

# INVESTIGAÇÃO SOBRE O NÚMERO DE DESLIGAMENTOS EM REDES COMPACTAS TRIFÁSICAS COM CABOS NUS DEVIDO A TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

GUILHERME S. LIMA<sup>1</sup>    ALBERTO DE CONTI<sup>2</sup>    RAFAEL M. GOMES<sup>2</sup>  
RONALDO E. SOUZA<sup>2</sup>    FERNANDO H. SILVEIRA<sup>2</sup>    SILVÉRIO VISACRO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica – UFMG  
IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais  
Av. Prof. Mário Werneck, 2590, 30.575-180, Belo Horizonte, MG, Brasil  
guilherme.silva@ifmg.edu.br*

<sup>2</sup>*LRC – Lightning Research Center  
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil  
conti@cpdee.ufmg.br, rafaelmaiaagomes@gmail.com, ronaldoesf@gmail.com,  
silveira@cpdee.ufmg.br, lrc@cpdee.ufmg.br*

**Abstract**— This paper is dedicated to determining the number of outages that occur in 100 km of line per year due to nearby lightning strokes considering the basic structures of compact distribution lines with bare cables. Bare cables are considered to account for the critical operating condition in which the insulating layer of the phase conductors of the compact line is assumed to be completely deteriorated. The withstand voltage of the evaluated structures is determined from laboratory tests. By using a simplified calculation model, the expected outage rate is investigated for each tested structure. Besides, an attempt is made to determine the influence of line insulation level and soil resistivity on the estimated number of outages. The obtained results indicate that compact distribution lines are likely to be subjected to a reduced number of outages due to nearby lightning strikes compared to conventional distribution lines.

**Keywords**— Compact lines, lightning-induced voltages, outage rate

**Resumo**— Este trabalho tem como objetivo determinar o número de desligamentos em 100 km de linha por ano devido a tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas, considerando as estruturas básicas da rede de distribuição compacta com cabos nus. A utilização de cabos nus visa descrever a situação crítica de operação em que se supõe que a cobertura isolante dos cabos fase da rede compacta esteja completamente deteriorada. A suportabilidade das estruturas avaliadas é determinada a partir de testes realizados em laboratório. Utilizando um modelo de cálculo simplificado, investiga-se a taxa de desligamentos esperada para cada estrutura testada. Além disso, busca-se determinar a influência do nível de isolamento da linha e da resistividade do solo no número estimado de desligamentos. Os resultados obtidos indicam que redes de distribuição compactas estão sujeitas a um menor número de desligamentos causados por descargas atmosféricas indiretas do que redes de distribuição convencionais.

**Palavras-chave**— Redes compactas, tensões induzidas por descargas atmosféricas, taxa de desligamentos

## 1 Introdução

A melhoria na qualidade do serviço de entrega de energia elétrica a consumidores é desafio constante para concessionárias de energia elétrica. A qualidade na disponibilidade de energia elétrica no ponto de entrega é comumente verificada através de dois indicadores: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Esses indicadores estão relacionados à ocorrência de desligamentos na rede de distribuição.

Uma rede de distribuição é levada a um desligamento não programado devido a descargas atmosféricas, falhas em equipamentos, contato acidental da rede com árvores e falha humana, dentre outras causas (Souza et al., 2014). A principal fonte de desligamentos em redes de distribuição, correspondendo a aproximadamente 30% do total, são eventos relacionados a descargas atmosféricas (Souza et al., 2014). Uma descarga atmosférica pode levar uma rede ao

desligamento devido à sua incidência direta na rede ou devido à tensão induzida por uma incidência nas proximidades da rede (Visacro, 2005). Incidências diretas são mais severas que incidências indiretas, porém incidências indiretas são mais frequentes (De Conti, 2006).

Visando diminuir o número de desligamentos em uma rede de distribuição e consequentemente melhorar os indicadores DEC e FEC, diversas distribuidoras de energia elétrica no Brasil mudaram o padrão de suas redes de distribuição, do padrão convencional para o padrão compacto (Lima, 2015). Essa mudança de padrão construtivo se deveu ao melhor desempenho observado em testes com linhas experimentais construídas no Brasil pelas concessionárias COPEL e CEMIG (Lima, 2015) e verificação da viabilidade econômica da utilização do padrão de rede compacta em substituição ao padrão de rede convencional (Rocha et al., 2002).

