalo  $[-\infty, L]$  capturar 10% ou menos da população**

Tamanho amostral	Metodologia M1 (%)	Metodologia M2 (%)	Metodologia M3 (%)
10	47,9	95,0	93,2
15	49,1	95,0	92,2
20	50,8	95,1	91,6
100	54,3	95,0	88,9
1000	66,1	95,0	87,2
5000	82,9	94,9	86,6
10000	91,3	95,0	86,8

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com o auxílio da Tabela 1 e da Tabela 2, é possível verificar que os resultados obtidos através da metodologia M1 não têm o nível de confiança requerido para conjuntos menores que 100 amostras. Entretanto, como mostrado em (LIMA *et al.*, 2017b), a utilização da metodologia M1 não leva a resultados que são significativamente diferentes das metodologias mais rigorosas quando se tem mais que 20 amostras e pequenos desvios padrão percentuais. Para o levantamento de parâmetros envolvendo redes compactas, não se deve utilizar a metodologia M1, pois o tamanho amostral é reduzido e o desvio padrão, grande. Assim, para facilitar a aplicação das metodologias M2 e M3 em práticas e ensaios de engenharia de alta tensão, apresenta-se para consulta a Tabela 3.

#### 4. Resultados e análises

As redes convencionais são um padrão construtivo que vem sendo utilizado por concessionárias brasileiras em redes de distribuição de média tensão há muitas décadas. Assim, seus parâmetros de suportabilidade dielétrica são amplamente conhecidos. A tensão suportável estatística,  $U_{10}$ , das redes convencionais, com nível de isolamento de 15 kV, é de 110 kV. Esta informação serve de base para a estimativa do número de desligamentos causados por descargas atmosféricas em redes de distribuição ao longo de um ano (DE CONTI *et al.*, 2010). Dessa forma, de forma simplificada, para as redes

convencionais, é possível estimar o valor de sobretensão atmosférica que é capaz de levar a rede elétrica a um desligamento e, além disso, quantas vezes isso acontece em média por ano.

**Tabela 3 – Valores sugeridos para o fator de tolerância,  $\lambda$**

Tamanho amostral	$\lambda$ , unilateral Metodologia M2	$\lambda$ , bilateral Metodologia M3	Tamanho amostral	$\lambda$ , unilateral Metodologia M2	$\lambda$ , bilateral Metodologia M3
03	6,155	6,524	17	2,002	1,878
04	4,162	4,211	18	1,974	1,852
05	3,407	3,360	19	1,949	1,828
06	3,006	2,919	20	1,926	1,807
07	2,755	2,648	21	1,905	1,787
08	2,582	2,464	22	1,886	1,770
09	2,454	2,330	23	1,869	1,754
10	2,355	2,228	24	1,853	1,739
11	2,275	2,147	25	1,838	1,726
12	2,210	2,082	26	1,824	1,713
13	2,155	2,028	27	1,811	1,702
14	2,109	1,982	28	1,799	1,691
15	2,068	1,942	29	1,788	1,681
16	2,033	1,908	30	1,777	1,671

Fonte: Elaborada pelos autores.