A principal diferença entre uma rede de distribuição compacta e uma rede de distribuição conven-

cional está no fato de aquela utilizar cabos fases com cobertura isolante, enquanto esta utiliza cabos fases nus (Lima, 2015). Diversos trabalhos têm estudado o desempenho desse novo padrão de rede. Discussões fundamentais sobre ensaios em laboratório com cabos cobertos e seu comportamento dielétrico podem ser encontradas em (Lee et al., 1982; Nakamura et al., 1986; He et al., 2008). Uma metodologia de ensaios para levantamento de parâmetros de suportabilidade dielétrica frente a sobretensões de origem atmosférica para aplicação em estruturas da rede de distribuição compacta é apresentada em (Lima et al., 2017). Finalmente, uma quantificação da influência do tipo de cobertura isolante na suportabilidade dielétrica de redes de distribuição compacta frente a sobretensões de origem atmosférica é apresentada em (Souza et al., 2017).

Os estudos realizados indicaram que a suportabilidade dielétrica de uma rede de distribuição compacta com cabos cobertos frente a sobretensões de origem atmosférica pode ser tão baixa quanto a suportabilidade de uma rede compacta com cabos nus. Para que isso ocorra é necessário que exista uma perfuração prévia na cobertura isolante do cabo (Lima et al., 2017). Assim, para representar o pior caso para operação de uma rede de distribuição compacta, neste trabalho são apresentados resultados de ensaios em laboratório para obtenção de parâmetros de suportabilidade dielétrica de redes de distribuição trifásicas compactas com cabos nus. Dessa forma, torna-se possível estimar o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas indiretas a que uma rede de distribuição idealizada estaria submetida. Além disso, são apresentadas curvas com estimativas do número de desligamentos causados por descargas atmosféricas indiretas em redes compactas em função da resistividade do solo.

Este trabalho é dividido da seguinte forma. Na seção 2, são descritas as principais estruturas da rede de distribuição trifásica compacta e a metodologia de ensaios empregada. Na seção 3, são apresentados os resultados e análises. A seção 4 contém as conclusões deste trabalho.

## 2 Estruturas e Procedimentos de Ensaios

### 2.1 Estruturas da Rede de Distribuição Trifásica Compacta

Na área de concessão da CEMIG, bem como na área de cobertura das principais concessionárias brasileiras (Lima, 2015), as redes compactas se tornaram o padrão de novos projetos em áreas urbanas, sendo ainda o seu emprego opcional em áreas rurais (CEMIG, 2012). As estruturas da rede compacta trifásica são predominantes em áreas urbanas, ao passo que as estruturas da rede monofásica são mais comuns em áreas rurais. O principal interesse desse trabalho são as redes instaladas em áreas urbanas e, por conseguinte, as estruturas da rede compacta trifásica.

Na figura 1 é apresentada a estrutura CE1, ao passo que a figura 2 apresenta a estrutura CE2. Onde, “CE” significa “compacta em espaçadores” e, no caso monofásico, “CM” significa “compacta monofásica”. O número que segue as duas letras iniciais indica o ângulo de trabalho da estrutura. O número 1 indica ângulos menores que seis graus, o 2 indica ângulos menores que sessenta graus e o 3 indica finais de linha (CEMIG, 2012). Os materiais que compõem a estrutura CE1 são cintas de aço, braço suporte tipo “L”, espaçador losangular polimérico com amarração, cabo mensageiro, braço-antibalanço, estribo, parafusos e arruelas. A estrutura CE2 é composta de cintas de aço, braço suporte tipo “C”, isoladores de pino, anéis de amarração, cabo mensageiro, olhal, parafusos e arruelas. De forma a facilitar a identificação das posições de uma estrutura trifásica, são adotadas as denominações *SE*, para a posição “superior externa”, *SI*, para a posição “superior interna”, e *I*, para a posição “inferior”. Essas denominações estão ilustradas nas figuras 3 e 4.

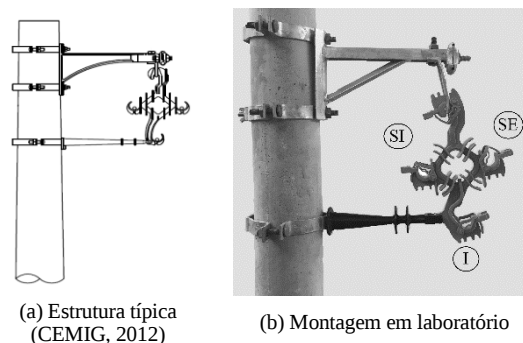


Figura 1. Rede trifásica de distribuição compacta, estrutura CE1

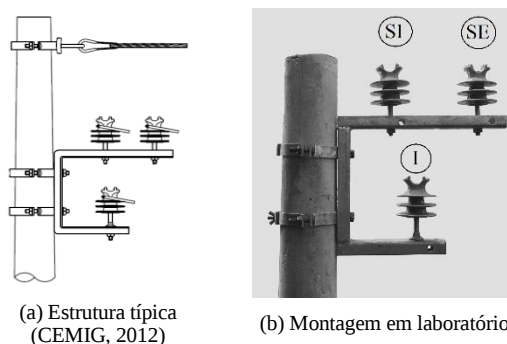


Figura 2. Rede trifásica de distribuição compacta, estrutura CE2

Em (Souza, 2015) se mostra que as estruturas CE1 e CE2 representam mais de 74% de todas as estruturas instaladas em ambientes urbanos pela CEMIG. Tal fato demonstra a importância do conhecimento da suportabilidade dielétrica das estruturas CE1 e CE2 e o quanto este parâmetro é representativo para a determinação do número de desligamentos esperados em 100 km de linha por ano.

### 2.2 Procedimentos de Ensaios

Os parâmetros de suportabilidade dielétrica das estruturas ilustradas nas figuras 1 e 2 são determinados a partir da realização de ensaios com a aplicação

de impulsos de tensão padronizados. Esses ensaios foram realizados em um laboratório de alta tensão utilizando a instrumentação descrita em (Lima, 2015; Souza et al., 2016). Em ensaios com estruturas da rede de distribuição trifásica compacta com cabos nus, o meio dielétrico associado é o ar. Nesse caso, tem-se um meio autorrecuperante, que retoma sua suportabilidade inicial após a ocorrência de uma disrupção. Um procedimento de ensaio consagrado que é utilizado neste caso é o método dos acréscimos e decréscimos (Kuffel et al., 2000; IEC Standard 60060-1, 2010; ABNT, 2013).

O método dos acréscimos e decréscimos consiste na aplicação sucessiva de impulsos atmosféricos com forma de onda padronizada do tipo 1,2/50  $\mu$ s. 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 e, caso esta não ocorra, 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; IEC Standard 60060-1, 2010; ABNT, 2013). Obtém-se, dessa forma, um mínimo de 20 amostras, sendo consideradas úteis apenas aquelas verificadas após a primeira disrupção.

As sobretensões que afetam uma linha de distribuição podem ser ocasionadas pela incidência direta de uma descarga atmosférica ou pela indução de tensão causada por uma descarga incidente nas proximidades da linha. Descargas diretas são mais severas, porém menos frequentes que tensões induzidas por descargas indiretas. Tendo em vista que a maioria das descargas atmosféricas transfere cargas negativas da nuvem para a terra, tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas apresentam tipicamente polaridade positiva (Rachid et al., 1996; De Conti et al., 2010). Assim, a polaridade da tensão impulsiva considerada neste trabalho para a obtenção dos parâmetros de suportabilidade dielétrica é a positiva. Além disso, como mostrado em (Kuffel et al., 2000), quando o meio dielétrico é o ar, a suportabilidade da isolação frente a solicitações impulsivas de polaridade positiva é menor do que para solicitações de polaridade negativa. Desse modo, os resultados deste trabalho representam o caso mais crítico para as redes compactas nas condições avaliadas.

Com os dados amostrais obtidos com o emprego do método dos acréscimos e decréscimos, é possível determinar o nível de sobretensão que leva à probabilidade de 50% de ocorrência de disrupções dielétricas nas estruturas testadas (Kuffel et al., 2000; IEC Standard 60060-1, 2010). Este nível é conhecido como tensão de descarga disruptiva a 50%,  $U_{50}$ . A norma IEC Standard 60060-1 (2010) prevê o cálculo de  $U_{50}$  a partir da equação (1). Nessa equação,  $N$  é a quantidade de amostras obtidas em laboratório e  $U_i$  é o nível da tensão disruptiva. A equação (2) apresenta a forma de cálculo do desvio padrão,  $\hat{\sigma}$ .

$$U_{50} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (1)$$

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

### 2.3 Procedimento para Determinação do Nível de Tensão Induzida em uma Linha e do Número de Desligamentos por 100 km por ano

O fenômeno tensão induzida por descargas atmosféricas em linhas de transmissão tem sido investigado por diversos autores nas últimas décadas (Silveira et al., 2014; Rachidi et al. 1996; De Conti et al., 2010; Nucci e Rachidi, 2014; Paulino et al., 2015; Piantini, 2017; Borghetti et al, 2017). Os modelos mais sofisticados que descrevem o comportamento das tensões induzidas levam em consideração as características da onda de corrente da descarga atmosférica (tempo de frente, tempo de meia onda e valor de pico), bem como as características do solo (resistividade e permissividade) (Rachidi et al. 1996; Paulino et al., 2010; Silveira et al., 2014; Napolitano et al, 2018) e da linha (presença de ramificações, para-raios, aterramentos, falhas de isolamento, equipamentos etc.) (De Conti et al., 2010, 2012). Estes modelos permitem uma análise detalhada do desempenho de redes de distribuição frente a descargas atmosféricas por levarem em consideração os fenômenos transitórios resultantes a partir de uma descrição rigorosa de todo o sistema. Entretanto, em muitas situações é suficiente partir de uma modelagem mais simples para se estimar preliminarmente o número de desligamentos de uma linha. Para isso, pode-se adotar como referência a estratégia de modelagem descrita na norma IEEE (2004) ou abordagens similares (Paulino et al., 2015).