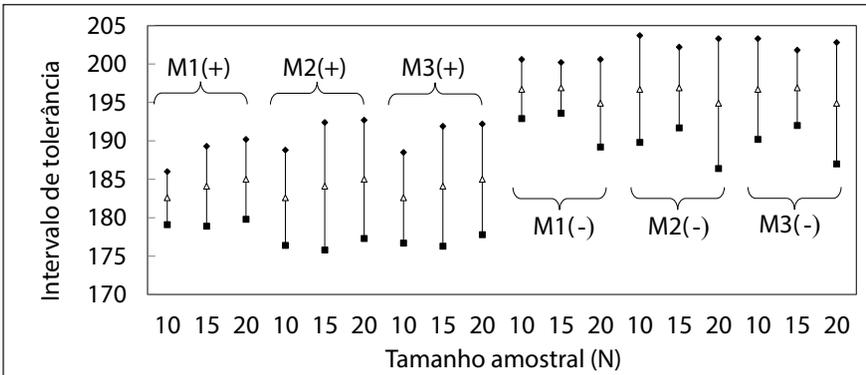
Por outro lado, a rede de distribuição compacta é um padrão construtivo de emprego relativamente recente. Por essa razão, o conhecimento de seu nível de isolamento ainda não está completamente consolidado, a despeito de desenvolvimentos recentes realizados no Brasil (GOMES, 2015; LIMA, 2015; LIMA *et al.*, 2017a, SOUZA *et al.*, 2016, SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019). Como mostrado em (LIMA *et al.*, 2017a), a suportabilidade dielétrica das estruturas da rede compacta depende fortemente da existência de uma perfuração pré-existente no cabo. Caso o cabo tenha alguma perfuração na sua cobertura isolante, a suportabilidade dielétrica da rede de distribuição diminui de tal forma que a suportabilidade pode ser tão baixa quanto aquela de uma estrutura utilizando cabos nus. Na seção 4.1 são apresentados os resultados para o caso extremo onde o cabo coberto perdeu sua cobertura isolante, caso que é representado nos ensaios com a utilização de um cabo nu. Na seção 4.2 são apresentados os resultados para a situação ideal de operação da rede, ou seja, cabos cobertos com cobertura isolante íntegra.

#### 4.1 Resultados para cabos nus

Existem duas vantagens em se obter resultados com cabos nus para as estruturas da rede de distribuição compacta. Primeiro, obtém-se com isso uma

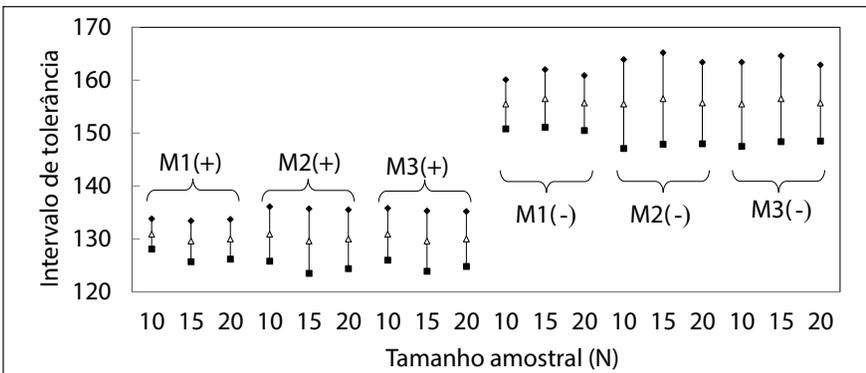
representação do caso crítico de operação da rede. Segundo, porque nesta situação os ensaios são autorrecuperantes e não se tem limitação do tamanho amostral. Os resultados obtidos para as estruturas CM1, CM2 e CM3, considerando cabos nus, são apresentados nas Figuras 3 a 5. Nessas figuras, se obtêm os intervalos de tolerância considerando diferentes tamanhos amostrais, metodologias e polaridade da tensão impulsiva aplicada. É possível verificar com clareza que os intervalos de tolerância gerados pela metodologia M2 são os mais largos, seguidos pelos intervalos obtidos com a metodologia M3 e, por fim, pela metodologia M1.

**Figura 3 – Intervalos de tolerância (em kV) obtidos para a estrutura CM1 usando cabos nus. O limite inferior corresponde a  $U_{10}$ , o limite superior, a  $U_{90}$ , e o valor interno, a  $U_{50}$**



Fonte: Elaborada pelos autores.

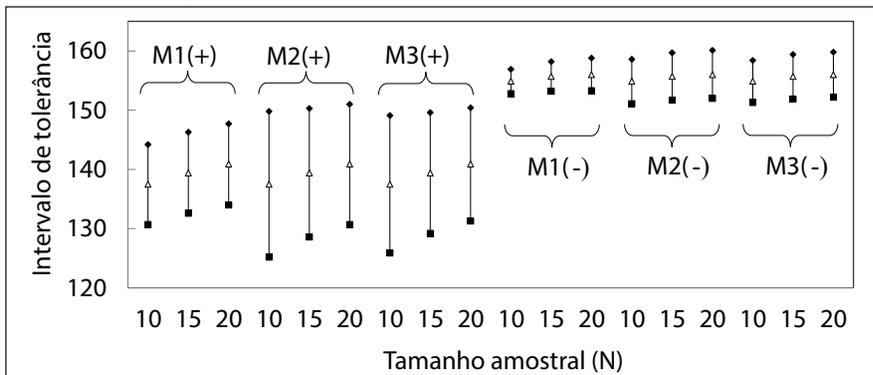
**Figura 4 – Intervalos de tolerância (em kV) obtidos para a estrutura CM2 usando cabos nus. O limite inferior corresponde a  $U_{10}$ , o limite superior, a  $U_{90}$ , e o valor interno, a  $U_{50}$**