O modelo de tensão induzida proposto por Darveniza (2007) a partir do modelo de Rusck (1958) e de dados experimentais é utilizado nas análises apresentadas neste trabalho. Esse modelo é apresentado na equação (3), onde  $V_p$  é o valor de pico da tensão induzida,  $I_0$  é o valor de pico da corrente da descarga atmosférica,  $h$  é a altura da linha,  $\rho$  é a resistividade do solo e  $d$  é a distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga atmosférica. De acordo com o modelo de Darveniza (2007), essa equação é válida para uma linha infinita, reta, sem ramificações e aterramentos. O modelo de Darveniza (2007) considera um degrau como forma de onda para a corrente de descarga, o que, embora não possa ser considerado realístico, permite a obtenção de resultados representativos em determinadas condições de análise, conforme demonstrado em (Paulino et al, 2010)

$$V_p = 38,8 I_0 \frac{(h + 0,15\sqrt{\rho})}{d} \quad (3)$$

Após caracterizar o valor de pico da tensão induzida na linha de distribuição, o procedimento para determinação do número de desligamentos por 100 km de linha por ano é análogo ao apresentado em (Borghetti et al., 2007; De Conti et al., 2010). O procedimento é o seguinte:

- Gera-se, de forma aleatória, um milhão de pontos que representem descargas atmosféricas, com o parâmetro  $I_0$  gerado a partir de uma função densidade de probabilidade com distribuição log-normal e parâmetros da distribuição de acordo com o CIGRÉ (1991). O ponto de incidência da descarga, representado pela variável  $d$ , é gerado aleatoriamente considerando uma distribuição uniforme;
- Retira-se das análises as descargas atmosféricas que incidem diretamente na rede, uma vez que este trabalho tem como foco somente as tensões induzidas. Para isso se utiliza o modelo eletrogeométrico para identificar a ocorrência de uma incidência direta na linha (IEEE, 1985; IEEE, 1990). A distância de atração é determinada por  $d_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}$ , onde  $h$  é a altura do cabo fase conforme tabela 1,  $r_s = 10I_0^{0,65}$  e  $r_g = 0,9r_s$ .
- Para cada evento de tensão induzida calculado através da equação (3), é utilizado o critério proposto em (De Conti et al, 2010) para determinação da ocorrência de uma falha no isolamento da linha. Caso a tensão induzida seja maior que  $1,2U_{50}$ , supõe-se a ocorrência de uma falha no isolamento. O critério adotado por De Conti e colaboradores (2010) conduz a resultados mais conservadores para a estimação do número de desligamentos que o critério proposto em (IEEE, 2004). O número de desligamentos por 100 km que ocorrem por ano é dado por  $N_d = 100n \left( \frac{n_s}{A_t N_g} l \right)^{-1}$ , onde  $n$  é o número de falhas de isolamento observadas,  $n_s$  é o número de pontos gerados aleatoriamente,  $A_t$  é a área total considerada nas simulações,  $N_g$  é a densidade de descargas atmosféricas na área (em número de descargas por quilômetro quadrado por ano) e  $l$  é o comprimento da linha. Nas simulações foram considerados  $A_t = 1 \text{ km}^2$ ,  $N_g = 1 \text{ descarga/km}^2\text{/ano}$  e  $l = 1 \text{ km}$ .

#### 2.4. Discussão

O critério adotado para verificação da falha de isolamento visa obter um cenário em que a estimação do número de desligamentos seja feita de forma conservadora. Isso é necessário, posto que o procedimento adotado para determinação do número de desligamentos causados por descargas atmosféricas indiretas parte de premissas específicas.

A primeira premissa é a utilização da forma de onda dupla exponencial padronizada 1,2/50  $\mu\text{s}$  para determinação da suportabilidade dielétrica das estruturas avaliadas em ensaios em laboratório (ABNT, 2013). Espera-se que, na prática, a suportabilidade de uma dada estrutura seja maior quando submetida a tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas, que tipicamente apresentam tempos de frente e de meia onda inferiores aos da onda de tensão impulsiva padronizada (De Conti et al., 2010). Com isso, entende-se que os valores de suportabilidade utilizados neste trabalho como referência para avaliar o número de desligamentos nas linhas avaliadas sejam ligeiramente inferiores aos reais, o que levaria a uma superestimação do número estimado de falhas de isolamento. Além disso, supõe-se que a cada falha de isolamento corresponda um desligamento na linha.

Tabela 1. Altura do condutor fase em relação ao plano de solo (m).

|     | SE   | SI   | I    | $h_m$ |
|-----|------|------|------|-------|
| CE1 | 8,75 | 8,75 | 8,60 | 8,68  |
| CE2 | 8,90 | 8,90 | 8,50 | 8,70  |

A segunda premissa a ser observada é que a forma de onda da corrente de descarga utilizada para obtenção do modelo de tensão induzida proposto por Darveniza (2007) é um degrau, que é bem diferente da forma de onda de uma corrente de descarga atmosférica típica (Visacro, 2005). Entretanto, o modelo de Darveniza (2007) apresenta resultados equivalentes ao modelo de Paulino e colaboradores (2010), que utiliza um trapézio como forma de onda para a corrente de descarga. A equivalência entre essas duas formulações é observada para resistividades do solo menores que 1000  $\Omega\text{m}$ .

Finalmente, a terceira premissa se refere à hipótese de se desprezar a influência de equipamentos, aterramentos, para-raios, cabos messageiros e ramificações no cálculo da forma de onda de tensão induzida nas linhas avaliadas. Sabe-se que uma avaliação mais rigorosa dos efeitos de tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de distribuição deve, inevitavelmente, incorporar tais elementos. Contudo, conforme mencionado anteriormente, a abordagem aqui utilizada pode ser considerada suficiente para uma estimativa preliminar do número de desligamentos a que estariam submetidas as redes avaliadas.

### 3 Resultados e Análises

Os dados apresentados na tabela 2 foram obtidos através de ensaios em laboratório com as estruturas CE1 e CE2. É possível verificar o nível de suportabilidade e o desvio padrão para cada posição da estrutura trifásica. Além disso, é apresentada a suportabilidade média de cada uma das duas estruturas. Verifica-se que a suportabilidade dielétrica média frente a sobretensões de origem atmosférica da estrutura CE1 é 25,5% maior que a da estrutura CE2.

Os dados experimentais da tabela 2 são utilizados para a determinação do número de desligamentos em 100 km de linha por ano. Na figura 3 são apresentados os resultados para a estrutura CE1, ao passo que na figura 4 são apresentados os resultados para a estrutura CE2. Nestas figuras, quatro curvas são apresentadas, três para cada posição e uma para a média. Percebe-se na figura 3 que somente a posição SI produz uma curva levemente deslocada em relação às outras curvas. Por outro lado, na figura 4 as curvas estão sobrepostas.

Tabela 2. Suportabilidade das estruturas da rede de distribuição trifásica compacta (Lima et al., 2018).

|       | CE1           |                    | CE2           |                    |
|-------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
|       | $U_{50}$ (kV) | $\bar{\sigma}$ (%) | $U_{50}$ (kV) | $\bar{\sigma}$ (%) |
| SE    | 140,9         | 1,58               | 108,9         | 2,46               |
| SI    | 129,0         | 2,15               | 107,8         | 1,95               |
| I     | 136,2         | 2,04               | 107,0         | 1,81               |
| Média | 135,4         | -                  | 107,9         | -                  |

Nas figuras 3 e 4, o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas indiretas nas linhas testadas é estimado em função do valor da resistividade do solo. Percebe-se que o número de desligamentos permanece quase constante para resistividades de até 100  $\Omega\text{m}$ , aumentando de forma mais expressiva para solos de maior resistividade. No Brasil são encontrados em muitas regiões solos de alta resistividade, cujos valores médios podem facilmente exceder 1000  $\Omega\text{m}$  (Visacro, 2012). Entretanto, o valor da resistividade do solo é dependente de diversos fatores, como umidade, temperatura e presença de sais, dentre outros (Visacro, 2012). Isto torna este parâmetro dependente da estação climática do ano. Para manter o foco deste trabalho no número de desligamentos esperados para cada estrutura básica da rede trifásica utilizando cabos nus, nas análises realizadas, dois cenários são considerados: (i) solo de resistividade de 100  $\Omega\text{m}$ ; e (ii) solo de resistividade de 1000  $\Omega\text{m}$ .