Fonte: Elaborada pelos autores.

Retornando à Figura 2, nota-se que o comportamento esperado para o intervalo de tolerância é seu estreitamento com o aumento do tamanho amostral. Esse estreitamento acontece quando a média e o desvio padrão permanecem constantes com o crescimento do tamanho amostral. Essa constância não é observada e nem esperada devido às características de ensaio e à natureza aleatória das variáveis. Percebe-se que, para tamanhos amostrais reduzidos, os resultados são mais conservadores na determinação de  $U_{10}$  e  $U_{90}$  que para tamanhos amostrais maiores. Assim, considerar um grande número de amostras leva a resultados mais precisos que considerar tamanhos amostrais pequenos. Entretanto, os resultados para tamanhos amostrais menores trazem indicativos conservadores do comportamento real de  $U_{10}$  e de  $U_{90}$ , dentro do nível de confiança determinado para os resultados.

**Figura 5 – Intervalos de tolerância (em kV) obtidos para a estrutura CM3 usando cabos nus. O limite inferior corresponde a  $U_{10}$ , o limite superior, a  $U_{90}$ , e o valor interno, a  $U_{50}$**



Fonte: Elaborada pelos autores.

A avaliação das Figuras 3 a 5 mostra que quando o meio isolante considerado é o ar, a suportabilidade dielétrica é menor quando aplicadas tensões impulsivas de polaridade positiva, ao passo que a suportabilidade é maior quando aplicadas tensões impulsivas de polaridade negativa. Esse resultado é esperado e consagrado na literatura (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 468). Isso indica que avaliar a suportabilidade dielétrica de redes de distribuição com cabos nus frente a sobretensões impulsivas de polaridade positiva é a situação mais conservadora e relevante (KUFFEL *et al.*, 2000, p. 468).

O menor nível de suportabilidade dielétrica observado foi de 124,4 kV para a estrutura CM2, considerando polaridade positiva e 20 amostras. Esse resultado fornece um indicativo muito importante. Tensões induzidas por descargas atmosféricas que tenham intensidade inferior a 124,4 kV têm

probabilidade menor que 10% de provocar uma falha de isolamento na rede testada caso sua forma de onda seja semelhante àquela considerada em ensaio. Isso mostra que as estruturas da rede de distribuição compacta têm suportabilidade dielétrica frente a sobretensões atmosféricas maiores que o requerido para redes com classe de isolamento de 15 kV, que é 110 kV. Além da dependência do valor de pico da sobretensão atmosférica, os tempos de frente e de meia onda também influenciam na suportabilidade dielétrica do meio isolante (DE CONTI *et al.*, 2010). Vale observar que os níveis de suportabilidade obtidos em laboratório, para uma tensão impulsiva padronizada com tempo de frente de 1,2  $\mu$ s e tempo de meia onda de 50  $\mu$ s, representam uma situação mais conservadora que os níveis de suportabilidade da rede quando submetida à maioria das solicitações atmosféricas em campo (DE CONTI *et al.*, 2010). Isso é devido ao fato de que sobretensões atmosféricas induzidas têm tempos de frente e de meia onda menores que a tensão impulsiva padronizada, causando um estresse menor na estrutura isolante.

Nota-se pela análise das Figuras 3 a 5 que os resultados produzidos pelas metodologias M2 e M3 são próximos em todos os casos avaliados. A maior diferença observada entre elas é menor que 0,5%. Entretanto, comparando as metodologias M2 e M1 essa diferença aumenta para valores da ordem de 4%. Como o nível de significância dos resultados é de 5%, pode-se inferir que as três metodologias produzem resultados similares, ou seja, dentro da significância esperada para ensaios como meios autorrecuperantes.