Considerando as curvas apresentadas nas figuras 3 e 4, verifica-se que o número de desligamentos esperados para estrutura CE1 posição SI, considerando números inteiros, é de 8 e de 11 para solos com resistividade de 100  $\Omega\text{m}$  e 1000  $\Omega\text{m}$ , respectivamente. Por outro lado, para estrutura CE2, posição SI, são esperados 10 e 13 desligamentos por 100 km de linha por ano considerando solos de resistividade de 100  $\Omega\text{m}$  e 1000  $\Omega\text{m}$ , respectivamente. Percebe-se que a diferença de 19,7% no valor da suportabilidade dielétrica da estrutura CE1, posição SI, em relação a estrutura CE2, posição SI, se traduz em uma diferença de 17,7% e 17,2% no número de desligamentos esperados para solos de 100  $\Omega\text{m}$  e 1000  $\Omega\text{m}$ , respectivamente.

Outra comparação de interesse é avaliar o desempenho das redes compactas trifásicas com as redes de distribuição convencionais. Para isso, são utilizados os resultados apresentados em (De Conti et al., 2010) para uma rede convencional, em que se

considera que o condutor fase esteja a 8,4 m de altura em relação ao solo e que a tensão de descarga disruptiva a 50% da estrutura é de 100 kV. Assim, é possível obter a figura 5, onde são apresentadas as curvas das posições críticas das estruturas compactas trifásicas em conjunto com o resultado obtido para a rede convencional. Verifica-se que para um solo de 100  $\Omega\text{m}$  são esperados 10 desligamentos por 100 km de linha por ano para a rede convencional considerada. Por sua vez, é esperado para um solo de 1000  $\Omega\text{m}$ , um total de 14 desligamentos por 100 km de linha por ano devido a tensões induzidas por descargas atmosféricas.

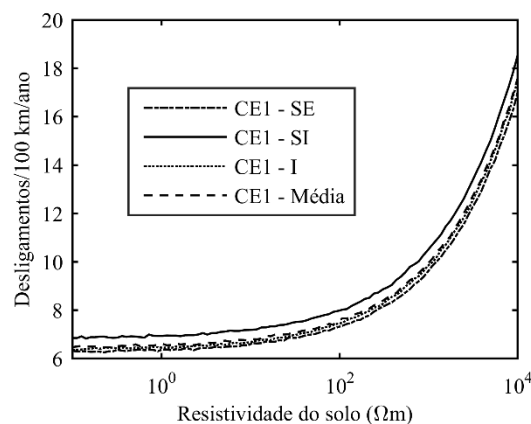


Figura 3. Número estimado de desligamentos em estruturas CE1, com cabos nus.

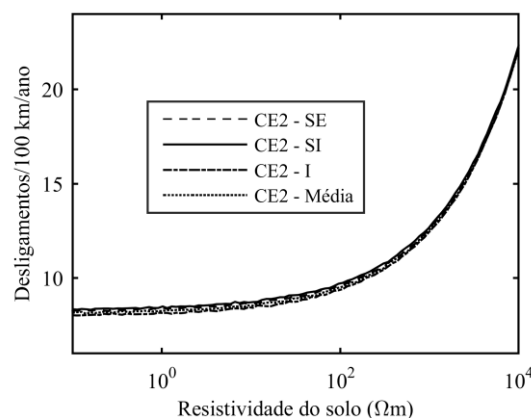


Figura 4. Número estimado de desligamentos em estruturas CE2, com cabos nus.

Verifica-se que a suportabilidade da posição SI da estrutura CE1 é 29,0% maior que a suportabilidade da estrutura convencional considerada. Da mesma forma, a suportabilidade da posição SI da estrutura CE2 é 7,8% maior que a suportabilidade da estrutura convencional considerada. Avaliando a figura 5, para o primeiro cenário com um solo de 100  $\Omega\text{m}$ , percebe-se que a estrutura CE1 (SI) tem, em tese, 19,9% de desligamentos a menos que a estrutura convencional, ao passo que a estrutura CE2 (SI) tem 2,7% de desligamentos a menos que a estrutura convencional. Para o segundo cenário com um solo de 1000  $\Omega\text{m}$ , a estrutura CE1 (SI) tem 20,4% a menos de desligamentos por 100 km por ano em relação a estrutura convencional, enquanto a estrutura CE2 tem 3,8% a menos de desligamentos que a estrutura convencional. Este

resultado, em conjunto com o anterior, mostra que a utilização de redes de distribuição compactas resulta em uma diminuição no número de desligamentos esperados em 100 km de linha por ano devido a tensões induzidas por descargas atmosféricas. Se se considerar o aumento adicional de suportabilidade associado à presença da cobertura isolante nos cabos faz das redes de distribuição compactas, que foi desprezado neste trabalho, espera-se um desempenho ainda melhor das redes compactas em relação às redes convencionais em termos de desligamentos causados por descargas indiretas.

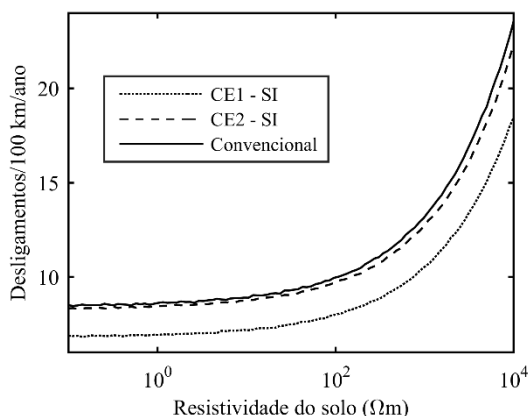


Figura 5. Número estimado de desligamentos em estruturas compactas trifásicas e em estrutura da rede convencional.

#### 4 Conclusão

A partir de ensaios realizados em laboratório, determinou-se a suportabilidade dielétrica das estruturas CE1 e CE2 de redes de distribuição compactas frente a sobretensões impulsivas padronizadas supondo a utilização de condutores nus. Verificou-se que a suportabilidade média da estrutura CE1 é 25,5% maior que a suportabilidade média da estrutura CE2. Pode-se concluir que essa maior suportabilidade conduz a um menor número de desligamentos causados por tensões induzidas por descargas atmosféricas. Além disso, existe uma relação de proporcionalidade inversa entre a suportabilidade dielétrica e número de desligamentos. Isso é confirmado pelos resultados obtidos para estrutura convencional.

Conclui-se que o número de desligamentos tem um crescimento suave para solos de resistividades de até 100  $\Omega m$ . Entretanto, o crescimento no número de desligamentos se torna acentuado para solos de resistividades maiores que 1000  $\Omega m$ . Dessa forma, são esperados mais desligamentos para linhas construídas sobre solos de altas resistividades que em solos de baixa resistividade.

Finalmente, é demonstrado que a utilização de redes de distribuição compactas, mesmo sem considerar a presença de cobertura isolante nos cabos, tende a reduzir o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas indiretas em redes de distribuição.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil e da FAPEMIG (TEC-APQ-03259-11, projeto CEMIG/FAPEMIG D530). Guilherme S. Lima, Rafael M. Gomes e Ronaldo E. Souza gostariam de agradecer o apoio dado pelo PPGEE-UFGM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais). Guilherme S. Lima gostaria de agradecer o apoio dado pelo IFMG (Instituto Federal de Minas Gerais). Alberto De Conti gostaria de agradecer ao CNPq (304117/2016-1 e 431948/2016-0) e à FAPEMIG (TEC-PPM-00280-17). Fernando H. Silveira gostaria de agradecer ao CNPq (309326/2015-0) e à FAPEMIG (TEC-PPM-00491-16).

#### Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Parte 1: definições gerais e requisitos de ensaio, ABNT NBR IEC 60060-1, Rio de Janeiro, 2013.
- Borghetti, A., C. A. Nucci, and M. Paolone, Jan. 2007. An improved procedure for the assessment of overhead line indirect lightning performance and its comparison with the IEEE Std. 1410 method, IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 684-692.
- Borghetti, A., F. Napolitano, C. A. Nucci and F. Tossani, Aug. 2017. Influence of the return stroke current waveform on the lightning performance of distribution lines, IEEE Trans. Power Del., vol. 32, no. 4, pp. 1800-1808.
- CEMIG, 2012. Companhia Energética de Minas Gerais, ND-2.9-Instalações básicas de redes de distribuição compactas, Belo Horizonte.
- CIGRÉ, Oct. 1991. SC 33 Working Group 33.01, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines.
- Darveniza, M., Jan. 2007. A practical extension of Rusck's formula for maximum lightning-induced voltages that accounts for ground resistivity, IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 605-612.
- De Conti, A. R., 2006. Modelos para a determinação de ondas de corrente e tensão representativas das solicitações de sistemas de distribuição por descargas atmosféricas, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- De Conti, A. R., E. Perez, E. Soto, F. H. Silveira, S. Visacro and H. Torres, 2010. Calculation of lightning-induced voltages on overhead distribution lines including insulation breakdown, IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 4, pp. 3078-3084.
- De Conti, A., F. H. Silveira and S. Visacro, 2012. Lightning overvoltages on complex low-voltage