## 4.2 Resultados para cabos cobertos

A partir dos ensaios com cabos cobertos, foram obtidas dez amostras de tensão disruptiva para a estrutura CM1 e CM2, e cinco amostras deste parâmetro para estrutura CM3. Com estes resultados, é possível obter a Tabela 4, que apresenta os valores médios para a tensão disruptiva, denominado de  $U_{B50}$  (LIMA *et al.*, 2017a). Verifica-se que a estrutura CM3 apresenta o menor valor médio, mas como essa estrutura é utilizada em finais de linha, em conjunto com um para-raios que atua para níveis de sobretensão menores que o valor indicado, ela não é um ponto crítico da rede para análises de disrupções (LIMA *et al.*, 2017a). Assim, é dado foco nas estruturas CM1 e CM2, não se avaliando a estrutura CM3.

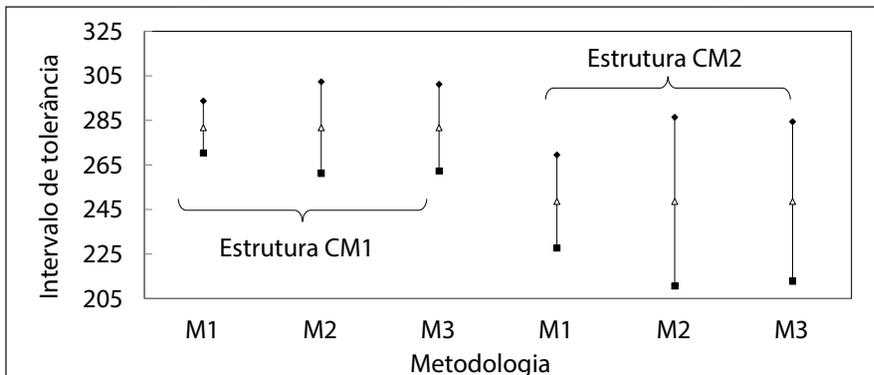
**Tabela 4 – Tensão disruptiva média**

Estrutura	CM1	CM2	CM3
$U_{B50}$ (kV)	281,7	248,6	197,3

Fonte: Lima *et al.* (2017a).

Conforme discutido, para avaliar a suportabilidade da rede frente a descargas atmosféricas é mais representativo utilizar o parâmetro que indica a probabilidade de 10% de ocorrer uma disrupção, denominado  $U_{B10}$ , que o valor médio disruptivo  $U_{B50}$ . Os resultados obtidos considerando a aplicação das metodologias M1, M2 e M3 para o caso de cabos cobertos considerando as estruturas CM1 e CM2 são sintetizados na Figura 6. Nota-se que foram considerados apenas impulsos padronizados de polaridade positiva. Isso é razoável, visto que a maioria das sobretensões geradas por descargas atmosféricas em redes de distribuição tem polaridade positiva (DE CONTI *et al.*, 2010). Na Figura 6 também é apresentado o parâmetro que indica a probabilidade de 90% de ocorrer uma disrupção no meio dielétrico, denominado  $U_{B90}$ .

**Figura 6 – Intervalos de tolerância obtidos para as estruturas CM1 e CM2 usando cabos cobertos. O limite inferior corresponde a  $U_{B10}$ , o limite superior a  $U_{B90}$  e o valor interno a  $U_{B50}$**



Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise da Figura 6 mostra que a maior diferença observada entre as metodologias é de 17 kV. Isso indica que a escolha inadequada da metodologia de análise de dados estatísticos pode influenciar na determinação de  $U_{B10}$  e  $U_{B90}$  quando se avaliam dados obtidos através de ensaios não autorrecuperantes. Como o desvio padrão amostral é de 8,7 kV e 16,1 kV para as estruturas CM1 e CM2, respectivamente, percebe-se que a diferença entre as metodologias é maior que o desvio padrão amostral. Escolhendo a metodologia M2 como referência, verifica-se que  $U_{B10}$  assume o valor de 261,2 kV e 210,7 kV para estruturas CM1 e CM2, respectivamente. Ao se realizar um comparativo entre os valores de  $U_{B10}$  e os valores de  $U_{10}$  associados às mesmas estruturas, nota-se que ocorreu um ganho de suportabilidade dielétrica com a adoção de cabos com cobertura isolante de XLPE de 47,3% e 69,4% para as estruturas CM1 e CM2, respectivamente.

Pode-se afirmar que, em vãos da rede de distribuição compacta compostos por estruturas CM1 e CM2, sobretensões de origem atmosférica que tenham intensidade de até 210 kV levam a rede compacta ao desligamento em menos de 10% das ocorrências caso as formas de onda resultantes possuam formas de onda semelhantes àquelas consideradas nos ensaios em laboratório. A tendência é que este nível de suportabilidade seja ainda maior para sobretensões com menores tempos de frente e de meia onda que a tensão impulsiva padronizada utilizada nos ensaios para a determinação de  $U_{B10}$  (DE CONTI *et al.*, 2010). Isso indica que a utilização de redes compactas com cabos cobertos é favorável à manutenção do fornecimento de energia elétrica, ao menos em comparação com as redes monofásicas convencionais e redes monofásicas compactas com cabos nus.

## 5. Considerações finais

Neste capítulo, foram avaliadas metodologias estatísticas para a análise de dados experimentais contendo pequenos tamanhos amostrais. Estas metodologias são baseadas no estudo de intervalos de tolerância. Foram realizadas discussões sobre a aplicação das abordagens unilateral e bilateral. Assim, foi possível realizar a escolha do melhor método estatístico aplicado no contexto deste capítulo, ou seja, para estimar a suportabilidade dielétrica de estruturas monofásicas da rede de distribuição compacta frente a sobretensões de origem atmosférica.

Na ocorrência de um desligamento na rede de distribuição, o fornecimento de energia elétrica ao consumidor final é interrompido. Esta é, portanto, uma situação crítica à qual estão sujeitas as redes de distribuição de energia. Verificou-se ao longo deste capítulo que impulsos atmosféricos padronizados de polaridade positiva de 110 kV, 124 kV e 210 kV têm probabilidade menor que 10% de causar falhas de isolamento em redes de distribuição convencionais, em redes compactas com cabos nus e em redes compactas com cabos cobertos, respectivamente. Concluiu-se que os dois últimos valores são mais rigorosos e representativos para se avaliar a ocorrência de interrupções em redes de distribuição compactas monofásicas com classe de tensão de 15 kV do que os valores disruptivos médios obtidos em estudos anteriores presentes na literatura.

## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “Redes de Distribuição Aéreas de Energia Elétrica com Cabos Cobertos Fixados em Espaçadores para Tensões até. 36,2 kV”. **ABNT NBR 15992**, Rio de Janeiro, 2011.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Parte 1: Definições Gerais e Requisitos de Ensaio”. **ABNT NBR IEC 60060-1**, Rio de Janeiro, 2013.

DE CONTI, A.; PEREZ, E.; SOTO, E.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; TORRES, H. “Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 3078-3084, out. 2010.

DE GRYZE, S.; LANGHANS, I.; VANDEBROEK, M. “Using the Correct Intervals for Prediction: A Tutorial on Tolerance Intervals for Ordinary Least-Squares Regression”. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 87, n. 2, p. 147-154, 2007.

DURBIN, J., WATSON, G. S. “Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression: I”. **Biometrika**, v. 37, n. 3-4, p. 409-428, 1950.

GOMES, R. M., “Estudo do Comportamento de Cabos com Cobertura Isolante de Redes de Distribuição Compactas Frente a Sobretensões Impulsivas Padronizadas”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2015.

HAUSCHILD, W.; MOSCH, W. “Statistical Techniques for High-Voltage Engineering”. **IEE Power Engineering Series**, 1992.

HE, J., GU, S.; CHEN, S.; ZENG, R.; CHEN, W. “Discussion on measures against lightning breakage of covered conductors on distribution lines”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 2, p. 693-702, 2008.

HOFFMAN, D. “One-Sided Tolerance Limits for Balanced and Unbalanced Random Effects Models”. **Technometrics**, v. 52, n. 3, p. 303-312, 2010.

HOWE, W. G. “Two-Sided Tolerance Limits for Normal Populations some Improvements”. **J. American Statistical Association**, v. 64, n. 326, p. 610-620, 1969.

IEEE, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, Std 4-2013, “**IEEE Standard for high-voltage testing techniques**”. 2013.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. “**High Voltage Engineering Fundamentals**”. Segunda edição. Butterworth-Heinemann, 2000.

LEE, R. E.; FRITZ, D. E.; STILLER, P. H.; SHANKLE, D. F. “Prevention of Covered Conductor Burndown on Distribution Circuits – Arcing Protection Devices”. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 101, n. 8, p. 2434-2438, 1982.

LIMA, G. S. “**Avaliação da Suportabilidade de Estruturas Monofásicas de Redes de Distribuição Aéreas Compactas frente a Impulsos Atmosféricos Padronizados**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

LIMA, G. S.; GOMES, R. M.; FILHO, R. E. S.; DE CONTI, A.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; SOUZA, W. A. “**Impulse Withstand Voltage of Single-Phase Compact Distribution Line Structures Considering Bare and XLPE-covered Cables**”. **Electric Power Systems Research**, v. 153, p. 88-93, 2017a.

LIMA, G. S.; DE CONTI, A.; SOUZA, R. E.; GOMES, R. M.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. “Test of Statistical Procedures for Determining the Impulse Withstand Voltage of a Three-Phase Compact Line Structure Considering Bare Cables”. **International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)**, Natal, Brazil, 2017b.

NAKAMURA, K.; MC KENNY, P. J. ; HAMAMM, M. S. A. A. ; ADAMS, G. ; FERNANDES, R. ; RUSHDEN, F. “Impulse Breakdown Characteristics of 13.2 kV Covered Conductor Insulator/Tie Configurations”. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 14, p. 250-258, 1986.

RUCKER, A. “Improving Statistical Rigor in Defense Test and Evaluation: Use of Tolerance Intervals in Designed Experiments”. **Defense ARJ**, v. 21, n. 4, p. 804-824, 2014.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. “An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)”. **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.

SOUZA, W. A.; SILVA, F. A. M. ; DIAS, L. F. ; SILVEIRA, F. H. ; VISACRO, S. ; DE CONTI, A. “A Discussion on the Electrical Performance of compact Distribution Overhead Lines”. **International Conference on Grounding and Earthing, Manaus, Brasil, 2014.**

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M. ; LIMA, G. S. ; SILVEIRA, F. H. ; DE CONTI, A. ; VISACRO, S. “A Study on the Impulse Breakdown Behavior of Covered Cables of Compact Distribution Lines”. **International Conference on Grounding and Earthing, Porto de Galinhas, Brasil, 2016.**

SOUZA, R. E.; SILVEIRA, F. H. ; GOMES, R. M. ; LIMA, G. S. ; DE CONTI, A. ; VISACRO, S. “Influence of Cable Insulating Material on the Impulse Withstand Voltage of a Single-Phase Compact Distribution Line Structure”. **International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)**, Natal, Brazil, 2017.

SOUZA, R. E.; GOMES, R. M. ; LIMA, G. S. ; SILVEIRA, F. H. ; DE CONTI, A. ; VISACRO, S. “Analysis of the Impulse Breakdown Behavior of Covered Cables used in Compact Distribution Lines”. **Electric Power Systems Research**, v. 159, p. 24-30, 2018.

SOUZA, R. E.; SILVEIRA, F. H. ; GOMES, R. M. ; LIMA, G. S. ; DE CONTI, A. ; VISACRO, S. “Characterization of the effect of the insulating material of covered cables on the impulse breakdown behavior of single- and three-phase compact distribution lines”. **Electric Power Systems Research**, v. 172, p. 161-166, 2019.

STEVEN, K. “Intuitive Probability and Random Processes Using Matlab”. **Kingston, Springer, 2006.**

VISACRO, S. “**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia**”. São Paulo, SP: Artliber Editora Ltda, 2005.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. “Tolerance Limits for a Normal Distribution, Annals of Mathematical Statistics”. **Annals of Math. Statistics**, v. 17, n. 2, p. 208-215, 1946.