- distribution networks, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 85, pp. 7-17.
- He, J., S. Gu, S. Chen, R. Zeng, and W. Chen, Apr. 2008. Discussion on measures against lightning breakage of covered conductors on distribution lines, *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 693-702.
- IEC Standard 60060-1, 2010. High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements.
- IEEE Working Group on estimation lightning performance of transmission lines, Apr. 1985. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932.
- IEEE Working Group, Jul. 1990. Calculating the lightning performance of distribution lines, *IEEE, IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 3, pp. 1408-1417.
- IEEE, Standard 1410, 2004. Guide for Improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines, IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines. *Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 3, pp. 1408-1417.
- Kuffel, E., W.S. Zaengl and J. Kuffel, 2000. High-voltage engineering fundamentals, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- Lee, R. E., D. E. Fritz, P. H. Stiller, and D. F. Shankle, Sep. 1982. Prevention of covered conductor burndown on distribution circuits - arcing protection devices, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2434-2438.
- Lima, G. S., 2015. 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.
- Lima, G. S., R. M. Gomes, R. E. S. Filho, A. De Conti, F. H. Silveira, S. Visacro, and W.A. Souza, Dec. 2017. Impulse withstand voltage of single-phase compact distribution line structures considering bare and XPLE-covered cables, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 153, pp. 88-93.
- Lima, G. S., R. M. Gomes, R. E. Souza, A. De Conti, F. H. Silveira, and S. Visacro, 2018. A comparison of impulse withstand parameters of three-phase and single-phase compact line structures considering bare cables, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VII SBSE)*, Niterói, Brasil.
- Nakamura, K., P. J. Mc Kenny, M. S. A. A. Hamamm, G. Adams, R. Fernandes, and F. Rushden, Oct. 1986. Impulse breakdown characteristics of 13.2 kV covered conductor insulator/tie configurations, *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 1, no. 4, pp. 250-258.
- Napolitano, F., F. Tossani, A. Borghetti, C. A. Nucci, 2018. Lightning performance assessment of power distribution lines by means of stratified sampling Monte Carlo method, *IEEE Trans. Power Del.*, accepted for publication in a future issue of this journal.
- Nucci, C. A. and F. Rachidi, 2014. Interaction of Electromagnetic Fields Generated by Lightning with Overhead Electrical Networks, in *The Lightning Flash*. 2nd Edition, V. Cooray, Ed. IET - Power and Energy Series 69, pp. 559-610.
- Paulino, J. O. S., C. F. Barbosa, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura, 2010. An approximate formula for the peak value of lightning-induced voltages in overhead lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 843-851.
- Paulino, J. O. S., C. F. Barbosa, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura, Jan. 2015. assessment and analysis of indirect lightning performance of overhead lines, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 118, pp. 55-61.
- Paulino, J. O. S., C. F. Barbosa, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura, G. C. Miranda, 2015. Indirect lightning performance of aerial distribution lines considering the induced-voltage waveform, *IEEE Trans. Eletromagn. Compat.*, vol. 57, no. 5, pp. 1123-1131.
- Piantini, A., 2017, Extension of the Rusck Model for Calculating lightning-induced voltages on overhead lines considering the soil electrical parameters, *IEEE Trans. Eletromagn. Compat.*, vol. 59, no. 1, pp. 154-162.
- Rachidi, F., C.A. Nucci, M. Ianoz and C. Mazzetti, 1996. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 38, No. 3, pp. 250-264.
- Rocha, R. C. C., R. C. Berrêdo, R. A. O. Bernis, E. M. Gomes, F. Nishimura, L. D. Cicarelli and M. R. Soares, 2002. New technologies, standards, and maintenance methods in spacer cable systems, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 2, pp. 562-568.
- Rusck, S., 1958, Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low-voltage networks, *Trans. Roy. Inst. Technol. (KTH)*, no. 120.
- Silveira, F. H., S. Visacro, R. Alípio and A. De Conti, Oct. 2014. Lightning-induced voltages over lossy ground: the effect of frequency dependence of electrical parameters of soil, *IEEE Trans. Eletromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1129-1136.
- Souza, W. A., F. A. M. Silva, L. F. Dias, F. H. Silveira, S. Visacro and A. De Conti, 2014. A discussion on the electrical performance of compact distribution overhead lines, *International Conference on Grounding and Earthing*, Manaus, Brasil.
- Souza, W. A., 2015. Estudo do comportamento de estruturas de redes de distribuição compactas

- frente a sobretensões impulsivas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- Souza, R. E., R. M. Gomes, G. S. Lima, F. H. Silveira, A. De Conti, and S. Visacro, 2016. Preliminary analysis of the impulse breakdown characteristics of XLPE-covered cables used in compact distribution lines, International Conference on Lightning Protection (33 ICLP), Estoril, Portugal.
- Souza, R. E., R. M. Gomes, G. S. Lima, F. H. Silveira, A. De Conti, and S. Visacro, 2017. Analysis of the impulse breakdown behavior of covered cables used in compact distribution lines”, *Electr. Power Syst. Res.*, in press, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.024>.
- Visacro, S., 2005. Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP.
- Visacro, S., 2012. Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP.