

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA SUPORTABILIDADE DE ESTRUTURAS  
MONOFÁSICAS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS  
COMPACTAS FRENTE A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS  
PADRONIZADOS**

**GUILHERME DA SILVA LIMA**

DATA DA DEFESA: 05/10/2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE**

**AVALIAÇÃO DA SUPORTABILIDADE DE ESTRUTURAS  
MONOFÁSICAS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS  
COMPACTAS FRENTE A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS  
PADRONIZADOS**

**GUILHERME DA SILVA LIMA**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

**Orientador: Prof. Dr. Alberto Resende De Conti**

**Co-orientadores: Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira  
Prof. Dr. Silvério Visacro Filho**

**BELO HORIZONTE**  
**OUTUBRO – 2015**

*Dedico este trabalho aos amigos que me suportam fraternalmente apesar de minhas limitações.*

*“Senhor, dá-me serenidade para aceitar tudo aquilo que não pode e não deve ser mudado. Dá-me força para mudar tudo o que pode e deve ser mudado. Mas, acima de tudo, dá-me sabedoria para distinguir uma coisa da outra.”*

*São Francisco de Assis*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pelas oportunidades e pelo amor com que Ele cria e cuida de todas as coisas.

Agradeço à minha comunidade de fé por todas as alegrias que vivemos juntos, por todas as dificuldades vencidas em comunhão e por todas as orações que foram e são dedicadas a mim e que me fortalecem na caminhada pelas estradas da vida.

A meus pais, Sebastião Martins e Ivani Bernardo, e a minhas irmãs, Ivone e Érica, por me apoiarem e compartilharem um pouco de suas vidas comigo.

A meus familiares, que sempre me auxiliaram nas horas das minhas necessidades.

À minha namorada, Ariana, pelos momentos de alegria vividos e pela compreensão pelas vezes em que não foi possível estarmos juntos.

Ao Rafael Maia Gomes por ser muito mais que um companheiro de laboratório, mas um grande amigo.

Agradeço à UFMG, à FAPEMIG e à CEMIG pelo suporte que foi disponibilizado para realização deste trabalho.

A meu orientador, professor Alberto Resende de Conti, pelo apoio, paciência e dedicação. Muito obrigado.

Aos professores do LRC, em especial aos co-orientadores professor Silvério Visacro Filho e professor Fernando Henrique Silveira pelas contribuições feitas a este trabalho.

À equipe que trabalha no LRC, pelos momentos de aprendizagem vividos juntos, e de forma especial a Felipe Cota, Thiago Virgílio, Ronaldo Eugênio e Miguel Guimarães.

Por último, mas nem por isso menos importante, agradeço a todos os amigos que passaram e marcaram minha vida com sua presença.

---

## Resumo

O presente trabalho dedica-se a avaliar a suportabilidade de estruturas monofásicas de redes de distribuição compactas frente a impulsos atmosféricos padronizados com polaridades positivas e negativas. Dedicase também à estimação de parâmetros para a caracterização desta suportabilidade. Três situações foram consideradas nos testes em laboratório com as estruturas avaliadas, que são aquelas de uso mais frequente em redes monofásicas compactas no estado de Minas Gerais: (i) cabos cobertos com isolamento nova; (ii) cabos cobertos com isolamento perfurada por impulso atmosférico padronizado; (iii) cabo nu, visando avaliar o caso crítico em que a cobertura isolante esteja completamente deteriorada.

Os resultados obtidos indicam valores de tensão disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ) entre 129,9 kV e 185,4 kV para a aplicação de tensões impulsivas padronizadas de polaridade positiva em estruturas montadas com cabos nus. Para aplicação de tensões de polaridade negativa,  $U_{50}$  assumiu valores entre 155,9 kV e 204,5 kV. Em todos os casos envolvendo cabos nus, foram estimados parâmetros das curvas  $U_{xt}$  correspondentes às estruturas avaliadas. Também foram determinados parâmetros para emprego do método do efeito disruptivo (método DE), que permite estimar a resposta das estruturas avaliadas frente a formas de onda de tensão não padronizadas.

Na avaliação da suportabilidade das estruturas das redes compactas considerando cabos cobertos novos, foram obtidas tensões disruptivas médias entre 197,3 kV e 289,7 kV, para a aplicação de tensões impulsivas de polaridade positiva, e entre 219,5 kV e 243,8 kV, para a aplicação de tensões de polaridade negativa. Os resultados obtidos comprovam, portanto, que a cobertura isolante dos cabos contribui para um aumento na suportabilidade das estruturas da rede compacta frente a sobretensões de natureza impulsiva. Além disso, observou-se que a distância de um furo na cobertura do cabo ao ponto aterrado mais próximo pode afetar o nível de suportabilidade da estrutura. Furos que se manifestam em pontos próximos à estrutura fazem com que a suportabilidade se aproxime do caso crítico onde o cabo coberto é substituído por um cabo nu. Por outro lado, para furos em pontos distantes da estrutura, a suportabilidade tende a se aproximar daquela verificada para a condição de cabo novo, dependendo da polaridade da tensão impulsiva aplicada.

---

## Abstract

This work is dedicated to investigate the impulse withstand voltage of single-phase compact distribution line structures when subjected to standard lightning impulse waveforms with positive and negative polarities. It is also dedicated to estimate parameters to characterize such withstand. Three situations were considered in laboratory tests with the evaluated structures, which are the ones most frequently used in the state of Minas Gerais, Brazil: (i) covered cables with new insulation; (ii) covered cables with punctured insulation after application of standard lightning impulses; (iii) bare cables, aiming at assessing the critical case in which the insulating cover is completely deteriorated.

The results show that the application of standard lightning impulses with positive polarity on structures with bare cables leads to critical flashover overvoltages ( $U_{50}$ ) with values between 129.9 kV and 185.4 kV. For the application of standard lightning impulses with negative polarity,  $U_{50}$  assumed values between 155.9 kV and 204.5 kV. In all cases using bare cables, parameters of the Uxt curves corresponding to the evaluated structures were estimated. Parameters for the disruptive effect method (DE method), which allows estimating the response of the evaluated structures when subjected to non-standard voltage waveforms, were also determined.

In assessing the voltage withstand of compact distribution line structures considering cables with brand new insulating cover, mean breakdown voltages between 197.3 kV and 289.7 kV were obtained for the application of impulse voltages with positive polarity, while values between 219.5 kV and 243.8 kV were obtained for impulse voltages with negative polarity. The results therefore demonstrate that the insulating cover of the cables contributes to an increase in the voltage withstand of compact distribution line structures when subjected to lightning impulse waveforms. Furthermore, it was observed that the distance between a pinhole on the cable cover to the nearest grounded point can affect the withstand level of the structure. Pinholes close to the structure reduce the voltage withstand to levels that approach the critical case where the covered cable is replaced by a bare cable. On the other hand, pinholes far away from the structure lead the withstand level to approach the condition of a new cable, depending on the polarity of the applied impulse voltage.

---

---

## Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Introdução .....	1
1.2	Objetivo .....	3
1.3	Metodologia .....	3
1.4	Organização do texto .....	4
2	Redes Compactas de Distribuição de Energia Elétrica .....	6
2.1	Introdução .....	6
2.2	As Redes de Distribuição no Contexto Brasileiro .....	7
2.2.1	As Redes Convencionais .....	8
2.2.2	As Redes Compactas .....	11
2.2.3	As Redes Isoladas .....	14
2.2.4	As Redes Subterrâneas .....	15
2.3	Características das Redes Compactas .....	15
2.3.1	Materiais Empregados .....	16
2.3.2	Estruturas Básicas de Redes Compactas .....	20
3	Modelos e Parâmetros para a Caracterização da Suportabilidade de Estruturas Frente a Sobretensões Impulsivas.....	25
3.1	Introdução .....	25
3.2	Parâmetros Normalizados para a Definição da Suportabilidade de Estruturas de Redes de Distribuição frente a Sobretensões Impulsivas .	27
3.2.1	Redes Aéreas com Cabos Nus.....	28
3.2.1.1	Tensão de Descarga Disruptiva a 50% .....	29
3.2.1.2	Curvas Uxt .....	31
3.2.2	Redes Aéreas com Cobertura Isolante.....	33

---



---

3.3	Modelos para a Estimação da Suportabilidade de Estruturas de Redes de Distribuição frente a Sobretensões Impulsivas não Padronizadas .....	37
3.3.1	Considerações Iniciais Relativas às Sobretensões Impulsivas não Padronizadas .....	37
3.3.2	Método do efeito disruptivo .....	40
4	Resultados de Testes de Suportabilidade de Estruturas de Redes de Distribuição Compacta e Estimação de Parâmetros para Modelos .....	44
4.1	Introdução .....	44
4.2	Metodologia dos Ensaios .....	44
4.3	Ensaio Realizado com a Estrutura CM1 .....	50
4.3.1	Resultados de Ensaio da Estrutura CM1 com Cabos Nus .....	50
4.3.2	Resultados de Ensaio da Estrutura CM1 com Cabos Cobertos .....	53
4.4	Ensaio Realizado com a Estrutura CM1S .....	56
4.4.1	Resultados de Ensaio da Estrutura CM1S com Cabos Nus .....	56
4.4.2	Resultados de Ensaio da Estrutura CM1S com Cabos Cobertos .....	59
4.5	Ensaio Realizado com a Estrutura CM2 .....	61
4.5.1	Resultados de Ensaio da Estrutura CM2 com Cabos Nus .....	62
4.5.2	Resultados de Ensaio da Estrutura CM2 com Cabos Cobertos .....	64
4.6	Ensaio Realizado com a Estrutura CM3 .....	66
4.6.1	Resultados de Ensaio da Estrutura CM3 com Cabos Nus .....	66
4.6.2	Resultados de Ensaio da Estrutura CM3 com Cabos Cobertos .....	68
4.7	Considerações finais .....	71
5	Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos .....	73
5.1	Introdução .....	73
5.2	Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos nos Ensaio com Polaridade Positiva .....	73

---

---

5.2.1	Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Nus .....	73
5.2.2	Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Cobertos .....	76
5.3	Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos nos Ensaios com Polaridade Negativa .....	80
5.3.1	Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Nus .....	80
5.3.2	Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Cobertos .....	83
5.4	Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos com a Aplicação de Tensões Impulsivas com Polaridades Positiva e Negativa .....	86
5.4.1	Estruturas Monofásicas da Rede de Distribuição Compacta com Cabos Nus.....	86
5.4.2	Estruturas Monofásicas da Rede de Distribuição Compacta com Cabos Cobertos.....	89
6	Conclusões e Propostas de Continuidade.....	92
6.1	Considerações Iniciais .....	92
6.2	Conclusões .....	92
6.3	Propostas de Continuidade.....	97
	Referências Bibliográficas.....	98

# 1 Introdução

## 1.1 Introdução

No final da década de oitenta e início da década de noventa do século passado, começaram a ser implantadas no Brasil as redes de distribuição compactas, que tem como característica a utilização de cabos condutores cobertos por material polimérico sustentados por espaçadores. Este tipo de rede surgiu nos Estados Unidos da América (EUA), no ano de 1932, como recurso técnico para reduzir o número de desligamentos devido a agentes externos, tal como gelo, neve, arborização e balanço da rede devido aos ventos (COPEL, 2015). No Brasil, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) foram pioneiras na realização de testes com as redes compactas. A CEMIG instalou os primeiros quilômetros de redes compactas em 1988, enquanto a COPEL começou seus testes substituindo 150 km de redes convencionais por redes compactas no município de Maringá, no Paraná, em 1993, com a expectativa de redução de 60% do total de desligamentos e atenuação do impacto ambiental causado pela poda de árvores nesta cidade, que possuía naquele momento cerca de 160 mil árvores. De fato, Maringá foi a primeira cidade brasileira a ter 100% de sua rede substituída por redes compactas (COPEL, 2015).

Nos testes realizados pela CEMIG e pela COPEL foi observada uma melhoria nos indicadores de qualidade de energia, DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), quando se compara o desempenho das redes convencionais amplamente utilizadas por essas concessionárias com o das redes compactas. A possibilidade de contato momentâneo da rede compacta com galhos de árvores sem que sejam verificados desligamentos e a maior suportabilidade dielétrica das redes compactas frente a solicitações de origem atmosférica são as principais razões para a melhoria destes indicadores. Isso motivou as concessionárias de energia elétrica a expandirem seus circuitos de distribuição adotando essa nova configuração de rede, o que culminou, em 1998, com a adoção das redes compactas como padrão para redes de distribuição

aéreas urbanas na CEMIG (ROCHA et al., 2002), fato que ocorreu em 2010 na COPEL (COPEL, 2015).

A despeito do presumido aumento da qualidade do fornecimento de energia associado à utilização das redes compactas, o desempenho de redes com essas características utilizadas no Brasil frente a descargas atmosféricas não é conhecido em detalhe. Isso fica claro diante da ausência de padronização de ensaios para identificação da suportabilidade dielétrica das estruturas e materiais de redes compactas frente aos efeitos de descargas atmosféricas. De fato, não se tem conhecimento de trabalhos que caracterizem a suportabilidade de estruturas de redes compactas utilizadas no Brasil frente a tais efeitos. Essa é uma constatação preocupante, pois as descargas atmosféricas são uma das principais causas de desligamentos não programados, danos a equipamentos e defeitos em redes de distribuição. Isso é confirmado por dados recentes da CEMIG, que indicam que as descargas atmosféricas são responsáveis por 28,79% das interrupções no fornecimento de energia elétrica em redes de distribuição (SOUZA et al., 2014).

Em redes convencionais, que utilizam cabos nus, sobretensões causadas por descargas atmosféricas podem levar à disrupção do ar que isola o condutor da parte aterrada da estrutura que o sustenta, levando a um curto-circuito subsequente e a um eventual desligamento da rede pela atuação da proteção. Em redes compactas, a mesma sobretensão pode levar à disrupção do ar, do material polimérico que cobre os condutores, ou dos dois meios. Alguns estudos foram realizados com cabos cobertos para avaliar a vida útil e a suportabilidade do cabo na ocorrência de curtos-circuitos (LEE et al., 1982; NAKAMURA et al., 1986). Todavia, ainda existe uma lacuna na definição da suportabilidade destes cabos frente a descargas atmosféricas, em especial nas suas condições de emprego no Brasil.

A ocorrência de uma disrupção no meio isolante causada por sobretensões de origem atmosférica geralmente leva, em redes de distribuição, à ocorrência de um curto-circuito subsequente que se mantém até a atuação da proteção. Em redes convencionais, o arco elétrico associado à corrente de curto-circuito subsequente em 60 Hz não se mantém em um único ponto, movendo-se ao longo do cabo nu devido à ação do vento e de forças eletromagnéticas até que a proteção atue e consiga extingui-lo. No cabo

coberto, o arco elétrico em 60 Hz tende a se concentrar em um único ponto, levando a um sobreaquecimento local e à consequente ruptura do cabo por dissipação de energia em excesso antes que a proteção consiga atuar (LEE et al., 1982). Esse fenômeno denota a importância de se conhecer em detalhe o nível de suportabilidade das estruturas de redes de distribuição compactas frente a descargas atmosféricas, pois com isso pode-se atuar no sentido de melhorar o desempenho dessas redes e assim evitar a eventual ruptura dos cabos cobertos.

Diante de um cenário em que não se conhece com clareza a suportabilidade de redes compactas frente a sobretensões impulsivas causadas por descargas atmosféricas e de uma situação de risco associada à maior vulnerabilidade das redes compactas às correntes de curto-circuito resultantes de disrupções associadas a sobretensões atmosféricas, entende-se como necessário avaliar em laboratório a suportabilidade de estruturas de redes de distribuição compactas frente a sobretensões impulsivas. Um projeto de pesquisa está sendo atualmente desenvolvido pelo LRC (Lightning Research Center/Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) em parceria com a Cemig Distribuição com tal intuito. Tal projeto já gerou, além do presente trabalho, duas dissertações de mestrado, uma já defendida (SOUZA, 2015) e outra em andamento, uma tese de doutorado em andamento, e artigos publicados sobre o assunto. Neste contexto se insere esta dissertação de mestrado.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho consiste em determinar, por meio de ensaios em laboratório, a suportabilidade de estruturas monofásicas de redes de distribuição compactas frente a impulsos atmosféricos padronizados e avaliar o emprego de modelos computacionais que possam estimar a suportabilidade dessas estruturas frente a sobretensões impulsivas com forma de onda padronizada ou não padronizada.

## **1.3 Metodologia**

Este trabalho tem início com a descrição das estruturas típicas utilizadas em redes de distribuição compactas e com o estudo de métodos utilizados para a avaliação da suportabilidade dielétrica da isolação frente a formas de onda não padronizadas.

Para a determinação da suportabilidade dielétrica das redes de distribuição compactas frente a descargas atmosféricas, são apresentados resultados de testes laboratoriais realizados com a aplicação de tensões impulsivas padronizadas em estruturas dessas redes no laboratório de alta tensão do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) da UFMG. Tendo em vista o grande número de estruturas e variações presentes em redes de distribuição compactas, são avaliadas neste trabalho exclusivamente estruturas de redes monofásicas.

Em um primeiro momento são apresentados resultados de testes das estruturas da rede compacta utilizando cabos nus. Essa situação visa avaliar o caso crítico no qual o cabo coberto tem sua cobertura isolante completamente deteriorada pela ação do tempo e de agentes externos. Os testes foram realizados conforme previsto na norma ABNT (2013), sendo obtidos diferentes parâmetros de interesse, como a tensão disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ) e as curvas tensão-tempo ( $U_{xt}$ ) correspondentes. Com base nas curvas  $U_{xt}$  obtidas com a aplicação de impulsos atmosféricos padronizados, foram determinados parâmetros para uso no modelo de predição conhecido como *Disruptive Effect Method*, ou método DE (JONES, 1954; ANCAJIMA et al., 2007), que permite analisar o comportamento da estrutura avaliada diante de formas de onda impulsivas não padronizadas.

Posteriormente, são apresentados resultados de testes nos quais os cabos nus foram substituídos pelos cabos cobertos efetivamente utilizados nas redes compactas. Nesse caso, as estruturas foram submetidas a testes de tensão suportável a impulso atmosférico para determinação da tensão impulsiva máxima suportável por estrutura. Nesses testes, foram considerados condutores de diferentes fabricantes e coberturas isolantes com ou sem perfuração prévia.

## **1.4 Organização do texto**

O texto desta dissertação foi organizado em cinco capítulos, incluindo a presente **Introdução**.

No **Capítulo 2** é apresentado um estudo sobre as redes de distribuição compactas, com descrição das principais estruturas, aplicações de cada uma delas e comparação com as redes de distribuição convencionais.

No **Capítulo 3** são apresentados modelos e parâmetros para a caracterização da suportabilidade dielétrica das redes de distribuição compactas frente a sobretensões associadas a descargas atmosféricas.

No **Capítulo 4** são apresentados os ensaios realizados em laboratório e, a partir dos resultados obtidos, são estimados parâmetros para uso nos modelos que descrevem a suportabilidade dielétrica das redes compactas frente a sobretensões de origem atmosférica.

No **Capítulo 5** são apresentadas análises comparativas entre os resultados obtidos para as estruturas monofásicas ensaiadas, além de comparações entre os resultados com tensões impulsivas de polaridades positiva e negativa.

As conclusões e também as propostas de continuidade são apresentadas no **Capítulo 6**.

# 2 Redes Compactas de Distribuição de Energia Elétrica

## 2.1 Introdução

O sistema elétrico de potência (SEP) é estruturado através dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (LEÃO, 2009).

Os sistemas de geração exercem o papel de converter energia potencial (da água, do vento, do sol, etc.) em energia elétrica. A matriz energética brasileira tem como principal forma de geração de energia elétrica (aproximadamente 70% da potência instalada no Brasil) as usinas hidrelétricas (ANEEL, 2014). Para que a energia elétrica produzida nas unidades geradoras chegue até os centros de consumo são utilizados os sistemas de transmissão. No Brasil, esses sistemas trabalham com tensões nominais que variam entre 230 kV e 765 kV.

Os sistemas de distribuição são compostos de circuitos de alta, média e baixa tensão, que também são conhecidos, respectivamente, por sistemas de subtransmissão, redes primárias e redes secundárias. Os sistemas de subtransmissão, em sua maior parte de responsabilidade das empresas distribuidoras, operam com tensões na faixa de 69 kV a 138 kV. As redes primárias de distribuição, que operam no Brasil com tensões entre 2,3 kV e 44 kV, ligam a saída do transformador de uma subestação ao terminal de alta tensão do transformador de distribuição próximo a unidade consumidora. Por sua vez, as redes secundárias ligam o terminal de baixa tensão do transformador de distribuição ao consumidor final com tensões inferiores a 1.000 V e tipicamente de 127/220 V ou 220/380 V (ABRADEE, 2015). No estado de Minas Gerais, atendido quase totalmente pela CEMIG, as redes primárias de distribuição operam com tensões de 13,8 kV ou



23,1 kV (ROCHA et al., 2002). No escopo deste trabalho, as análises são realizadas considerando redes primárias de 13,8 kV com classe de isolamento de 15 kV.

## 2.2 As Redes de Distribuição no Contexto Brasileiro

No Brasil existem sessenta e três concessionárias responsáveis pela distribuição de energia elétrica a mais de 74,1 milhões de unidades consumidoras (ANEEL, 2014). O sistema de distribuição leva aos consumidores finais uma potência total de 412.000 GWh (ANEEL, 2014). Na Figura 2.1 é apresentada uma lista das dez maiores empresas distribuidoras de energia no Brasil, por consumidores atendidos. Essas concessionárias são responsáveis pelo atendimento de 58% do total dos consumidores no país. Na Figura 2.2 é apresentada uma lista das dez maiores empresas distribuidoras de energia do Brasil, por potência entregue. Essas empresas distribuem 59% da potência total no país (ANEEL, 2014).

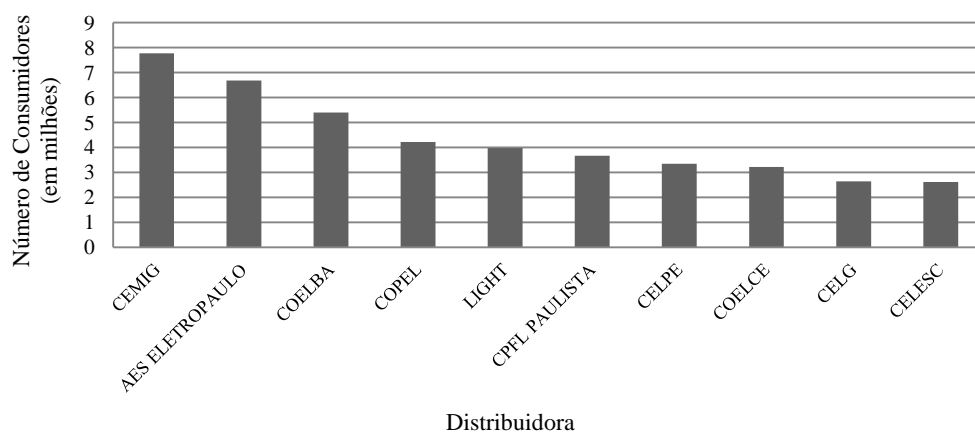


Figura 2.1 - Número de consumidores por distribuidora [adaptado de (ANEEL, 2014)].

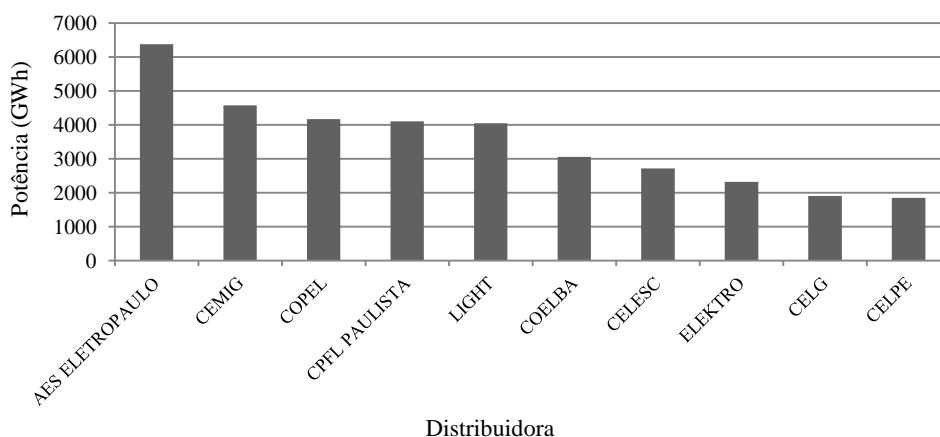


Figura 2.2 - Potência distribuída em GWh por empresa [adaptado de (ANEEL, 2014)].

Para o atendimento dos consumidores e a entrega de energia elétrica no local de consumo são utilizados quatro tipos de redes de distribuição: redes convencionais, redes compactas, redes isoladas e redes subterrâneas. A escolha de cada tipo de rede depende dos seguintes fatores (CELESC, 2012):

- Segurança: para a implantação, manutenção e operação de uma rede de distribuição devem ser analisados os riscos à segurança dos trabalhadores e da população.

- Análise técnica: deve ser realizado um estudo técnico sobre a viabilidade de cada tipo de rede.

- Meio ambiente: o projeto deve buscar causar sempre a menor interferência no meio ambiente, evitando a poda de árvores e a intervenção na arquitetura característica da cidade.

- Confiabilidade: a rede adotada deve ter baixo nível de desligamentos causados por agentes externos à rede. O nível de desligamentos aceitável deve estar dentro da faixa proposta pelo órgão regulador, papel que é exercido no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

- Custo do investimento: na análise do custo devem ser levados em conta os valores do investimento inicial e o custo com manutenção da rede. A análise do custo ao longo prazo determinará qual rede deverá ser adotada para uma relação custo-benefício ótima.

### **2.2.1 As Redes Convencionais**

As redes de distribuição no Brasil seguem hoje predominantemente o padrão convencional, ainda que a sua utilização em novos projetos se reduza a casos específicos (CELESC, 2012; CEMIG, 2012; FECOERUSC, 2010). Existem basicamente dois tipos de redes convencionais: com cruzeta e tipo pilar, sendo a primeira a mais utilizada.

As redes convencionais com cruzetas são constituídas de cabos nus, cruzetas, isoladores, ferragens e poste (ABNT, 2012a). Tais redes têm a vantagem de proporcionar uma fácil instalação e manutenção de equipamentos como chaves,

transformadores, para-raios, etc. As redes convencionais com cruzetas têm como desvantagem a impossibilidade de montagem de mais de um circuito por nível (CELESC, 2012).

Da Figura 2.3 à Figura 2.5 nota-se que são possíveis três configurações típicas para a rede trifásica convencional com cruzetas: a rede normal (N), a rede beco (B) e a rede meio beco (M). A escolha do tipo de estrutura deve ser realizada observando os espaçamentos mínimos que devem ser mantidos entre a rede convencional e as construções vizinhas, sacadas de prédios e outros obstáculos próximos (CELESC, 2012; ABNT, 2012a).

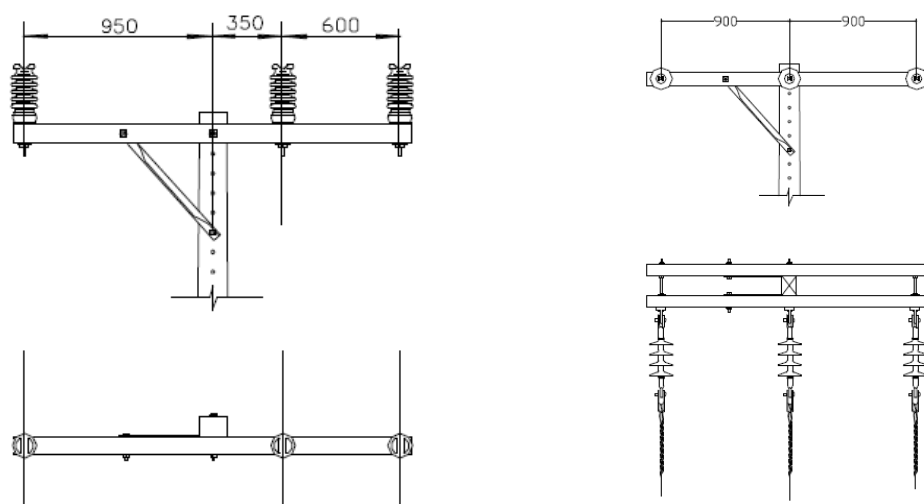


Figura 2.3 - Rede de distribuição convencional com cruzeta – normal (N) (distâncias em mm) [adaptado de (CELESC, 2012)].

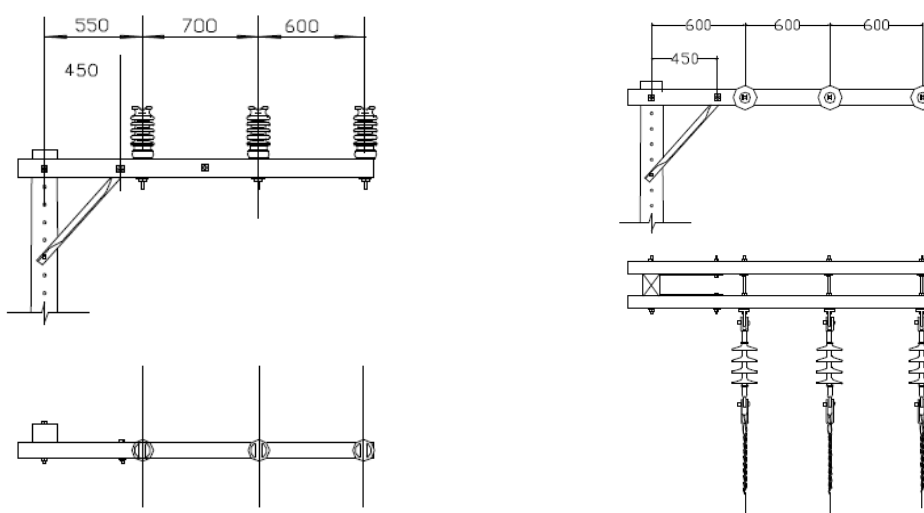


Figura 2.4 - Rede de distribuição convencional com cruzeta – beco (B) (distâncias em mm) [adaptado de (CELESC, 2012)].

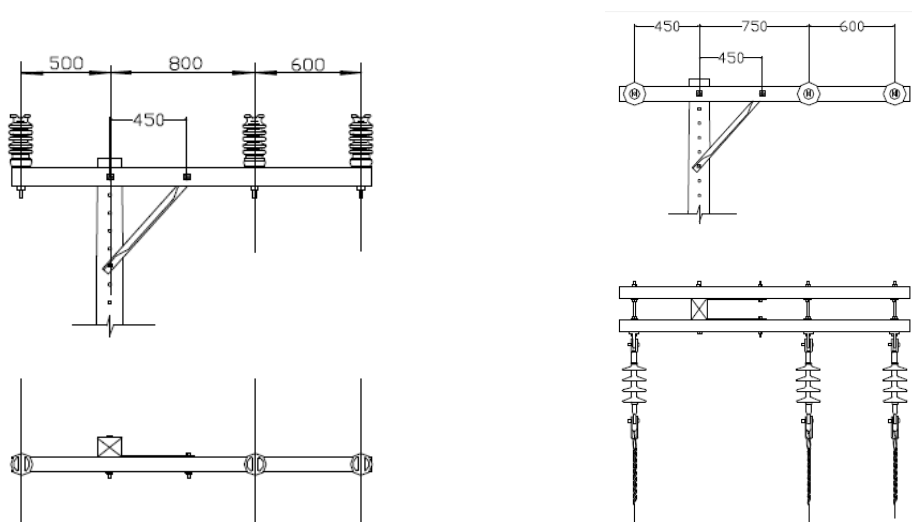


Figura 2.5 - Redes de distribuição convencionais com cruzeta – meio beco (M) (distâncias em mm) [adaptado de (CELESC, 2012)].

Da Figura 2.6 à Figura 2.8 são apresentadas as redes convencionais tipo pilar. Neste tipo de rede não são utilizadas cruzetas. Sendo assim, os isoladores e os equipamentos são instalados diretamente no poste com ferragens próprias. Neste tipo de montagem os espaços são reduzidos, o que dificulta a manutenção da rede. As redes convencionais tipo pilar são aplicadas em áreas menos urbanizadas e em redes rurais. Como esta rede é montada na vertical, tem-se a vantagem de poder-se utilizar os dois lados do poste para a montagem de um circuito duplo, como ilustrado na Figura 2.8 (CELESC, 2012).

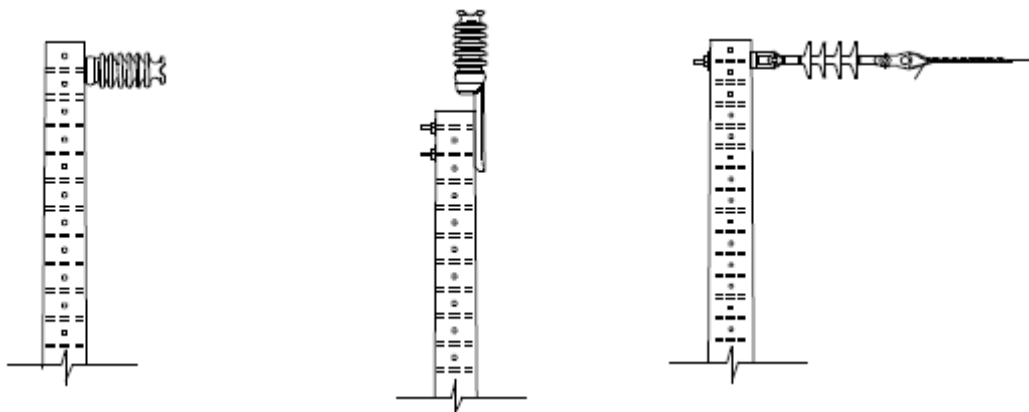


Figura 2.6 - Redes convencionais tipo pilar – Monofásico [adaptado de (CELESC, 2012)].

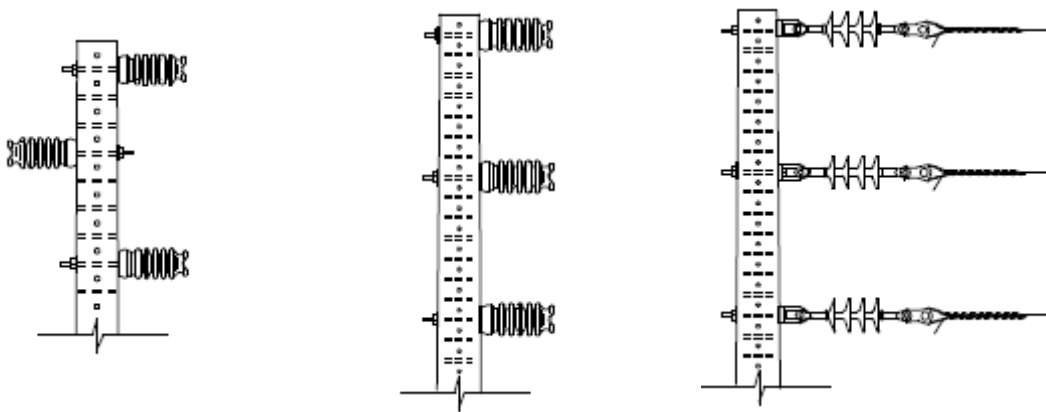


Figura 2.7 - Redes convencionais tipo pilar – Trifásico [adaptado de (CELESC, 2012)].

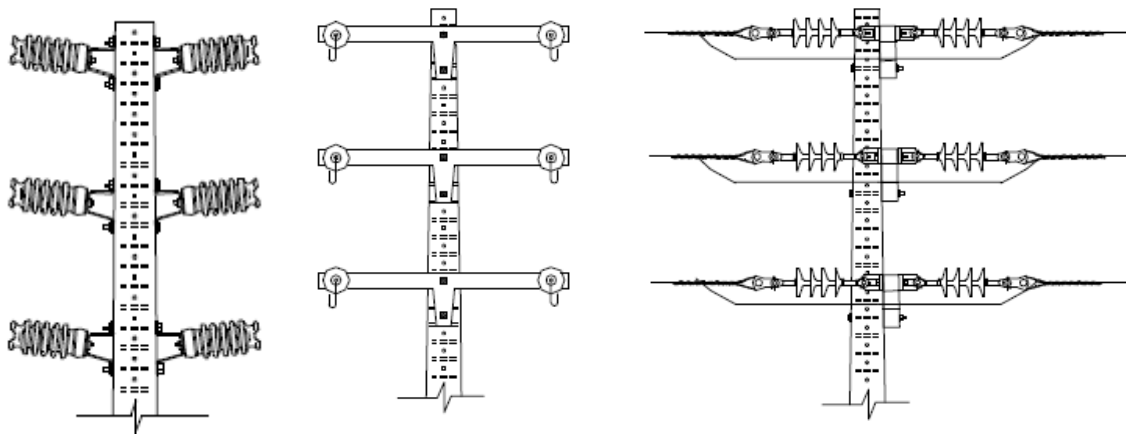


Figura 2.8 - Redes convencionais tipo pilar – circuito duplo [adaptado de (CELESC, 2012)].

Em redes convencionais, os cabos nus utilizados estão expostos a todos os tipos de solicitações externas à rede. As mais comuns são os efeitos associados às descargas atmosféricas e aos contatos momentâneos ou permanentes com partes aterradas. Os efeitos associados a esses tipos de solicitações geralmente levam a curtos-circuitos que requerem a atuação da proteção da rede e o conseqüente desligamento da linha.

### 2.2.2 As Redes Compactas

As redes compactas são formadas por cabos condutores cobertos por uma camada de material polimérico de polietileno reticulado (XLPE), sustentados por meio de espaçadores poliméricos ancorados em um cabo mensageiro de aço nu. As estruturas típicas que compõem as redes compactas são as monofásicas, CM1, CM2 e CM3, e as trifásicas, CE1, CE2 e CE3, conforme ilustrado na Figura 2.9. As estruturas CM1 e CE1

operam com ângulos inferiores a  $6^\circ$ , as estruturas CM2 e CE2 operam com ângulos de até  $60^\circ$  e as estruturas CM3 e CE3 são utilizadas em finais de linhas (ABNT, 2011a).

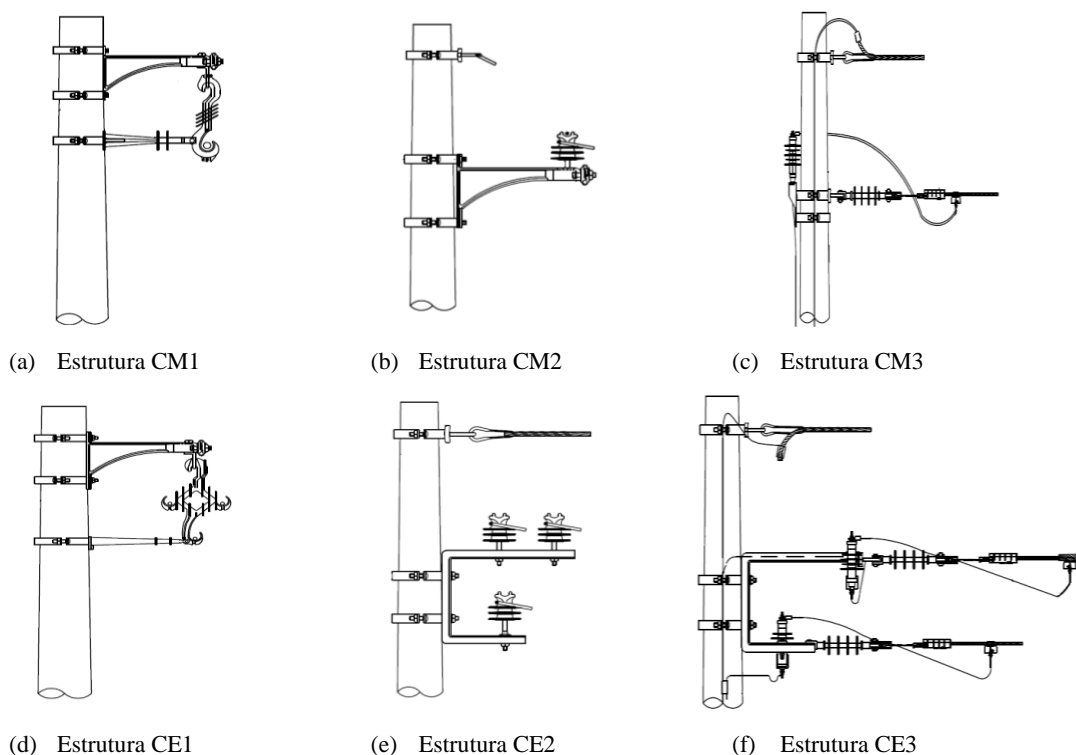


Figura 2.9- Estruturas básicas da rede de distribuição compacta.

No Brasil, devido à viabilidade técnica e econômica das redes compactas (BRITO E CASTRO, 2007), estas já têm sido utilizadas como padrão mínimo por várias empresas de distribuição de energia (CELESC, 2012; CEMIG, 2012; FECOERUSC, 2010; CPFL, 2009). Por exemplo, desde 1998 a CEMIG utiliza este tipo de rede em substituição às redes convencionais, que utilizam condutores nus, como padrão mínimo em redes de distribuição urbanas (ROCHA et al., 2002).

As redes compactas utilizam cabo mensageiro de aço para sustentação dos cabos da rede, postes de concreto ou madeira, espaçadores poliméricos e ferragens (ABNT, 2011a). Em redes instaladas em sistemas multiterrados, também é utilizado um condutor neutro de alumínio.

Vale notar que a cobertura de XLPE não é capaz de confinar o campo elétrico no interior do cabo. Dessa forma, todos os procedimentos de operação e manutenção das redes compactas devem seguir os mesmos procedimentos de segurança usados nas redes

convencionais (ABNT, 2011a), além dos procedimentos previstos na norma de segurança em trabalhos com eletricidade (NR, 2004).

Em regiões com alto índice de poluição e baixo nível de precipitação, o uso das redes compactas não é recomendado (CEEE, 2012; CPFL, 2009; ABNT, 2011a). Isso ocorre porque o acúmulo de partículas na cobertura do cabo aumenta a circulação de correntes de fuga que causam erosão na cobertura isolante de XLPE e propiciam a ocorrência de oxidação e trilhamento (SILVA et al., 2012).

Em redes compactas, os espaçamentos que devem ser mantidos entre circuitos e também entre circuito e partes aterradas são menores que em redes convencionais. Essa vantagem possibilita a utilização de até quatro circuitos primários em um mesmo poste, como visto na Figura 2.10.

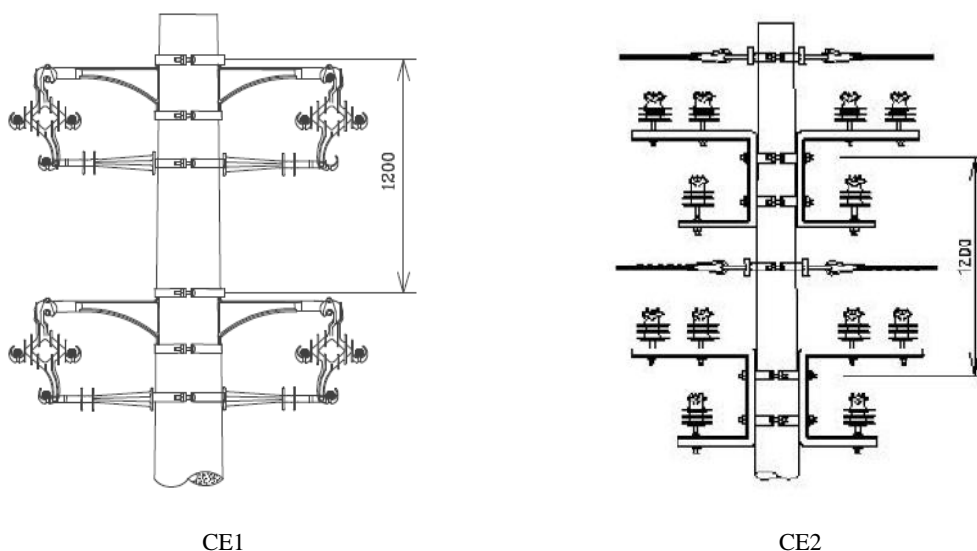


Figura 2.10 - Exemplo de utilização de circuito quádruplo em redes compactas, distâncias em mm [adaptado de (CEMIG, 2012)].

A prática mostra que o número de desligamentos devidos a descargas atmosféricas e a contatos eventuais com partes aterradas é bem menor em redes compactas do que em redes convencionais (SOUZA, 2015). Isso causa um menor número de interrupções no fornecimento de energia elétrica aos consumidores e uma presumida melhoria no desempenho da rede compacta em comparação com a rede convencional.

### 2.2.3 As Redes Isoladas

Em redes de distribuição isoladas são utilizados cabos blindados, que têm como característica principal o confinamento do campo dentro do cabo. Na norma ABNT (2012b) são apresentadas as características principais de cabos isolados de classe de tensão de até 35 kV. Em resumo, cabos isolados devem ter parte condutora, camada de material polimérico, camada semicondutora, camada condutora e camada de composto polimérico termoplástico.

Neste tipo de rede os cabos fase são dispostos em volta do cabo mensageiro, que serve como neutro da rede e também como sustentação dos cabos isolados.

As aplicações mais comuns de redes isoladas se dão em regiões muito arborizadas em que a poda das árvores é inviável ou indesejada (Figura 2.11), em situações em que os espaçamentos entre a rede e as construções são reduzidos, e em situações em que há possibilidade de contato acidental de pessoas que realizam trabalhos próximos à rede (CELESC, 2012).

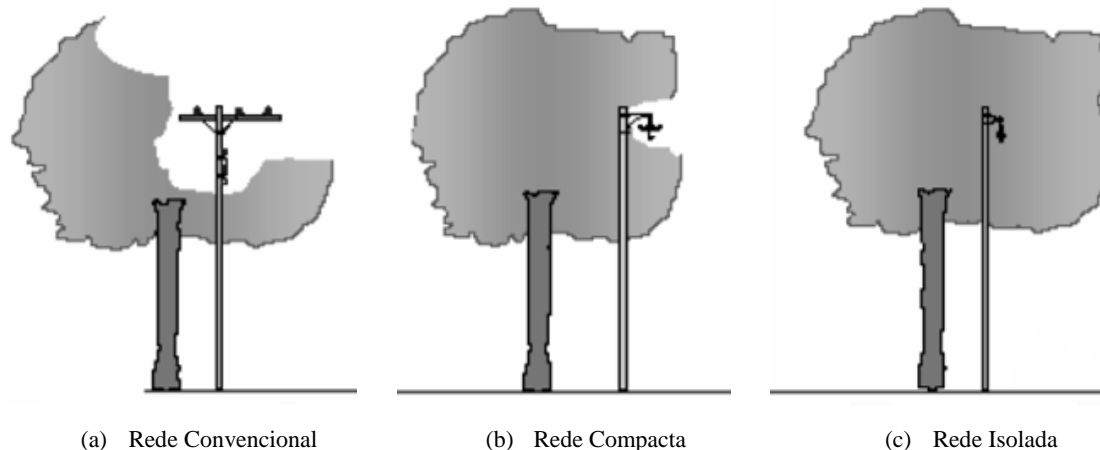


Figura 2.11 - Área de poda de redes aéreas [adaptado de (CELESC, 2012)].

Por utilizarem cabos blindados, as redes isoladas apresentam poucos problemas causados por descargas atmosféricas e contato com partes aterradas. Por essa razão, as redes isoladas são em geral bastante confiáveis, apresentando baixo índice de desligamentos. Contudo, as redes isoladas têm custo de instalação muito alto em comparação com as redes convencionais e compactas, o que se deve à utilização dos cabos blindados.



### **2.2.4 As Redes Subterrâneas**

A rede de distribuição subterrânea é a rede de distribuição que tem maior custo inicial de instalação (CELESC, 2012). O que encarece a implantação dessa rede são as obras civis necessárias para enterrar os cabos e os equipamentos em caixas e dutos, além dos cabos blindados que compõem a rede subterrânea. Com a evolução das técnicas, o preço de instalação das redes subterrâneas diminuiu nas últimas décadas. Por exemplo, na área de concessão da COPEL o custo para instalação inicial destas redes tornou-se seis vezes menor entre os anos de 2000 e 2010 (COPEL, 2010).

Um critério para a instalação das redes subterrâneas é a densidade de carga do local a ser atendido. Quando o local tem densidade de carga igual ou superior a 10 MVA/km<sup>2</sup> a rede subterrânea apresenta retorno de investimento mais rápido em comparação aos demais tipos de redes (CELESC, 2012).

As vantagens da utilização das redes subterrâneas são a proteção da rede contra eventos naturais, a inexistência de abalroamento de veículos com a rede, o número reduzido de desligamentos, a valorização da arquitetura e do urbanismo da localidade atendida e um menor custo de operação e manutenção da rede (COPEL, 2010).

## **2.3 Características das Redes Compactas**

Dentre os tipos de redes de distribuição disponíveis, as distribuidoras de energia elétrica brasileiras têm optado pela adoção das redes compactas como padrão mínimo nos novos projetos de redes de distribuição aéreas em ambiente urbano (FECOERUSC, 2010; CEMIG, 2012). Isso tem feito com que o percentual de utilização de redes compactas no Brasil venha crescendo substancialmente nos últimos anos. Por exemplo, nas redes urbanas do estado de Minas Gerais sob responsabilidade da CEMIG Distribuidora, entre os anos de 2002 e 2015 observou-se um crescimento de 10% para 22% no percentual de uso de redes compactas em comparação com as outras modalidades de redes de distribuição aéreas. Em números absolutos, isso representa um crescimento de 3.000 km para aproximadamente 8.000 km de redes compactas instaladas na área de concessão da CEMIG Distribuidora (UFMG e CEMIG, 2007; SOUZA, 2015).

Não obstante a isso, condições ambientais como poluição e salinidade são aspectos restritivos à instalação de redes compactas em determinadas regiões (SILVA et al., 2012). Isso motivou a realização de testes e melhorias com os materiais usados nas redes compactas, de forma a garantir a sua eficiência em condições de trabalho adversas, tanto do ponto de vista elétrico quanto mecânico (CORTÉS et al., 2014; SILVA et al., 2012).

Os materiais e padrões utilizados em redes compactas são especificados em norma ABNT (2011a). As subseções a seguir apresentam em maior detalhe os materiais e as estruturas empregadas em redes de distribuição compactas no Brasil.

### ***2.3.1 Materiais Empregados***

Cabos cobertos, ferragens, materiais poliméricos, espaçadores e postes são os grupos básicos que compõe as redes compactas (SILVA et al., 2012; ROCHA et al., 2002). Os cabos cobertos têm a função de levar energia elétrica aos consumidores finais. As ferragens têm como função sustentar os cabos cobertos. Os materiais poliméricos e os espaçadores visam manter a isolação entre as partes aterradas e as partes energizadas. Finalmente, os postes suportam os esforços mecânicos e garantem uma altura mínima dos condutores da rede em relação ao solo.

No Brasil, o primeiro material polimérico utilizado como cobertura dos cabos das redes de distribuição compactas foi o polietileno (PE). Com a evolução dos estudos na área, surgiu a cobertura com polietileno reticulado (XLPE), que ganhou o mercado devido à sua maior temperatura de operação, 90° C, e à sua maior temperatura suportável na condição de curto-circuito, que é de 250° C (NÓBREGA et al., 2012). Na Figura 2.12 são apresentados cinco tipos de cabos cobertos por XLPE utilizados em redes de distribuição no Brasil. Em todos os casos, os cabos são de alumínio envolvido com uma cobertura de XLPE. Percebe-se que essa cobertura não segue um padrão de fabricante para fabricante, o que tem impacto direto na qualidade dos cabos fabricados no Brasil (NÓBREGA et al., 2012). Além disso, tem-se verificado que a análise das características de envelhecimento dos cabos cobertos (trilhamento, erosão e oxidação) se baseia em critérios meramente qualitativos e de observação, o que faz do ensaio de aceitação de um cabo coberto um processo que depende da capacidade de análise de quem realiza o ensaio (SILVA et al., 2012).



Figura 2.12 - Cabos cobertos com XLPE produzidos no Brasil [adaptado de (NÓBREGA et al., 2012)].

Na Tabela 2.1 são apresentadas especificações dos cabos cobertos (ABNT, 2011b). Pode-se observar que para a classe de tensão de 15 kV a espessura da cobertura isolante de XLPE é de 3 mm independentemente da seção nominal do cabo. A carga de ruptura mínima deve ser observada no projeto da rede para que não ocorra uma ruptura de cabos devido ao peso da rede. Pela Tabela 2.1 é verificado que quanto maior é a seção nominal do cabo, maior é a carga de ruptura mínima suportada.

Tabela 2.1 - Cabos cobertos com XLPE, classe de tensão 15 kV (ABNT, 2011b).

Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	Número de fios	Carga de Ruptura mínima (kgf)	Espessura Cobertura (mm)
35	7	464	3,0
50	7	663	3,0
70	19	928	3,0
95	19	1259	3,0
120	19	1591	3,0
150	19	1988	3,0
185	37	2452	3,0
240	37	3182	3,0
300	37	3977	3,0

A cobertura de XLPE apresenta características elétricas e mecânicas que são apresentadas na Tabela 2.2. Nela pode-se observar a permissividade relativa, a temperatura máxima de operação, a rigidez dielétrica e a resistência à tração (SILVA, 2000).

Tabela 2.2 - Características elétrica e mecânica da cobertura de XLPE (SILVA, 2000)

Permissividade Relativa	Temperatura Máxima de Operação (°C)	Rigidez Dielétrica (kV/mm)	Resistência a Tração (N/mm <sup>2</sup> )
2,4	125	50	20

As ferragens que compõem a rede compacta são um conjunto composto por arruelas, alças pré-formadas, braços suportes, estribo para espaçador, parafusos e cintas. Entre essas ferragens merecem destaque os braços suportes. Esses podem ser dos tipos “C”, “J” e “L”, vistos na Figura 2.13.

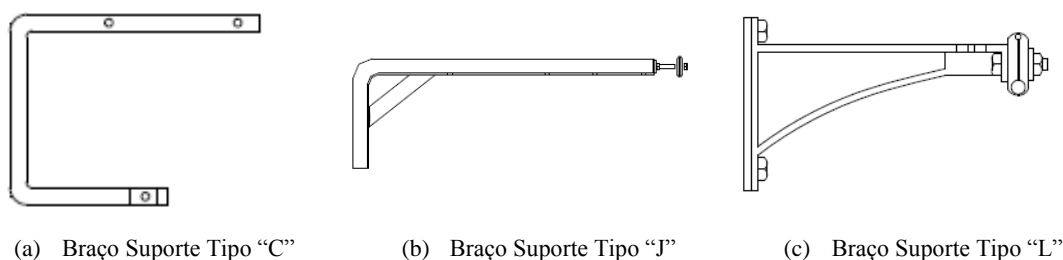


Figura 2.13 - Braços suportes [adaptado de (REDEENERGIA, 2009)].

O braço suporte tipo “C”, mostrado na Figura 2.13 (a), é utilizado em estruturas de rede em ângulo e em final de linha, bem como em derivações e conexões de equipamentos à rede (CEMIG, 2012). O braço suporte tipo “J”, ilustrado na Figura 2.13 (b), é utilizado quando é necessário o afastamento da rede de algum objeto ou também para facilitar a instalação/manutenção de algum equipamento no poste (CEMIG, 2012). Finalmente, o braço suporte tipo “L”, mostrado na Figura 2.13 (c), é aplicado para a passagem da rede em tangência e sustentação do cabo mensageiro (CEMIG, 2012).

Os cabos cobertos são ancorados e fixados nas ferragens através de materiais poliméricos, visto que outros tipos de materiais (porcelana ou vidro) podem causar danos aos cabos cobertos por incompatibilidade elétrica (FECOERUSC, 2010; CEMIG, 2012). Anéis de amarração, espaçadores, separadores, braços anti-balanço, isoladores de pino e isoladores de ancoragem são alguns dos materiais poliméricos encontrados em redes compactas, conforme ilustrado na Figura 2.14.

Os anéis de amarração são utilizados para a fixação do cabo coberto, tanto no isolador de pino quanto nos espaçadores e separadores. Tais anéis podem ser de vários tipos de polímeros; dentre estes, os anéis de silicone mostraram-se mais resistentes a ensaios combinados envolvendo estresses elétricos, mecânicos e químicos quando comparados aos anéis de etilino-propileno-dieno (EPDM) e EPDM com silicone (SILVA et al., 2012). Os espaçadores losangulares e os separadores verticais são dispostos ao longo da rede para manter a distância entre os condutores. A quantidade de espaçadores utilizados em um vão é função do comprimento do vão e das estruturas que ancoram o cabo mensageiro (CPFL, 2009; REDEENERGIA, 2009).

Para a redução da vibração mecânica das redes compactas são utilizados os braços anti-balanço. Os isoladores de pino são utilizados para a realização de ângulos na rede, enquanto os isoladores de ancoragem, para a terminação de linhas.

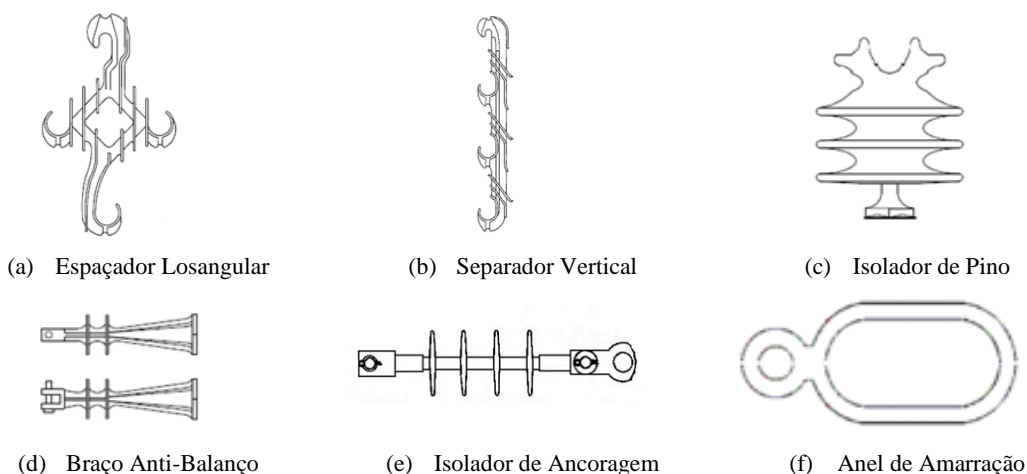


Figura 2.14 - Materiais poliméricos utilizados em redes compactas [adaptado de (REDEENERGIA, 2009)].

Os postes utilizados nas redes compactas, que podem ser de madeira ou concreto (circular ou duplo T), são os mesmos das redes convencionais, desde que sejam atendidos os dimensionamentos mecânicos e os afastamentos elétricos necessários (CPFL, 2009). Na Figura 2.15 vê-se que os postes, além de suportarem a rede, também são usados para a instalação de equipamentos, devendo a sua especificação levar em consideração tal fato (CEMIG, 2012). Postes de concreto são os mais utilizados, sejam circular ou duplo T, ficando a utilização de postes de madeira restrita a situações bem específicas (FECOERUSC, 2010).

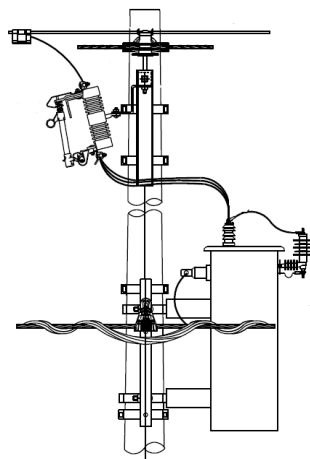


Figura 2.15 - Poste sustentando transformador trifásico com chave fusível (CEMIG, 2012).

Nas redes de distribuição compactas, um cabo de aço nu denominado mensageiro realiza a sustentação da rede ao longo do vão. Este cabo fica na posição superior do espaçador losangular ilustrado na Figura 2.14 (a) e do separador polimérico ilustrado na Figura 2.14 (b). O cabo mensageiro pode estar a 30 cm dos cabos energizados, no caso das estruturas CM2 e CE2, ou a 50 cm dos cabos energizados, no

caso das estruturas CM3 e CE3 (CEMIG, 2012). O fato de o cabo mensageiro ser o cabo na posição mais alta da estrutura o torna o ponto preferencial para a incidência de uma descarga atmosférica direta (VISACRO, 2005). Além disso, existem estudos onde se mostra que o desenvolvimento do canal ascendente de descarga ocorre com maior intensidade em cabos nus do que em cabos cobertos (YOKOYAMA et al., 1999; YOKOYAMA et al., 2010). Esses são fatores que demonstram que o cabo mensageiro é o ponto preferencial para a incidência de uma descarga atmosférica direta em redes compactas.

O aterramento do cabo mensageiro é feito através de hastes de aterramento colocadas próximas ao poste (CEMIG, 2012). Em geral, na CEMIG são realizados aterramentos em todas as estruturas com equipamentos instalados, em finais de linhas (estruturas CM3 e CE3) ou em intervalos máximos de 200 m. Nos primeiros dois casos, são utilizadas tipicamente três hastes de aterramento. No caso de aterramentos periódicos ao longo da rede, emprega-se apenas uma haste de aterramento. Em todos os pontos de aterramento o cabo mensageiro é conectado ao neutro da rede distribuição, que no sistema elétrico da CEMIG está presente em todas as estruturas a partir da saída da subestação de distribuição (CEMIG, 2012; VISACRO et al., 2007).

### ***2.3.2 Estruturas Básicas de Redes Compactas***

A nomenclatura dada às estruturas das redes de distribuição compactas apresenta variações de concessionária a concessionária (CELESC, 2012; CEMIG, 2012; FECOERUSC, 2010; CPFL, 2009). No escopo deste trabalho é utilizada a nomenclatura adotada pela CEMIG, em que o nome da estrutura é composto por duas letras iniciais seguidas de um número. As duas letras estão relacionadas ao tipo de rede. Nesse caso, “CE” significa “compacta em espaçadores” e “CM” significa “compacta monofásica” (CEMIG, 2012). O número que segue as duas letras iniciais está relacionado ao 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). Nesse contexto, as principais estruturas de redes compactas utilizadas na CEMIG são as estruturas CM1, CM2, CM3, CE1, CE2 e CE3.

Em alguns casos pode aparecer um “S” na nomenclatura da estrutura, como em CM1S e CE1S. Nesses casos, o “S” significa “sem braço anti-balanço”. Por exemplo, na

Figura 2.16 é apresentada a estrutura CM1S. Este tipo de estrutura é empregado em linhas monofásicas em situação de vãos em tangência. Os materiais que a compõem são: cintas de aço, braço suporte tipo “L”, espaçador monofásico com amarração, cabo mensageiro, estribo, parafusos e arruelas (CEMIG, 2012).

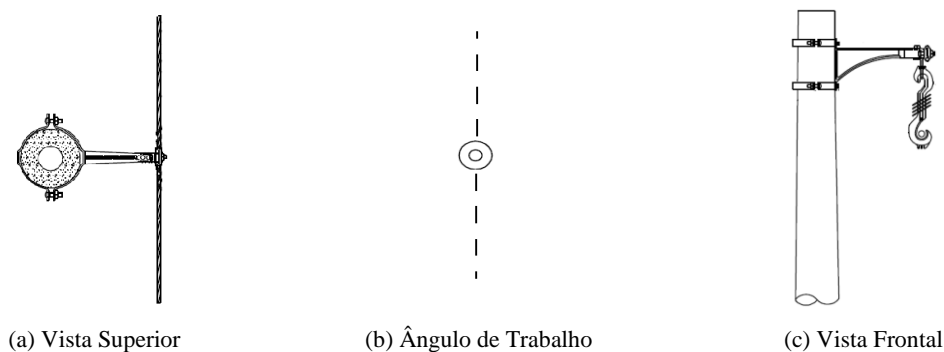


Figura 2.16 - Estrutura CM1S [adaptado de (CEMIG, 2012)].

Na Figura 2.17 é apresentada a estrutura CM1, também utilizada em linhas monofásicas, que é composta por cintas de aço, braço suporte tipo “L”, espaçador monofásico com amarração, braço anti-balanço, cabo mensageiro, estribo, parafusos e arruelas (CEMIG, 2012). Nesta estrutura, diferentemente da CM1S, é utilizado um braço anti-balanço, que tem a função de manter a estabilidade mecânica da rede, tanto para evitar que a rede balance com o vento quanto para evitar vibrações na ocorrência de uma falha elétrica, como um curto-circuito.

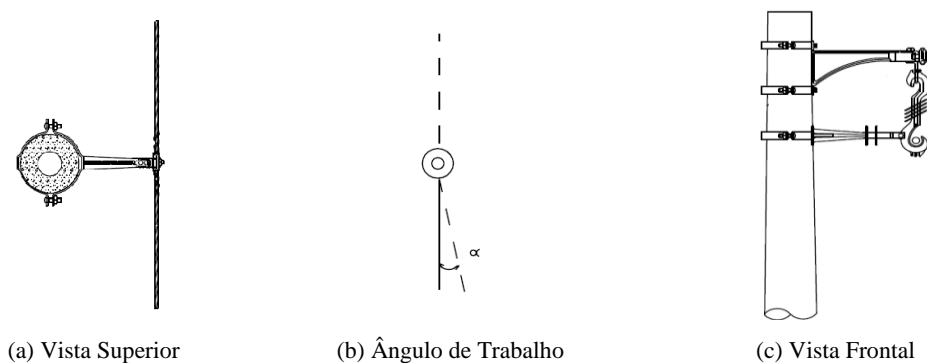


Figura 2.17 - Estrutura CM1 [adaptado de (CEMIG, 2012)].

A estrutura CM2, apresentada na Figura 2.18, é composta por braço suporte tipo “L”, cintas, isolador tipo pino polimérico, cabo mensageiro, olhal, parafusos e arruelas. Os cabos cobertos são presos no isolador de pino através de anéis elastoméricos. Esta estrutura é utilizada para fazer ângulos, bem como para dar estabilidade mecânica à rede.

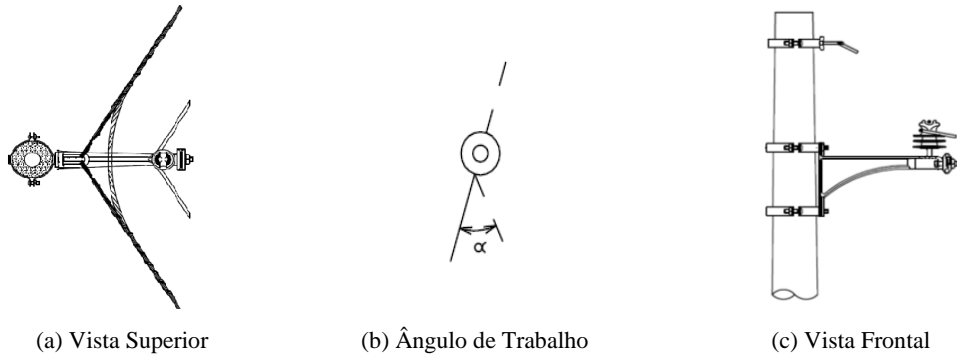


Figura 2.18 - Estrutura CM2 [adaptado de (CEMIG, 2012)].

A estrutura CM3, ilustrada na Figura 2.19, é utilizada em finais de linhas monofásicas. Ela é constituída de isolador de ancoragem polimérico, cinta, olhal, cabo mensageiro, parafusos, arruelas e, de acordo com a prática adotada pela CEMIG, para-raios de ZnO com invólucro polimérico.

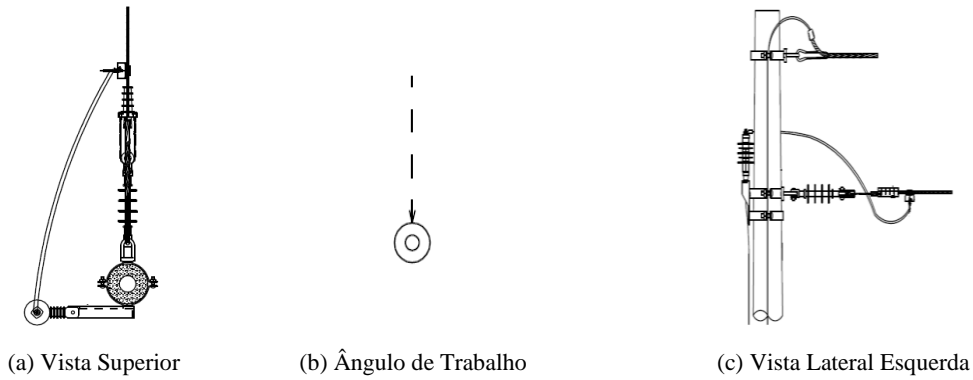


Figura 2.19 - Estrutura CM3 [adaptado de (CEMIG, 2012)].

Na Figura 2.20 é apresentada a estrutura CE1S, empregada em redes trifásicas. Este tipo de estrutura trabalha em vãos em tangência. Os materiais que a compõem são cintas de aço, braço suporte tipo “L”, espaçador losangular polimérico com amarração, cabo mensageiro, estribo, parafusos e arruelas (CEMIG, 2012).

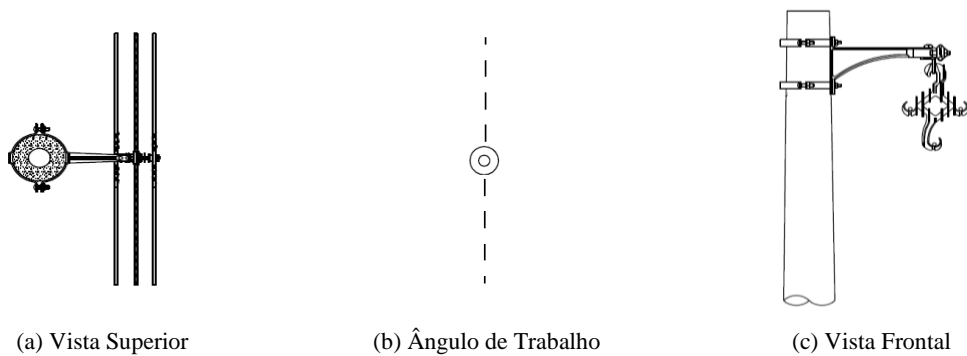


Figura 2.20 - Estrutura CE1S [adaptado de (CEMIG, 2012)].



A estrutura CE1, apresentada na Figura 2.21, contém todos os materiais da estrutura CE1S mais um braço anti-balanço. Esta estrutura trabalha com um ângulo de até seis graus. Em situação de alinhamento de rede devem ser intercaladas estruturas CE1 e estruturas CE1S. As estruturas do tipo CE1 garantem maior estabilidade eletromecânica e, na ocorrência de curtos-circuitos minimizam as oscilações na rede (CEMIG, 2012).

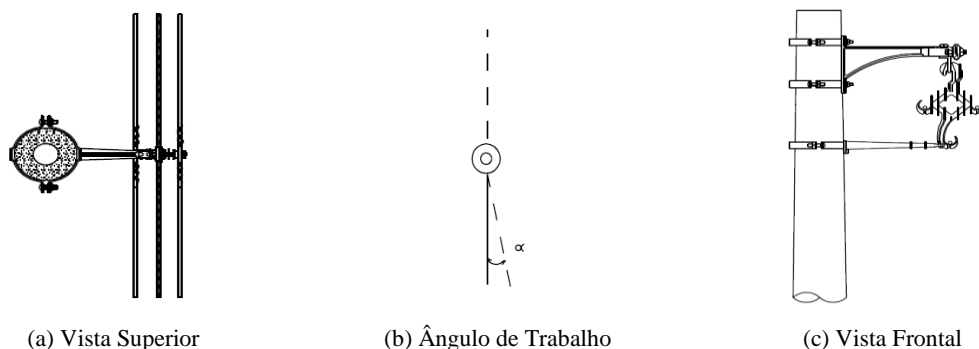


Figura 2.21 - Estrutura CE1 [adaptado de (CEMIG, 2012)].

Na Figura 2.22 é mostrada a estrutura CE2, empregada em redes trifásicas. Ela é composta de cintas de aço, braço suporte tipo “C”, isoladores de pino, anéis de amarração, cabo mensageiro, olhal, parafusos e arruelas. Esta estrutura trabalha fazendo ângulos na rede de até sessenta graus. Em situação de alinhamento de rede devem ser intercaladas estruturas tipo CE1S (CEMIG, 2012).

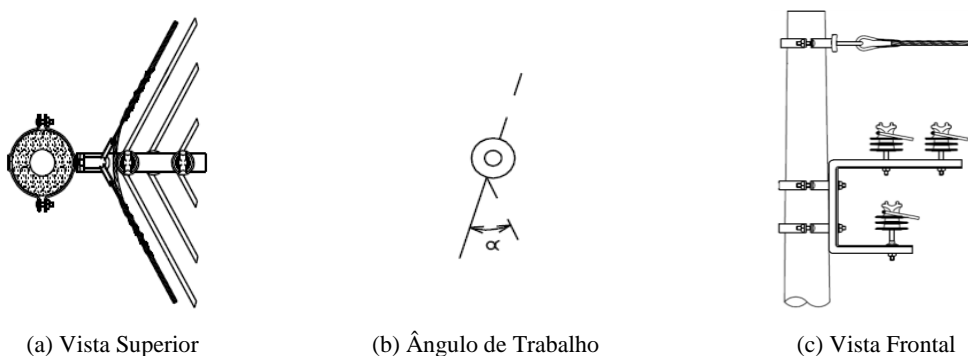


Figura 2.22 - Estrutura CE2 [adaptado de (CEMIG, 2012)].

A estrutura CE3, ilustrada na Figura 2.23, é utilizada em finais de linhas trifásicas. Os materiais que compõem esta estrutura são cintas de aço, braço suporte tipo “C”, cantoneira reta, isolador de ancoragem, cabo mensageiro, olhal, grampo de ancoragem, parafusos e arruelas (CEMIG, 2012).

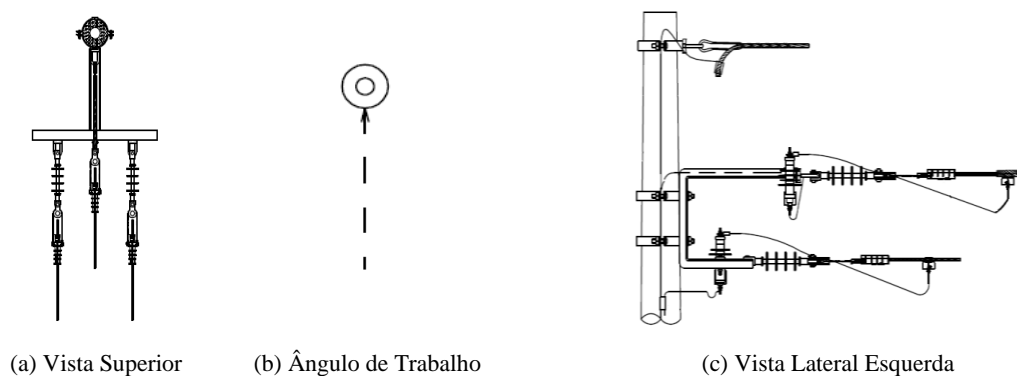


Figura 2.23 - Estrutura CE3 [adaptado de (CEMIG, 2012)].

Além das estruturas citadas existem variações que podem ser utilizadas em casos específicos, como na transição de rede convencional para rede compacta. Uma descrição destas estruturas pode ser encontrada, por exemplo, nos manuais de instalação da CEMIG e demais concessionárias (CEMIG, 2012).

# **3 Modelos e Parâmetros para a Caracterização da Suportabilidade de Estruturas Frente a Sobretensões Impulsivas**

## **3.1 Introdução**

As principais causas de desligamentos não programados nas redes de distribuição aéreas não isoladas são os contatos com partes aterradas e as sobretensões associadas aos efeitos diretos e indiretos de descargas atmosféricas (VISACRO, 2005; ROCHA et al., 2012; CAMPOS, 2012). Para prevenir a ocorrência de desligamentos devidos ao contato com partes aterradas, as empresas de distribuição de energia elétrica fazem a poda periódica das árvores próximas às redes (ROCHA et al., 2012). Já as descargas atmosféricas são um fenômeno complexo e de natureza aleatória. No estado de Minas Gerais, por exemplo, a densidade de descargas atmosféricas é, em média, de 4 descargas/km<sup>2</sup>/ano. Já no estado da Bahia, essa média cai para 1 descarga/km<sup>2</sup>/ano (VISACRO, 2005; ROCHA et al., 2012).

Os efeitos diretos de descargas atmosféricas decorrem de sua incidência direta em algum equipamento, estrutura ou linha pertencente à rede de distribuição afetada. Os efeitos indiretos decorrem da incidência de descargas atmosféricas na vizinhança da rede de distribuição, geralmente no solo ou em alguma estrutura elevada, como árvores, torres e edificações não conectadas à rede, se manifestando na forma de tensões

induzidas associadas aos campos eletromagnéticos gerados pela descarga (DE CONTI, 2001). As tensões induzidas por descargas indiretas atingem valores que dependem da forma de onda e da amplitude da corrente de descarga (DE CONTI et al., 2010), podendo atingir, tipicamente, até 300 kV (VISACRO, 2005). No caso de descargas diretas, as tensões resultantes podem atingir milhões de volts (DE CONTI, 2006). Pode-se afirmar, portanto, que os efeitos diretos de descargas atmosféricas são muito mais severos do que os efeitos indiretos, embora sejam bem menos frequentes.

Sobretensões geradas por descargas atmosféricas apresentam forma de onda com tempo de crescimento típico de até alguns microssegundos e tempo de decaimento típico de dezenas de microssegundos ou menos. Do exposto, percebe-se que redes de distribuição aéreas estão expostas a níveis elevados de tensões impulsivas, devendo ser capazes de responder satisfatoriamente a estas solicitações para uma melhor continuidade do fornecimento de energia e uma redução dos danos causados por descargas atmosféricas.

Em redes convencionais, o meio isolante entre os condutores energizados e os elementos aterrados da rede é o ar. Na ocorrência de uma falha de isolamento causada por sobretensões de origem atmosférica, o meio isolante se regenera após a interrupção da corrente de curto-circuito subsequente. Assim, o comportamento da estrutura é teoricamente o mesmo antes e depois da disrupção. No caso de redes de distribuição compactas, existe entre a parte condutora do cabo e o ar uma camada isolante de material polimérico. A presença desta camada faz com que o comportamento do meio isolante após a ocorrência de uma falha de isolamento causada por descargas atmosféricas não seja exclusivamente regenerativo, o que requer especial atenção nos testes realizados em laboratório para a definição da suportabilidade de estruturas de redes compactas frente a sobretensões impulsivas.

Na seção 3.2 são apresentadas metodologias para a realização de testes e determinação de parâmetros para modelos de suportabilidade de redes de distribuição compactas, com cabos nus e cobertos, frente a impulsos atmosféricos padronizados. Na seção 3.3 são apresentadas metodologias para a determinação de parâmetros para modelos de suportabilidade de redes de distribuição compactas utilizando cabos nus frente a impulsos atmosféricos não padronizados.

## 3.2 Parâmetros Normalizados para a Definição da Suportabilidade de Estruturas de Redes de Distribuição frente a Sobretensões Impulsivas

Para o estudo em laboratório da suportabilidade de materiais e equipamentos elétricos frente a sobretensões impulsivas de origem atmosférica, utiliza-se uma forma de onda de tensão padronizada (ABNT, 2013). Essa forma de onda de tensão, gerada com a descarga de um conjunto de capacitores em um circuito RC (KUFFEL, 2000), consiste em uma onda do tipo dupla exponencial com tempos de frente e de meia onda de 1,2  $\mu\text{s}$  e 50  $\mu\text{s}$ , respectivamente. Na Figura 3.1 é apresentada uma onda de tensão impulsiva gerada em laboratório.

Na norma ABNT (2013) estão previstos limites aceitáveis de tolerância entre os valores especificados e os obtidos em laboratório. Para o tempo de frente (1,2  $\mu\text{s}$ ), é aceitável uma variação de  $\pm 30\%$ ; para o tempo até meia onda (50  $\mu\text{s}$ ), é aceitável uma variação de  $\pm 20\%$ ; finalmente, para o valor de pico da tensão é permitida uma variação de  $\pm 3\%$  (ABNT, 2013).

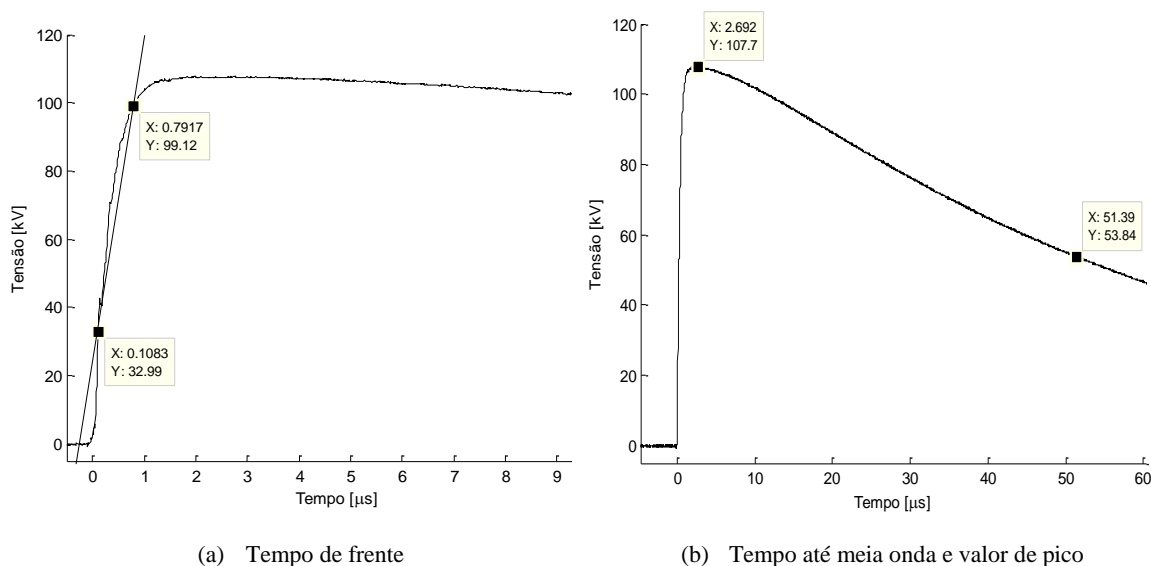


Figura 3.1 - Onda impulsiva padronizada.

A forma de onda apresentada na Figura 3.1 foi utilizada neste trabalho para avaliar a suportabilidade de estruturas de redes de distribuição compactas frente a impulsos atmosféricos normalizados. O tempo de frente pode ser calculado através da

multiplicação do intervalo de tempo decorrido entre os instantes em que a onda impulsiva atinge 30% e 90% do seu valor de pico por 1,667 (ABNT, 2013). Por meio da Figura 3.1 (a), em que estão marcados os valores em questão, percebe-se que o tempo de frente obtido em laboratório é de 1,14  $\mu\text{s}$ , o que está dentro da tolerância de  $\pm 30\%$  prevista (faixa de 0,84  $\mu\text{s}$  a 1,56  $\mu\text{s}$ ). Quando aplicada uma tensão impulsiva de amplitude de 110 kV, é medida uma tensão no objeto de teste de 107,7 kV, conforme ilustrado na Figura 3.1 (b), que está na faixa permissível de 106,7 kV a 113,3 kV. O tempo até meia onda é de 51,39  $\mu\text{s}$  (faixa permissível de 40  $\mu\text{s}$  a 60  $\mu\text{s}$ ).

Nos ensaios realizados em laboratório, verificou-se uma redução do tempo de frente virtual da tensão aplicada com o aumento do nível de tensão. Contudo, os tempos de frente estimados variaram de 0,92  $\mu\text{s}$  a 1,21  $\mu\text{s}$ , que estão dentro da faixa permissível. Por outro lado, o tempo de meia onda sofreu pequena variação, permanecendo na faixa de 50  $\mu\text{s}$  a 52  $\mu\text{s}$ .

### **3.2.1 *Redes Aéreas com Cabos Nus***

O meio dielétrico utilizado para isolamento das partes aterradas e energizadas em redes aéreas com cabos nus é o ar. O ar pode ser modelado como um gás ideal e desta forma obedece à teoria cinética clássica dos gases. De forma geral, nesta teoria é proposto um modelo onde o gás tem as seguintes características: as moléculas que compõem o gás são esféricas e de mesma massa, as moléculas estão em movimento contínuo e aleatório, as colisões que ocorrem entre as moléculas do gás são perfeitamente elásticas, o caminho médio entre as colisões é muito maior que o diâmetro das moléculas e a força que existe entre as moléculas e entre as moléculas e o recipiente que contem o gás é desprezível (KUFFEL, 2000).

O ar, como qualquer outro dielétrico, tem a condução de corrente elétrica restrita ao caso de os elétrons ganharem energia suficiente para saírem da banda de valência, vencerem a banda proibida e chegarem até a banda de condução, conforme ilustrado na Figura 3.2 (a) (HAYT, 2003). Existem basicamente quatro formas de um elétron adquirir essa energia: emissão fotoelétrica, emissão por impacto de íons positivos e átomos excitados, emissão termiônica e emissão de campo (KUFFEL, 2000).

No ar, após a ocorrência de uma descarga elétrica disruptiva, o meio retoma suas características iniciais e por isso é chamado de autorrecuperante (ABNT, 2013). As formas usuais de se obter em laboratório as características de suportabilidade de um dielétrico autorrecuperante se dão por meio de ensaios de tensão de descarga disruptiva a 50% e obtenção da curva tensão-tempo ( $U_{xt}$ ) (ABNT, 2013; KUFFEL, 2000).

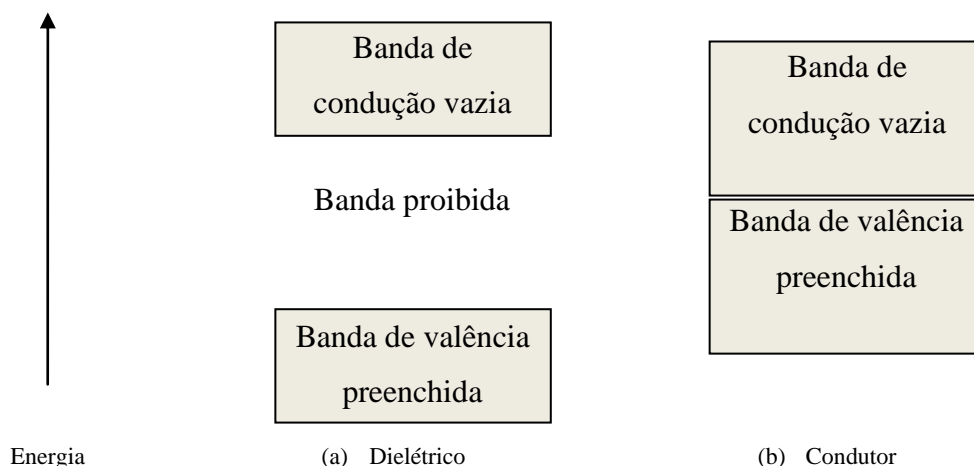


Figura 3.2 - Bandas de energia em materiais condutores e dielétricos [adaptado (HAYT, 2003)].

### 3.2.1.1 Tensão de Descarga Disruptiva a 50%

A tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), também conhecida na literatura internacional como CFO (*Critical Flashover Overvoltage*), corresponde ao valor de pico da onda impulsiva aplicada ao material dielétrico que leva à probabilidade de 50% de ocorrência de uma descarga disruptiva (ABNT, 2013; KUFFEL, 2000).

Kuffel (2000) discute três formas de se obter  $U_{50}$ , denominados método multi-nível (*multi-level method*), método de acréscimos e decréscimos (*up and down method*) e método de acréscimos e decréscimos estendido (*extended up and down method*) (KUFFEL, 2000). Dentre estes, a forma mais utilizada é o método de acréscimos e decréscimos, que é a metodologia normatizada para se obter  $U_{50}$  segundo a norma ABNT (2013).

No método de acréscimos e decréscimos, o primeiro nível da tensão impulsiva aplicada é o valor estimado de  $U_{50}$  fornecido pelo fabricante. Caso esse valor não seja fornecido ou conhecido, o valor inicial deve ser baixo o suficiente para que não ocorra disrupção no primeiro impulso aplicado sobre o objeto testado. Após a aplicação desse

primeiro impulso, caso não ocorra a disrupção (representada por O na Figura 3.3) o valor de pico da tensão aplicada no próximo impulso deve ser  $\Delta V$  maior. Caso ocorra a disrupção (representada por X na Figura 3.3), o valor de pico da tensão aplicada no próximo impulso deve ser  $\Delta V$  menor. O valor de  $\Delta V$  é escolhido dentro da faixa de 1,5% e 3% do valor estimado de  $U_{50}$  (ABNT, 2013).

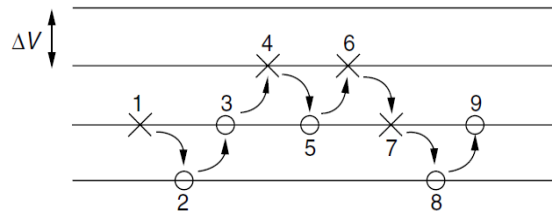


Figura 3.3 - Método dos acréscimos e decréscimos [adaptado de (KUFFEL, 2000)].

A garantia da validade estatística do valor de  $U_{50}$  obtido está vinculada à quantidade de impulsos aplicados. É previsto em norma o mínimo de vinte impulsos úteis para o método dos acréscimos e decréscimos. Só devem ser considerados úteis os impulsos após a primeira disrupção, que serve como ponto de partida para a contagem da quantidade mínima de impulsos a serem aplicados (ABNT, 2013; KUFFEL, 2000).

Após a obtenção de no mínimo vinte valores de pico referentes aos impulsos aplicados, deve-se proceder à análise estatística destes valores para se determinar  $U_{50}$ . Em (3.1) e (3.2) são apresentadas as expressões necessárias para a determinação de  $U_{50}$  e também do desvio padrão associado,  $\sigma$  (KUFFEL, 2000). Este equacionamento supõe que os dados obtidos possam ser representados através de uma distribuição normal. Quanto mais valores forem obtidos mais confiáveis são os resultados gerados.

$$U_{50} = U_0 + \Delta V \cdot \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (3.1)$$

$$\sigma = 1,62 \cdot \Delta V \cdot \left( \frac{N \cdot B + A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (3.2)$$

onde

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad (3.3)$$



$$A = \sum_{i=1}^k i n_i \quad (3.4)$$

$$B = \sum_{i=1}^k i^2 n_i \quad (3.5)$$

Nas equações (3.1) a (3.5),  $U_0$  é o menor valor de tensão observado nos dados amostrados,  $k$  é a quantidade verificada de níveis distintos de tensões,  $i$  é o contador referente a cada nível de tensão e  $n_i$  é o número de disrupções que ocorreram neste nível de tensão. Em (3.1), o sinal negativo deve ser utilizado quando o número de disrupções observadas for maior que o número de amostras sem disrupções. Caso contrário, deve-se utilizar o sinal positivo.

Obtidos os valores de  $U_{50}$  e  $\sigma$ , pode-se também calcular a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) e a tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) (ABNT, 2013).

$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3\sigma) \quad (3.6)$$

$$U_{90} = U_{50} \cdot (1 + 1,3\sigma) \quad (3.7)$$

De posse dos valores de  $U_{50}$ ,  $U_{10}$  e  $U_{90}$  realiza-se a correção para as condições de referência de temperatura ( $t_0 = 20^\circ \text{ C}$ ), pressão ( $p_0 = 1.013 \text{ hPa}$ ) e umidade ( $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ ). Os resultados de  $U_{50}$ ,  $U_{10}$  e  $U_{90}$  apresentados nesta dissertação estão corrigidos para estas condições de referência, que estão previstas em norma ABNT (2013). O valor padronizado de  $U_{50}$  utilizado para a realização das correções dos valores obtidos em laboratório para as condições de referência foi de 110 kV. Durante a realização dos ensaios com as estruturas da rede compacta monofásica utilizando cabos nus, a temperatura ambiente variou na faixa de  $22^\circ \text{ C}$  a  $28^\circ \text{ C}$ , enquanto a umidade relativa variou de 55% a 82%. A pressão no laboratório se manteve constante e igual a 699 mmHg.

### 3.2.1.2 *Curvas Uxt*

Com a evolução dos estudos sobre coordenação de isolamento, percebeu-se que o nível de suportabilidade de um material dielétrico, seja ele sólido, líquido ou gasoso,

não é função somente da amplitude da tensão impulsiva aplicada, mas também do tempo que o dielétrico fica exposto à solicitação (HAGENGUTH, 1941).

Uma maneira simplificada de se levar em conta o tempo na avaliação da suportabilidade de um material dielétrico consiste na utilização das curvas tensão-tempo (Uxt). As curvas Uxt são obtidas experimentalmente aplicando-se uma tensão impulsiva de valor de pico ajustável e verificando-se o instante no qual ocorre a ruptura no material. De forma sucessiva, aumenta-se o valor de pico da tensão impulsiva aplicada e faz-se o registro dos tempos de ruptura ( $T_d$ ) observados (ABNT, 2013). Os valores de pico das tensões impulsivas amostrados devem ser corrigidos para as condições de referência conforme sugerido em norma ABNT (2013).

Em (3.8) é apresentada a função que melhor aproxima o comportamento dos pontos amostrados em laboratório, proposta por Kuffel (2000). Nesta equação,  $U(t)$  e  $A$  são dados em kV,  $t$  em  $\mu\text{s}$  e  $B$  em  $\text{kV}\cdot\mu\text{s}$ .

$$U(t) = A + B \cdot t^n \quad (3.8)$$

As constantes  $B$  e  $n$  podem ser determinadas a partir dos pares de pontos que caracterizam a curva Uxt através do método dos mínimos quadrados, partindo-se da hipótese da variação de  $A$  em uma faixa de 0 a  $U_{50}$ . Os valores escolhidos para a representação da curva Uxt são aqueles que produzem o menor desvio em relação aos pontos amostrados em laboratório. Para avaliar o quão próxima está a curva aproximada dos dados reais amostrados, pode ser utilizado o coeficiente de regressão ( $R^2$ ). Quanto mais próxima da unidade estiver o parâmetro  $R^2$ , melhor é a qualidade da aproximação (GUIMARÃES, 2008).

Na Figura 3.4 são apresentadas em traço fino as curvas de tensão que levaram à ruptura de um meio dielétrico testado em laboratório, e também uma curva em traço grosso referente à curva Uxt obtida através do método dos mínimos quadrados e da equação (3.8).

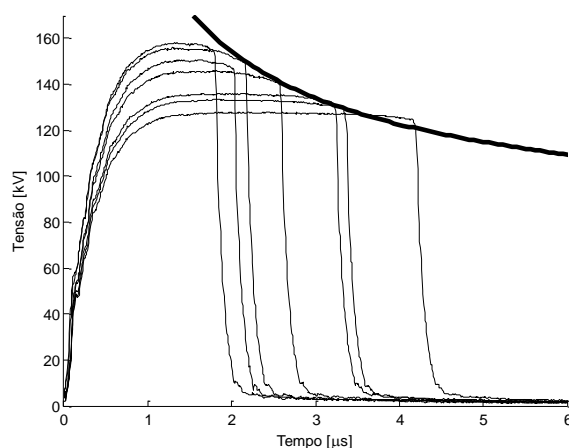


Figura 3.4 - Curva Uxt.

Hagenguth (1941) observou, através de ensaios laboratoriais, que as curvas Uxt não seriam capazes de determinar a suportabilidade dielétrica de materiais isolados frente a impulsos atmosféricos não padronizados. Assim, as curvas Uxt devem ser utilizadas com os devidos cuidados e ressalvas na avaliação da suportabilidade de estruturas frente a sobretensões de origem atmosférica (CAMPOS, 2012).

### 3.2.2 *Redes Aéreas com Cobertura Isolante*

A cobertura isolante utilizada nos cabos das redes compactas faz com que exista mais uma camada dielétrica entre o condutor energizado e as partes aterradas. Essa cobertura isolante, formada por XLPE, encontra-se em estado sólido e apresenta estruturas cristalinas.

Sólidos cristalinos são estruturas atômicas que apresentam uma organização interna uniforme e que podem ser condutivas ou isolantes. Nestes sólidos, os átomos estão muito próximos entre si; há muitos elétrons presentes e também muitos níveis permissíveis de energia disponíveis, sendo permitido para um elétron mudar de nível caso ele adquira energia suficiente (HAYT, 2003). Os elétrons com maior nível de energia estão situados na banda de valência. A banda de valência pode estar mais próxima ou mais afastada da banda de condução. Esse fato determina se o material sólido será um condutor ou um dielétrico, conforme ilustrado na Figura 3.2. Caso a banda de valência e a banda de condução estejam ligadas, o sólido será um condutor, como mostra a Figura 3.2 (b), e um pequeno campo externo é suficiente para que haja a condução de corrente no material, pois não existe uma banda proibida a ser vencida

pelos elétrons. Caso as bandas de valência e de condução estejam separadas pela banda proibida, situação ilustrada na Figura 3.2 (a), a energia que deve ser fornecida aos elétrons para que eles saiam da banda de valência e possam se deslocar para a banda de condução é grande, o que dificulta o processo de condução de corrente em dielétricos (HAYT, 2003). Entretanto, pode ocorrer de a energia fornecida ao material dielétrico sólido ser suficiente para que os elétrons saiam da banda de valência e atinjam a banda de condução. Quando isso ocorre, o material isolante é rompido e se verifica a disrupção elétrica do meio. Nesse caso, o material dielétrico perde as suas características iniciais. Este tipo de isolamento é também conhecido como isolamento não autorrecuperante (ABNT, 2013).

A norma ABNT (2013) apresenta três tipos de ensaios de tensão suportável a impulso atmosférico para aceitação ou não de um objeto que tenha parte de sua isolamento constituída de materiais não autorrecuperantes, a saber, os procedimentos do tipo A, B, e C (ABNT, 2013).

No procedimento do tipo A, três impulsos atmosféricos são aplicados ao objeto ensaiado. Se qualquer disrupção elétrica ocorrer no material não autorrecuperante, o objeto deve ser rejeitado. No procedimento do tipo B, quinze impulsos atmosféricos são aplicados. Caso ocorra disrupção no material não autorrecuperante, o objeto deve ser rejeitado. Caso ocorram no máximo duas disrupções na isolamento autorrecuperante do objeto ensaiado, ele deve ser aprovado. No procedimento do tipo C, três impulsos atmosféricos são aplicados. Caso ocorra disrupção no material não autorrecuperante, o objeto deve ser rejeitado; caso ocorra uma disrupção elétrica na parte autorrecuperante do objeto, nove outros impulsos devem ser aplicados. Se for observada mais alguma disrupção elétrica no objeto, este deve ser rejeitado (ABNT, 2013).

Os três procedimentos de ensaios para objetos com isolamento não autorrecuperante têm uma característica em comum: caso ocorra uma disrupção elétrica decorrente da aplicação da tensão suportável a impulsos atmosférico sobre o objeto, o mesmo deve ser reprovado no teste. Por outro lado, caso o objeto seja constituído de partes autorrecuperante e não autorrecuperante, caso ocorram disrupções na parte autorrecuperante o objeto ainda pode ser aprovado desde que atenda aos quesitos dos procedimentos B ou C.

Em cabos cobertos, na ocorrência de uma disrupção, na maioria das vezes tanto o ar quanto a cobertura isolante do cabo são levados à disrupção. Sendo assim, a cada ensaio em que ocorra uma falha na isolação, o cabo coberto ensaiado perde as suas características iniciais e, dessa forma, o ensaio se torna destrutivo e o meio deve ser considerado como não autorrecuperante.

Além disso, a cada impulso aplicado geram-se cargas na superfície entre os dois meios dielétricos (ar/cobertura do cabo). Essa carga superficial determina o aparecimento de uma tensão  $V_0$  de sinal oposto ao da tensão aplicada, conforme ilustrado na Figura 3.5 (NAKAMURA et al., 1986). Deste modo, a cada impulso aplicado uma tensão oposta, cada vez maior, estará presente entre a cobertura do cabo e o condutor. Isso faz com que não exista independência estatística entre os impulsos aplicados. Para contornar este problema e fazer com que cada ensaio seja teoricamente independente do anterior, é necessário que se realize a remoção da carga estática acumulada no cabo coberto após cada impulso aplicado. No contexto desta dissertação, tal remoção foi feita utilizando-se uma escova metálica aterrada. Este procedimento elimina a tensão  $V_0$  e garante a independência de ensaios sucessivos.

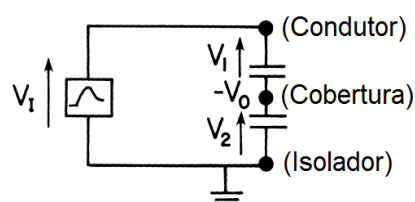


Figura 3.5 - Circuito equivalente [adaptado de (NAKAMURA et al., 1986)].

Neste trabalho, a tensão suportável a impulsos atmosféricos de cabos cobertos foi determinada através de dois tipos de ensaios, denominados ensaio I e ensaio II. Em ambos os ensaios, o cabo ensaiado foi submetido a tensões impulsivas de módulo crescente com variação de 10 kV entre os diferentes níveis de tensão até ser observada a disrupção dielétrica. Em cada nível de tensão, foram aplicados cinco impulsos atmosféricos padronizados. Entre cada uma das aplicações, foi feita a remoção das cargas acumuladas na cobertura isolante. A diferença entre os ensaios I e II reside no fato de o ensaio I considerar um cabo coberto novo e o ensaio II considerar o cabo coberto que sofreu disrupção no ensaio I. Em outras palavras, no ensaio II utilizou-se um cabo coberto perfurado. Com esses dois tipos de ensaios foram determinadas as

tensões impulsivas padronizadas que levam os cabos cobertos instalados em estruturas da rede compacta à disrupção. Com raras exceções, para cada estrutura ensaiada foram realizados cinco ensaios do tipo I e cinco ensaios do tipo II. As particularidades dos ensaios realizados em cada estrutura são descritas em maiores detalhes no Capítulo 4, antes da apresentação dos resultados para cada estrutura. Na Figura 3.6 é mostrado um diagrama com os procedimentos gerais de ensaio.

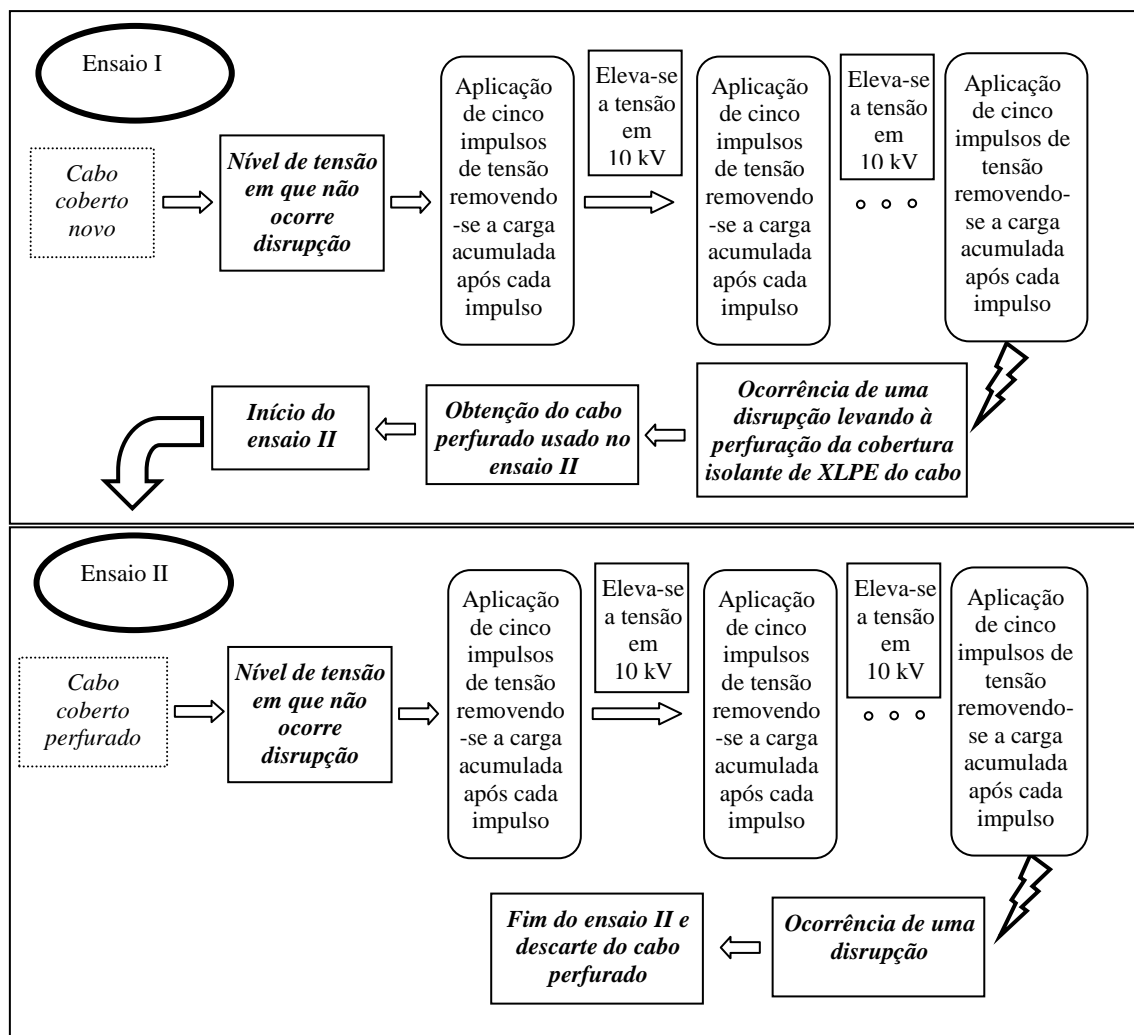


Figura 3.6 - Procedimentos de ensaios realizados com cabos cobertos.

Os ensaios propostos e realizados neste trabalho buscam determinar o nível de suportabilidade das redes compactas com cabos cobertos frente a solicitações de origem atmosférica. Essa finalidade difere do objetivo dos ensaios propostos na norma ABNT (2013), que é a aceitação ou não de algum objeto depois de aplicados os procedimentos tipo A, B e C. Respeitando-se a finalidade de cada tipo de ensaio, pode-se dizer que os ensaios apresentados neste trabalho são mais rigorosos que os apresentados em norma

para meios e materiais não autorrecuperantes. Essa observação leva em conta o fato de a quantidade de impulsos utilizados neste trabalho ser maior que a quantidade de impulsos previstos em norma para os ensaios tipo A e C.

Após a obtenção dos valores de tensão que levaram as estruturas à ruptura, realizou-se a correção destes valores para as condições ambientais normatizadas, ou seja, temperatura = 20° C, pressão = 1.013 hPa e umidade = 11 g/m<sup>3</sup>. Utilizou-se para isso a formulação apresentada na norma ABNT (2013) considerando-se a correção dos valores individualmente. Considerou-se como tensão de referência necessária na formulação a média dos valores de tensão disruptiva medidos e, como menor distância de arco, a distância observada entre os furos na cobertura isolante do cabo e a parte aterrada da estrutura. Para cada ensaio foi realizada uma correção individualizada dos valores de tensão com seus respectivos fatores de correção. Nos ensaios se observou que, em laboratório, a temperatura assumiu valores entre 19° C e 27° C, a umidade variou entre 55% e 81%, e a pressão assumiu o valor constante de 699 mmHg.

### **3.3 Modelos para a Estimação da Suportabilidade de Estruturas de Redes de Distribuição frente a Sobretensões Impulsivas não Padronizadas**

#### ***3.3.1 Considerações Iniciais Relativas às Sobretensões Impulsivas não Padronizadas***

Devido à natureza estocástica das descargas atmosféricas (VISACRO, 2005), o estudo deste fenômeno consiste na análise estatística dos parâmetros relacionados às formas de onda das correntes de descarga: tempo de frente, tempo de meia onda, valor de pico, carga transferida, energia, taxa de subida etc. (VISACRO et al., 2004a).

Para a caracterização da suportabilidade das redes de distribuição aéreas frente a sobretensões de origem atmosférica, os parâmetros mais relevantes são o tempo de frente ( $T_f$ ) e o valor de pico ( $I_p$ ) da corrente de descarga, juntamente com a sua duração (VISACRO et al., 2012; DE CONTI et al., 2010). Os parâmetros  $T_f$  e  $I_p$  assumem

valores muito diferentes quando se comparam as primeiras descargas de retorno às descargas subsequentes. Além disso, assumem valores distintos para descargas negativas e positivas (VISACRO, 2005). Devido à natureza de formação do canal de descarga e à física envolvida no processo, as descargas positivas não apresentam descargas subsequentes, enquanto as descargas negativas apresentam descargas subsequentes em 80% dos casos (VISACRO et al., 2004a).

As descargas atmosféricas têm seus parâmetros obtidos principalmente por meio de medições realizadas em torres instrumentadas. No Brasil se realizam medições de corrente de descarga na torre instrumentada do Morro do Cachimbo, instalada nas cercanias da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. As medições realizadas no Morro do Cachimbo, juntamente com as medições realizadas na torre instrumentada localizada no Morro de San Salvatore, Suíça, formam uma importante base de dados que permitem a determinação de valores medianos para os parâmetros  $T_f$  e  $I_p$ , mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros representativos de solicitações atmosféricas [adaptado de (VISACRO, 2005)].

Tipo de solicitação atmosférica	Estação de medição	$I_p$ (kA)	$T_f$ [ $T_{30}$ ] ( $\mu$ s)	$T_f$ [ $T_{10}$ ] ( $\mu$ s)
Descarga positiva	Morro do Cachimbo	*	*	*
	San Salvatore	35	22	*
Primeira descarga negativa	Morro do Cachimbo	45	4,8	7,0
	San Salvatore	30	3,8	5,6
Descarga negativa subsequente	Morro do Cachimbo	16	0,67	0,88
	San Salvatore	12	0,67	0,75

Na Tabela 3.1, o valor de pico  $I_p$  corresponde ao valor máximo alcançado pela onda de corrente. Na maioria das vezes, as primeiras descargas de retorno negativas apresentam dois picos na forma de onda de corrente, sendo usual o segundo pico ser maior que o primeiro (VISACRO, 2005). O tempo de frente  $T_f$  pode ser definido através de  $T_{10}$  ou  $T_{30}$ . O primeiro é obtido pela multiplicação do intervalo de tempo  $T_{10}$ , que é o tempo decorrido entre os instantes em que onda impulsiva atinge 10% e 90% do seu valor de pico, por 1,25. O segundo é obtido pela multiplicação do intervalo de tempo  $T_{30}$ , que é o tempo decorrido entre os instantes em que onda impulsiva atinge 30% e 90% do seu valor de pico, por 1,667 (DE CONTI e VISACRO, 2007). A norma ABNT (2013) indica como padrão o tempo de frente obtido através de  $T_{30}$ .



Na Figura 3.7 é mostrada uma forma de onda de corrente representativa de primeiras descargas de retorno negativas medidas na estação do Morro do Cachimbo (VISACRO, 2004b). Nela, a onda de corrente apresenta uma forma côncava com derivada crescente e positiva nos instantes iniciais e uma taxa de crescimento máxima nos instantes próximos ao pico. Caso uma descarga atmosférica direta injete em uma linha de transmissão ou distribuição uma corrente com essas características, a tensão resultante vai apresentar uma forma de onda semelhante àquela ilustrada na Figura 3.7, caso se desconsidere a possibilidade de ocorrência de falhas de isolamento e se modele a linha como uma impedância resistiva pura. Pode-se ver que, nesse caso específico, a tensão resultante seria muito diferente da forma de onda ilustrada na Figura 3.1, que possui apenas um pico e apresenta uma taxa de crescimento máxima nos instantes iniciais e mínima em instantes próximos ao pico (VISACRO, 2005).

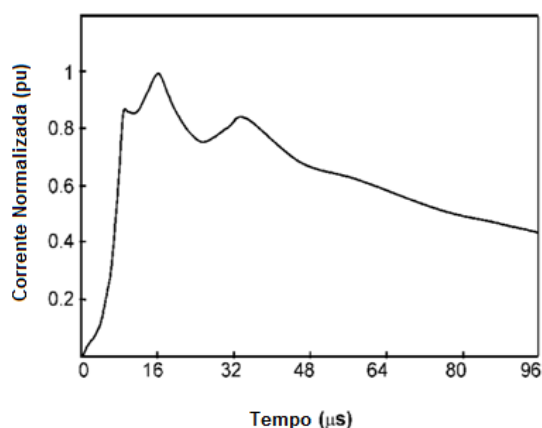


Figura 3.7 - Forma de onda representativa de uma primeira descarga de retorno [adaptado de (VISACRO, 2004b)].

Da mesma forma que as correntes de descarga, a forma de onda das sobretensões de origem atmosférica que podem afetar uma linha de transmissão ou distribuição está sujeita a grandes variações, dependendo de um grande número de fatores. Por exemplo, tensões induzidas em linhas de distribuição aéreas dependem do tempo de frente da descarga atmosférica que as originou, conforme ilustrado na Figura 3.8, da amplitude da onda de corrente incidente, do número de pontos de aterramento da rede, do valor da resistência de aterramento destes pontos, da resistência de carga ligada na linha, da presença de condutor neutro na rede e da ocorrência de falhas de isolamento, entre outros fatores (DE CONTI et al., 2010; SILVEIRA e VISACRO, 2007). Comentário

semelhante pode ser feito a respeito das sobretensões geradas por descargas atmosféricas diretas em redes de distribuição.

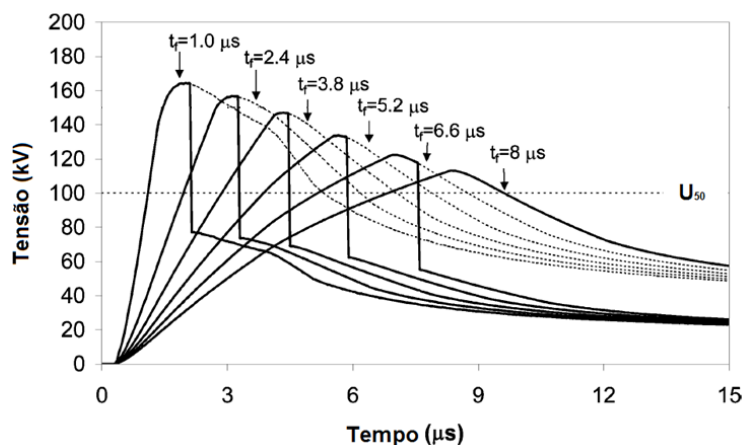


Figura 3.8 - Formas de onda de tensões induzidas em linhas de distribuição aéreas [adaptado de (DE CONTI et al., 2010)].

A grande variedade de formas de onda das sobretensões de origem atmosférica que podem afetar um sistema elétrico está, portanto, em claro contraste com a hipótese de se considerar uma onda de tensão padronizada nos testes realizados em laboratório para se definir a suportabilidade das estruturas pertencentes a esse sistema. Isso faz com que seja necessário buscar métodos que permitam avaliar a suportabilidade de componentes de sistemas elétricos diante de sobretensões com formas de onda não padronizadas. Nesse contexto se destaca o método do efeito disruptivo (DE), que é apresentado a seguir.

### 3.3.2 Método do efeito disruptivo

Para estudar a suportabilidade de meios isolantes frente a impulsos atmosféricos não padronizados, a forma mais conveniente consiste em ensaiar os meios isolantes com tensões impulsivas padronizadas e desenvolver um procedimento que seja eficaz na predição do comportamento frente a impulsos não padronizados (CAMPOS, 2012).

Buscando analisar o comportamento de meios dielétricos submetidos a tensões impulsivas não padronizadas, vários métodos têm sido propostos na literatura. Dentre esses, merecem destaque o método do efeito disruptivo (DE) e o modelo de progressão do *leader* (CHISHOLM, 2010). No presente trabalho, utiliza-se o método DE, que tem apresentado bons resultados na reprodução do comportamento de estruturas de redes de

distribuição frente a sobretensões com forma de onda não padronizada (DE CONTI, 2010).

O método DE foi proposto por Kind tendo como base o método da integração desenvolvido por Witzke e Bliss (WITZKE e BLISS, 1950) quando se estudava a distância máxima entre equipamentos e para-raios (JONES, 1954). Grandes contribuições para o desenvolvimento do método DE foram dadas por Darveniza (CALDWELL e DARVENIZA, 1973; DARVENIZA e VLASTOS, 1988), Chowdhuri (CHOWDHURI et al., 1997) e Ancajima (ANCAJIMA et al., 2005; ANCAJIMA et al., 2007).

Em sua proposição inicial, bem como em contribuições posteriores, o método DE parte de três premissas básicas (JONES, 1954):

- A disrupção no meio dielétrico é função tanto do valor de pico da tensão quanto do tempo em que o meio fica submetido à sobretensão.
- O tempo e a tensão não tem a mesma influência sobre o efeito disruptivo.
- Existe uma tensão mínima que o meio dielétrico é capaz de suportar independentemente do tempo de aplicação desta tensão.

O equacionamento clássico para o método DE é apresentado em (3.9),

$$DE = \int_{t_a}^{t_b} (U(t) - U_0)^k dt \quad (3.9)$$

onde DE é o valor do efeito disruptivo,  $U(t)$  é a tensão de excitação aplicada,  $t_a$  é o tempo em que  $U(t)$  excede o valor de  $U_0$  pela primeira vez,  $t_b$  é o tempo em que ocorre a disrupção no meio dielétrico,  $U_0$  é o valor de tensão mínimo abaixo do qual não ocorre disrupção no meio, e  $k$  é uma constante empírica. Na Figura 3.9 se vê os parâmetros do método DE de forma gráfica.

O valor de referência ( $DE^*$ ), calculado através de (3.9) mediante a aplicação de ondas de tensão padronizada no corpo de prova ensaiado, é um valor próprio para cada configuração isolante testada. Uma vez conhecido o valor de  $DE^*$ , caso seja aplicado/simulado um impulso de tensão não padronizado na estrutura avaliada, no

momento em que o valor da integral (3.9) for numericamente igual a  $DE^*$  tem-se a ocorrência da falha de isolamento na configuração isolante em análise.

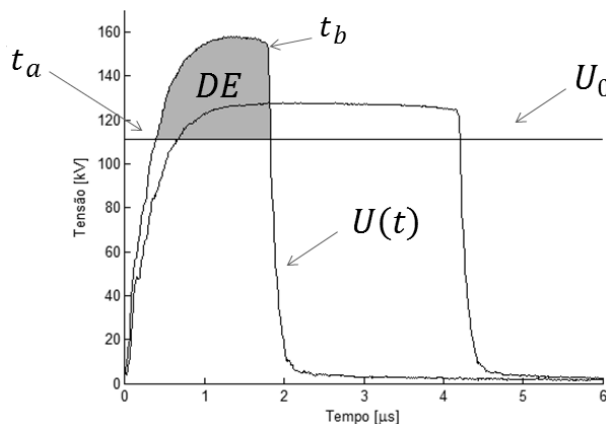


Figura 3.9 - Cálculo do valor de DE considerando  $k=1$ .

O método DE tem em seu principal ponto de investigação a determinação das constantes presentes em (3.9). Vários trabalhos foram realizados com o intuito de investigar a influência de cada variável no comportamento do método DE (WITZKE e BLISS, 1950; CALDWELL e DARVENIZA, 1973; CHOWDHURI et al., 1997; ANCAJIMA et al., 2007). Entretanto, parece não haver consenso quanto ao método mais eficaz para se obter as variáveis em (3.9) (CAMPOS, 2012).

Caldwell e Darveniza (1973), a partir de medições realizadas em laboratório procederam à determinação das constantes de (3.9) mantendo  $U_0$  fixo e calculando  $DE^*$  e  $k$ . Em seu trabalho, observou-se que  $k=1$  levava ao melhor ajuste entre a curva Uxt levantada em laboratório com a aplicação de impulsos atmosféricos padronizados e a curva Uxt reproduzida através do método DE. Quando se supõe  $k=1$ , o método DE é chamado de método das áreas iguais.

Chowdhuri et al. (1997) sugeriram em seu trabalho a utilização de uma função,  $\alpha*[U(t)/U_0]$ , para a determinação da variável empírica  $k$  da equação (3.9). Constatou-se com isso que a constante  $\alpha$  é sensível a variações da forma de onda aplicada e das características do gap e do meio isolante utilizados. Concluiu-se nesse estudo que a variável  $k$  é uma função do tempo em que o meio isolante fica submetido à solicitação até a ocorrência da disrupção. Entretanto, argumenta-se que a utilização de  $k=1$  é uma forma eficiente de obtenção dos parâmetros do método DE.

Ancajima et al. (2007) propuseram um método para a otimização da obtenção dos parâmetros do método DE através da curva  $U_{xt}$  obtida em laboratório. No método proposto, mantém-se  $k=1$  e realiza-se a variação de  $U_0$  entre 0 e 90% do valor de  $U_{50}$  (CFO). A cada valor de  $U_0$  estarão associados um valor médio de  $DE^*$ , chamado de  $DE_m$ , e um desvio padrão, denominado  $\sigma_m$ . Esta variação gerará  $m$  valores de  $DE_m$  e  $\sigma_m$ , sendo  $m$  dependente da discretização que se realiza na faixa de variação de  $U_0$ . Após o cálculo de  $m$  valores de  $DE_m$  e  $\sigma_m$ , verifica-se o valor de  $U_0$  que leva ao menor valor de  $\sigma_m$  e se seleciona o valor de  $DE_m$  correspondente. Neste trabalho, o valor de  $DE_m$  que leva ao menor valor de  $\sigma_m$  é chamado de  $DE^*$ .

Gomes et al. (2015) avaliaram o emprego do método DE na estrutura CE2 de redes compactas trifásicas considerando cabos nus. Essa situação corresponderia ao caso crítico de quando o cabo coberto perde sua camada isolante por ação do tempo ou outros agentes. Utilizando a metodologia proposta por Ancajima et al. (2007), verificaram que valores de  $U_0$  entre 80% e 90% do valor de  $U_{50}$  levam ao menor desvio padrão no cálculo de  $DE^*$ . Nesse trabalho também foram obtidos os parâmetros do método DE de forma analítica, supondo-se a representação da tensão padronizada gerada em laboratório como uma forma de onda triangular, ou numérica, supondo-se a representação da onda padrão como uma dupla exponencial. Na presente dissertação, utiliza-se o mesmo programa computacional utilizado em (GOMES et al., 2015) para determinação dos parâmetros do método DE, implementado no software *Matlab*® 2010b.

O método DE pode ser aplicado em casos nos quais o meio dielétrico é autorregenerativo. Esse é o caso das redes de distribuição aéreas convencionais e das redes compactas utilizando cabos nus, onde o ar exerce a função de isolante entre o condutor energizado e as estruturas aterradas. Entretanto, em redes de distribuição aéreas compactas a aplicação do método DE não é possível, em princípio, visto que nestas redes a cobertura isolante do cabo coberto faz com que exista um meio não autorregenerativo entre o condutor energizado e as estruturas aterradas.

# **4 Resultados de Testes de Suportabilidade de Estruturas de Redes de Distribuição Compacta e Estimação de Parâmetros para Modelos**

## **4.1 Introdução**

No presente capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados para determinar a suportabilidade das estruturas monofásicas de redes de distribuição compactas frente a sobretensões associadas a descargas atmosféricas. Com este intuito foram realizados testes laboratoriais com a aplicação de tensões impulsivas padronizadas em estruturas dessas redes no laboratório de alta tensão do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) da UFMG.

## **4.2 Metodologia dos Ensaio**

Os ensaios foram realizados no laboratório do LRC, que dispõe dos seguintes equipamentos: um gerador de impulsos do tipo Marx, da Haefely (SGSA 600kV, 30 kJ) de seis estágios, sendo cada um de tensão máxima de 100 kV, ilustrado na Figura 4.1 (a); um divisor de tensão capacitivo e um divisor de tensão resistivo, ilustrados na

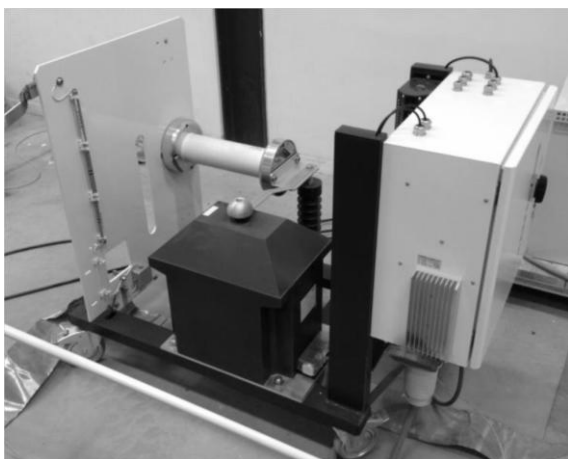
Figura 4.1 (b); um sistema de transformação e retificação, ilustrado na Figura 4.1 (c); um sistema de medição e controle, ilustrado na Figura 4.1 (d).



(a) Gerador de impulsos



(b) Divisor capacitivo (dir.) e resistivo (esq.)



(c) Circuito retificador



(d) Sistema de medição e controle

Figura 4.1 - Equipamentos do laboratório de alta tensão do LRC.

Na Figura 4.2 é apresentado o esquema de ligação para a realização dos ensaios no laboratório. Nele é mostrada a forma de se realizar a ligação do gerador de impulsos, do divisor capacitivo e do objeto sob teste.

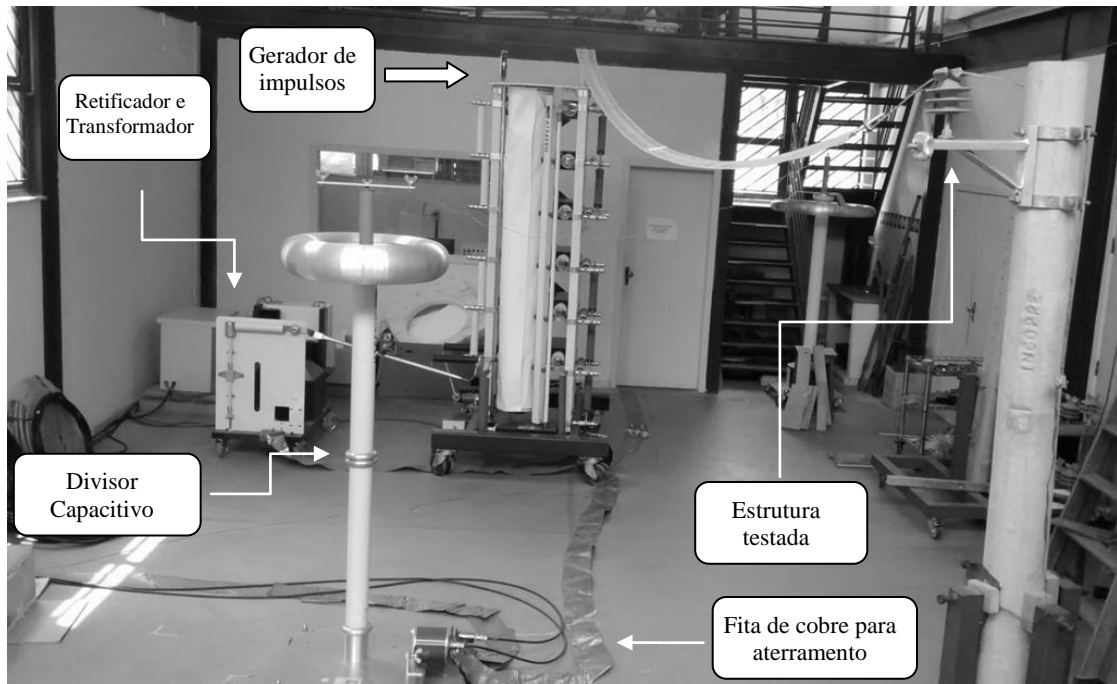


Figura 4.2 - Esquema de ligação.

Em todos os ensaios os equipamentos e estruturas foram solidamente aterrados através de uma fita de cobre de 150 mm de largura ligada a uma malha de aterramento de baixa impedância. As tensões impulsivas, utilizadas para realização dos testes, foram obtidas através do gerador de impulsos do tipo Marx ilustrado na Figura 4.1 (a), cujo circuito equivalente é apresentado na Figura 4.3.

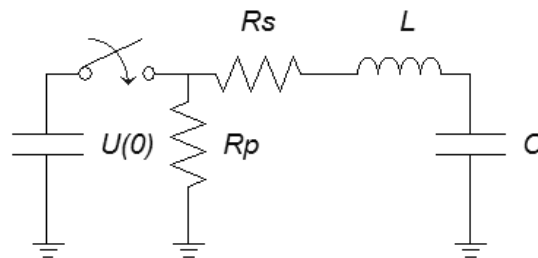


Figura 4.3 - Circuito equivalente ao gerador de impulsos.

Na Figura 4.3,  $U(0)$  é a tensão de carga dos capacitores. Após o fechamento da chave (função exercida por um gap de esferas) esta tensão é aplicada no circuito.  $R_p$  é o resistor de cauda da onda,  $R_s$  é o resistor de frente,  $L$  representa as indutâncias que compõem o sistema de medição e o cabeamento utilizado e  $C$  é a capacitância externa ao gerador, que é constituída da capacitância do divisor capacitivo, do objeto sob teste e das capacitâncias parasitas que aparecem no sistema. Em condições ideais, tem-se  $L=0$ .



Neste trabalho foram utilizados cabos curtos e dispostos de tal forma a minimizar o valor de  $L$  levando a uma aproximação dessa condição.

A polaridade da tensão  $U(0)$  pode ser positiva ou negativa. A aplicação de uma tensão de polaridade positiva se deve a dois fatores. Em primeiro lugar, ao fato de esta ser a polaridade de tensão mais severa quando se considera o ar como o único meio dielétrico analisado (KUFFEL, 2000). Em segundo lugar, é a polaridade mais frequente das tensões induzidas por descargas atmosféricas nuvem-solo em redes de distribuição aéreas (SILVEIRA, 2006), visto que 81% dessas descargas são do tipo “descendente negativa”, que transporta cargas negativas da nuvem para a terra e com isso induz tensões com polaridade positiva em linhas próximas (VISACRO et al., 2004a). Com relação à aplicação de tensões com polaridade negativa, sua importância para a análise de estruturas de redes de distribuição compactas se deve à expectativa de menor suportabilidade da isolação frente a efeitos impulsivos quando se considera a cobertura isolante dos cabos (NAKAMURA et al., 1986). Essa característica faz com que redes compactas sejam potencialmente mais vulneráveis aos efeitos da incidência direta de descargas negativas descendentes ou de descargas nuvem-solo na vizinhança da linha que transportem cargas positivas da nuvem para a terra.

A aplicação da tensão impulsiva de polaridade positiva pode ser feita tanto na estrutura (poste) quanto no cabo instalado na estrutura avaliada. Quando feita no poste, deseja-se simular a incidência direta de uma descarga atmosférica que transporte cargas positivas da nuvem para a terra. Quando feita no cabo, deseja-se simular a tensão induzida gerada pela incidência de uma descarga negativa descendente na vizinhança da linha de distribuição. Nos ensaios realizados com polaridade positiva, as tensões impulsivas foram sempre aplicadas no cabo fase montado na estrutura avaliada. Isso quer dizer que se buscou simular a ocorrência de uma tensão induzida na rede, que é o caso de maior probabilidade de ocorrência e, por consequência, o que pode levar a rede a um maior número de desligamentos (SILVEIRA, 2006). Nos ensaios realizados com tensões negativas, a tensão impulsiva continuou a ser aplicada sobre o cabo para que fosse possível a realização de análises comparativas entre os resultados obtidos para as polaridades positiva e negativa.

No circuito testado, o divisor capacitivo apresenta duas funções: a primeira, contribuir para a formação da onda dupla exponencial juntamente com o capacitor que armazena a tensão  $U(0)$  e os resistores de frente e de cauda; a segunda, é realizar a medição da tensão à qual fica submetido o objeto sob teste. Utilizando o gerador de impulsos com dois estágios de tensão tem-se o circuito equivalente e os parâmetros apresentados na Figura 4.4. Quando se carrega o capacitor  $C_{ger}$  com uma tensão de 110 kV obtêm-se uma tensão no ponto de ligação do objeto conforme a apresentada na Figura 3.1.

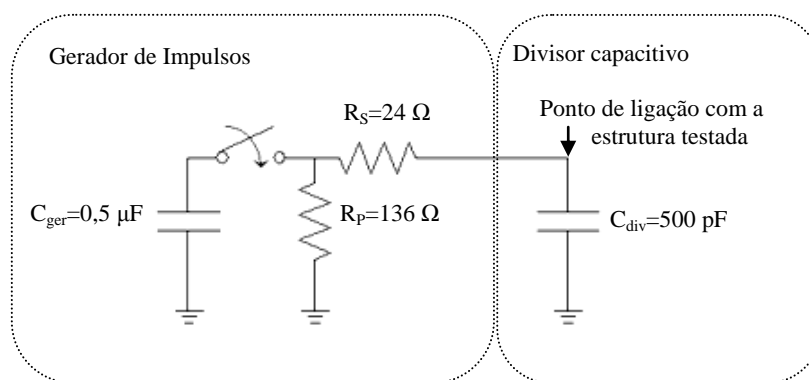


Figura 4.4 - Parâmetro do gerador de impulsos com dois estágios.

Os objetos testados na presente dissertação consistem nas diferentes estruturas de redes de distribuição compactas monofásicas, montadas na ausência do cabo mensageiro. Duas configurações foram testadas, uma utilizando cabo nu e a outra, cabo coberto. Na configuração com cabo nu utilizou-se um cabo de alumínio de  $50 \text{ mm}^2$  de seção nominal e de 80 cm de comprimento, tanto para a polaridade positiva quanto para a negativa. Já na configuração com cabos cobertos e polaridade positiva foram utilizados cabos de alumínio com seção nominal de  $50 \text{ mm}^2$  revestidos com uma cobertura de 3 mm de XLPE e 5 m de comprimento para as estruturas CM1, CM1S e CM2 e de 2,5 m de comprimento para a estrutura CM3. Quando aplicada a tensão de polaridade negativa, na configuração com cabos cobertos, foram utilizados cabos de alumínio com seção nominal de  $50 \text{ mm}^2$  revestidos com uma cobertura de 3 mm de XLPE e comprimento de 12 m, 10 m e 5 m, respectivamente, para as estruturas CM1, CM2 e CM3. Um esquema de montagem é apresentado na Figura 4.5 O comprimento ideal do cabo coberto para a realização dos testes com polaridade positiva foi obtido com a observação da ocorrência ou não de descargas superficiais ao longo do cabo,

sendo o tamanho escolhido de tal forma que não ocorressem disrupções ocasionadas por tais descargas entre a ponta do cabo e a estrutura. O tamanho do cabo utilizado para os ensaios com tensões de polaridade negativa foi determinado de forma a minimizar o número disrupções entre a ponta do cabo e a parte aterrada da estrutura, causadas por descargas superficiais, não sendo possível eliminá-las de todo, levando em consideração as restrições de espaço do laboratório do LRC da UFMG.

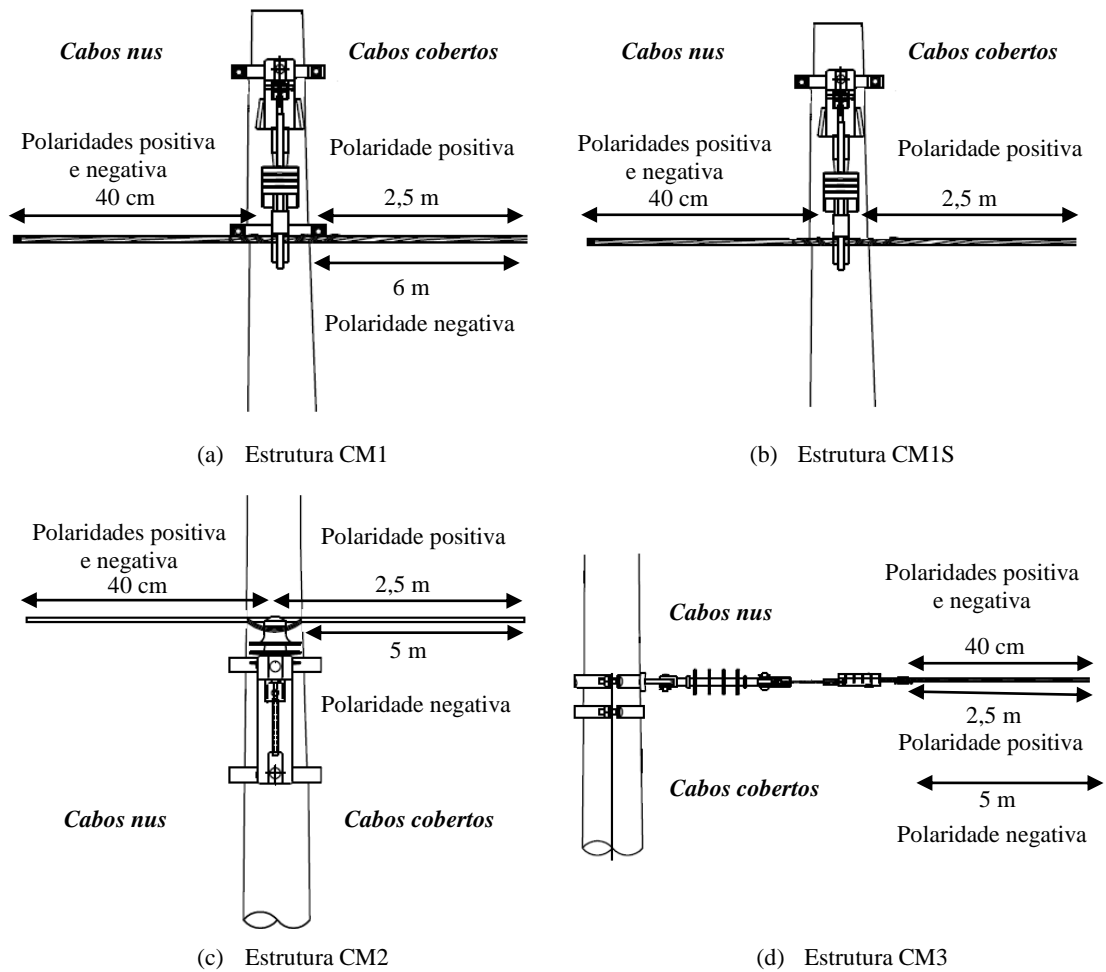


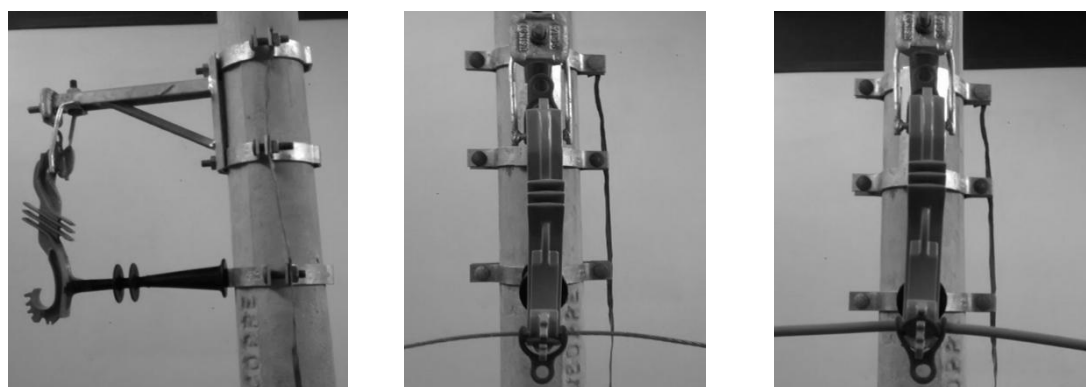
Figura 4.5 - Esquema de montagem com cabos cobertos e cabos nus.

Os testes com cabos cobertos foram realizados visando reproduzir as características normais de operação da rede considerando a situação na qual os cabos cobertos instalados são novos, caso denominado ensaio I, e também a situação em que os cabos cobertos já sofreram alguma perfuração causada pela ação do tempo ou pelo efeito de alguma solicitação atmosférica, caso denominado ensaio II. Os testes com cabos nus visam simular o caso crítico de operação da rede quando a cobertura isolante de XLPE está fortemente deteriorada devido à ação do tempo e de agentes externos.

Com estes dois tipos de testes, busca-se inferir o comportamento da rede em seus limites extremos.

### 4.3 Ensaios Realizados com a Estrutura CM1

Na Figura 4.6 (a) é apresentada a estrutura CM1 montada em laboratório para realização dos ensaios. Na Figura 4.6 (b) é mostrada a estrutura CM1 montada com cabo nu e, na Figura 4.6 (c), a montagem com cabo coberto.



(a) Montagem em laboratório

(b) Montagem com cabo nu

(c) Montagem com cabo coberto

Figura 4.6 - Estrutura CM1 testada

#### 4.3.1 Resultados de Ensaios da Estrutura CM1 com Cabos Nus

A primeira montagem realizada com a estrutura CM1, indicada na Figura 4.6 (b), considerou a utilização de um cabo nu. O método de acréscimos e decréscimos foi utilizado para a obtenção dos dados indicados da Tabela 4.1, que apresenta a tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ), a tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) e o desvio padrão calculado, todos obtidos para a aplicação de tensões impulsivas com polaridades positivas e negativas.

Tabela 4.1 - Suportabilidade da estrutura CM1 com cabo nu.

Polaridade	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)	Desvio $U_{50}$ (%)
Positiva (+)	185,36	180,22	190,50	2,16
Negativa (-)	194,55	188,98	200,12	2,23

A tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) para a maioria dos materiais dielétricos utilizados na rede primária dos sistemas de distribuição com classe de isolamento de 15 kV especificada e garantida pelos fabricantes é de 110 kV para o impulso atmosférico

normalizado. Dessa forma, nota-se que o valor obtido em ensaio é 63,8% maior que o especificado, para a aplicação de tensões com polaridade positiva.

Para o levantamento das curvas  $U_{xt}$  ilustradas na Figura 4.7 foram utilizados os pontos obtidos em ensaio e também a equação (3.8), cujos parâmetros foram obtidos com a aplicação do método dos mínimos quadrados visando obter a curva que melhor se ajusta aos pontos amostrados. Os parâmetros obtidos para (3.8) encontram-se listados na Tabela 4.2. O coeficiente de regressão ( $R^2$ ) tem valor satisfatório para as curvas com polaridades positivas e negativas, sendo que a curva foi mais bem ajustada para os pontos obtidos com aplicação tensões de polaridade positiva.

Tabela 4.2 - Parâmetros da curva  $U_{xt}$  (estrutura CM1).

Polaridade	A (kV)	B (kV.μs)	$n$	$R^2$
Positiva (+)	164,2298	275,7302	-1,4209	0,9668
Negativa (-)	194,5533	160,2672	-1,0728	0,8231

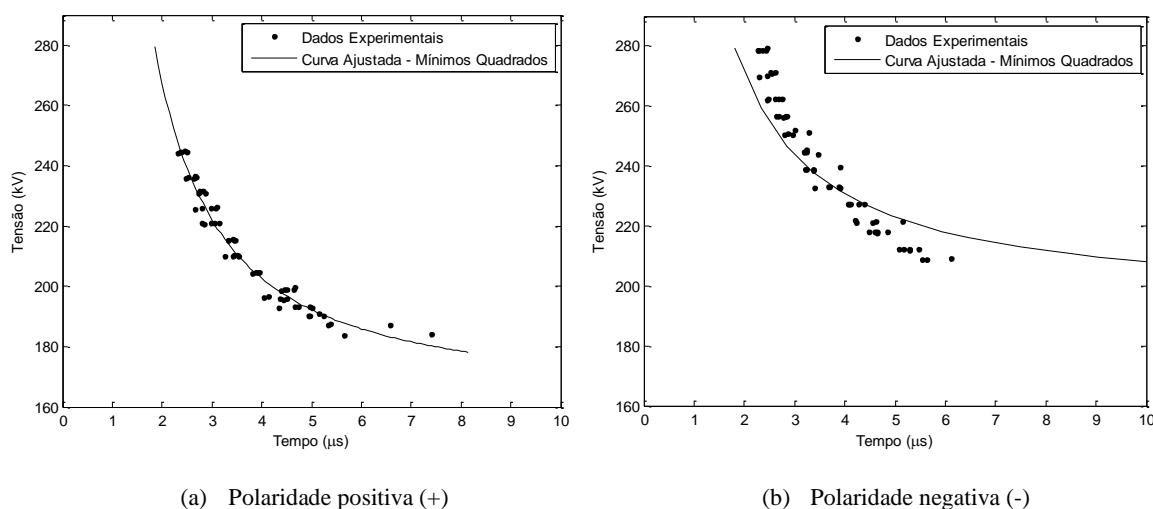


Figura 4.7 - Curvas  $U_{xt}$  da estrutura CM1. Os pontos amostrados e a curva  $U_{xt}$  para a polaridade negativa são apresentados em módulo.

As curvas  $U_{xt}$  ilustradas na Figura 4.7 mostram o instante de tempo em que se espera a ocorrência de uma disrupção na estrutura avaliada caso esta seja submetida a uma tensão impulsiva padronizada cuja amplitude seja suficiente para tocar a curva  $U_{xt}$ . Uma análise dessas curvas mostra que, quando aplicada uma tensão impulsiva com amplitude igual à tensão disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) com polaridade positiva, o tempo necessário para que seja observada uma disrupção no meio dielétrico é de 5,25 μs. Por

outro lado, quando aplicada a tensão  $U_{90}$  com polaridade negativa o tempo necessário é de 22,7  $\mu$ s.

Com os parâmetros das curvas Uxt, pode-se obter também os parâmetros referentes ao método DE, ilustrados na Tabela 4.3, que são utilizados para avaliar a suportabilidade da estrutura CM1 frente a solicitações impulsivas não padronizadas. Os valores apresentados correspondem aos parâmetros de (3.9), tendo sido obtidos através do método do menor desvio padrão proposto por Ancajima et al. (2007).

Tabela 4.3 - Parâmetros do método DE (estrutura CM1).

Polaridade	$U_0$ (kV)	$DE^*$ (kV. $\mu$ s)	Desvio $DE^*$ (%)
Positiva (+)	148,2888	176,5184	0,4748
Negativa (-)	169,2614	205,6664	15,5

No método DE, o parâmetro  $U_0$  corresponde ao valor teórico de tensão que a estrutura deve suportar por tempo indeterminado, sendo 34,8% superior ao valor de referência (110 kV) para impulsos com polaridade positiva e 53,9% superior para impulsos com polaridade negativa. Na comparação dos parâmetros  $A$ , da curva Uxt, e  $U_0$ , do método DE, nota-se que  $A$  é 10% e 14,9% superior a  $U_0$ , para tensões com polaridades positiva e negativa, respectivamente. Isso mostra que, no ajuste dessas variáveis, os parâmetros que teoricamente deveriam indicar a amplitude da tensão impulsiva para a qual não ocorre disrupção não são necessariamente iguais, apresentando, no entanto, valores próximos.

O parâmetro  $DE^*$  foi determinado de tal forma que se obtivesse o menor desvio padrão possível quando se varia  $U_0$  na faixa de 0 a  $U_{50}$  e se comparam os valores de  $DE^*$ , para um dado  $U_0$ , obtidos para cada par de pontos da curva Uxt em toda a faixa de tempo. Nota-se que  $B$ , parâmetro da curva Uxt, e  $DE^*$  têm a mesma unidade (kV. $\mu$ s), porém valores distintos, com  $B$  se mostrando 56,2% maior que  $DE^*$ , no caso da polaridade positiva, e 22,1% menor que  $DE^*$ , no caso da polaridade negativa. Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas Uxt obtidas pelo método dos mínimos quadrados, em traço fino, e as curvas Uxt construídas através dos parâmetros do método DE, em traço grosso. Nota-se que, apesar das diferenças nos parâmetros dos modelos, as curvas estão justapostas no intervalo de tempo considerado para a polaridade positiva. Já para a

polaridade negativa as duas curvas apresentam pequenas diferenças no intervalo amostrado.

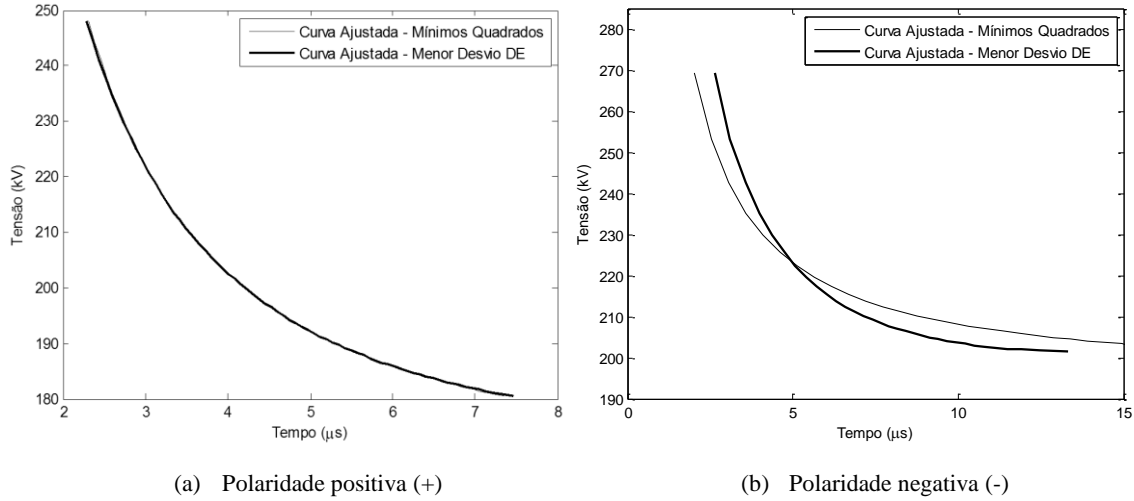


Figura 4.8 - Comparação entre as curvas Uxt ajustadas pelo método DE e pelo método de mínimos quadrados (estrutura CMI). As curvas para a polaridade negativa são apresentadas em módulo.

### 4.3.2 Resultados de Ensaios da Estrutura CMI com Cabos Cobertos

Aplicando-se o teste de tensão suportável para isolamento não autorrecuperante, realizado na montagem ilustrada na Figura 4.6 (c), obtêm-se os dados apresentados na Tabela 4.4. Esses dados se referem aos resultados obtidos para o caso em que se utiliza o cabo coberto novo (ensaio I) e o caso em que se utiliza o cabo coberto perfurado (ensaio II).

Para o ensaio com tensões impulsivas com polaridade positiva foram utilizadas cinco amostras de cabos cobertos de dois fabricantes diferentes. Já nos ensaios com tensões de polaridade negativa, foram utilizados cinco amostras de cabos de um único fabricante. No ensaio I, o mesmo procedimento de ensaios foi realizado para a aplicação das polaridades positiva e negativa, sendo o primeiro nível de tensão aplicado de 200 kV. No ensaio II, o primeiro nível de tensão aplicado para a polaridade positiva foi de 200 kV, quando o furo causado pelo ensaio I se manifestou em uma distância maior que 50 cm do separador polimérico, ou de 170 kV, quando o furo se manifestou em distância mais próxima do separador. Para a polaridade negativa, o primeiro nível de tensão aplicado foi sempre de 170 kV, independentemente da distância do furo ao separador polimérico. Para os ensaios I e II, após a aplicação de cinco impulsos o módulo da tensão foi elevado em 10 kV até que fosse observada uma disrupção. Para a

tensão de polaridade negativa, devido ao tamanho insuficiente do cabo utilizado (12 m, limitados pelas dimensões físicas do laboratório do LRC), observou-se a ocorrência de disrupções de forma predominante para a ponta do cabo. Pelo fato de se esperar que a suportabilidade de cabos cobertos fosse menor para tensões impulsivas com polaridade negativa do que para tensões impulsivas com polaridade positiva (NAKAMURA et al., 1986), nesta dissertação a tensão impulsiva de polaridade negativa aplicada sobre a estrutura CM1 foi elevada até o nível máximo de 280 kV, que foi o maior nível de tensão impulsiva de polaridade positiva que a estrutura CM1 suportou sem a observação de uma disrupção. A cada impulso de tensão aplicado sobre a estrutura, em ambos os ensaios, realizou-se a limpeza das cargas estáticas acumuladas sobre o cabo coberto e o espaçador polimérico. No total foram observadas vinte e uma disrupções no ensaio I e doze disrupções no ensaio II, para polaridade positiva, e oito disrupções no ensaio I e três disrupções no ensaio II, para polaridade negativa. Além das disrupções que levaram o cabo à perfuração ou daquelas que ocorreram após a perfuração do cabo (ensaio II), nos ensaios com tensão de polaridade negativa foram observadas duzentas e onze disrupções para a ponta do cabo durante os ensaios realizados com a estrutura CM1.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios das tensões impulsivas que levaram a estrutura CM1 à disrupção nos ensaios I e II. No cálculo da média, somente a primeira disrupção verificada em cada cabo foi considerada. Assim, para tensões impulsivas com polaridade positiva, dez valores de tensão foram considerados para o ensaio I (um para cada um dos cinco cabos de cada fabricante) e dez valores foram considerados para o ensaio II (um para cada um dos cinco cabos de cada fabricante), um para cada cabo amostrado. Entretanto, para a polaridade negativa, três valores foram considerados para obtenção das médias dos ensaios I e II, visto que em duas amostras não foi possível levar a cobertura de XLPE do cabo testado à disrupção. Os desvios padrão apresentados na Tabela 4.4 não estão associados a uma distribuição estatística normal, tendo em vista o número limitado de amostras. Ainda assim, fornecem uma indicação qualitativa de como as tensões disruptivas medidas se dispersam em relação à média calculada.



Tabela 4.4 - Suportabilidade da estrutura CM1 com cabos cobertos.

Polaridade	Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
Positiva (+)	281,7	3,09	271,17	4,79
Negativa (-)	243,8	2,12	192,0	3,03

Uma comparação entre a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) para a rede compacta com cabo nu, situação tratada nesta dissertação como um caso crítico de operação na situação em que a cobertura isolante do cabo esteja completamente deteriorada, e o valor da tensão disruptiva obtida com cabo coberto novo, referente ao ensaio I, mostra que a estrutura CM1 com cabo coberto suporta um valor de tensão impulsiva 56,3% (+) e 29,0% (-) superior à estrutura CM1 com cabo nu. No ensaio II, a suportabilidade é 50,5% (+) e 1,6% (-) superior à  $U_{10}$ . Quando se compara o ensaio I com o ensaio II, percebe-se que no primeiro a tensão suportável é 3,9% e 27,0% maior que no segundo para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

Após a ocorrência de uma disrupção no ensaio I, para cada cabo amostrado foi medida a distância do furo em relação ao espaçador polimérico. Na Figura 4.9, que considera os ensaios com polaridade positiva, nota-se que a maior concentração de ocorrências de furos está na faixa de 60 cm a 80 cm. Para a polaridade negativa foram observados três furos, distantes 2,12 m, 2,42 m e 2,72 m em relação ao espaçador polimérico.

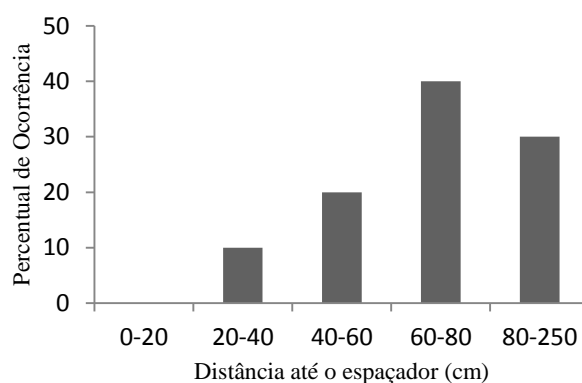


Figura 4.9 - Distância do furo até o espaçador considerando os ensaios com polaridade positiva (CM1).

Os tempos de ruptura médios obtidos para os cabos cobertos nos ensaios I e II são apresentados na Tabela 4.5. Comparando os tempos de ruptura médios para os cabos cobertos, ensaio I, e para os cabos nus tendo como base o instante de tempo em que  $U_{90}$  se manifesta na curva  $U_{xt}$  da Figura 4.7, verifica-se que o tempo de ruptura

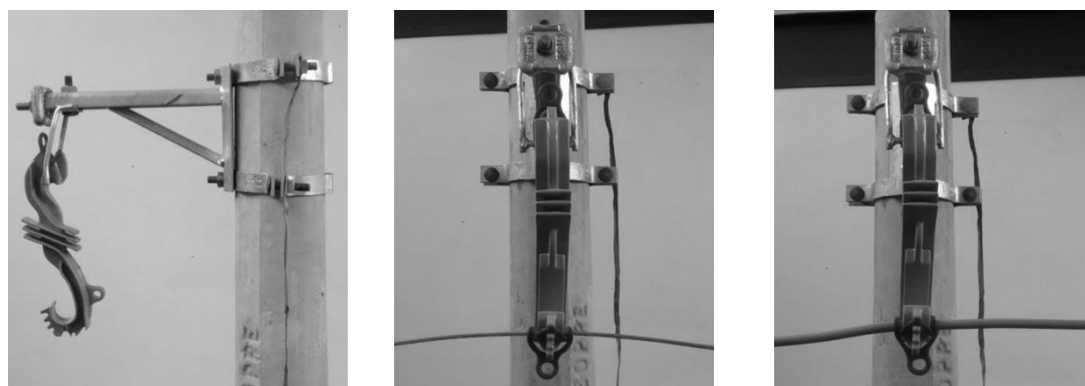
para os cabos cobertos é 72,8% superior em relação aos cabos nus para polaridade positiva, e 33,3% inferior em relação aos cabos nus para polaridade negativa.

Tabela 4.5 - Tempos de ruptura médios para cabos cobertos na estrutura CM1.

	Polaridade	Ensaio I	Ensaio II	Média dos ensaios I e II
Tempo de ruptura ( $\mu$ s)	Positiva (+)	9,76	11,32	10,54
	Negativa (-)	15,14	23,62	19,38

#### 4.4 Ensaios Realizados com a Estrutura CM1S

Na Figura 4.10 (a) é apresentada a estrutura CM1S montada em laboratório para a realização dos ensaios. Na Figura 4.10 (b) é ilustrada a estrutura CM1S montada com cabo nu e, na Figura 4.10 (c), a montagem com cabo coberto.



(a) Montagem em laboratório

(b) Montagem com cabo nu

(c) Montagem com cabo coberto

Figura 4.10 - Estrutura CM1S testada.

##### 4.4.1 Resultados de Ensaios da Estrutura CM1S com Cabos Nus

Na Tabela 4.6, são apresentados os valores obtidos nos ensaios de suportabilidade referentes à estrutura CM1S. Dos valores observados, conclui-se que a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) é 57,6% maior que o valor de referência de 110 kV para a aplicação de tensões com polaridade positiva. O valor de  $U_{10}$  obtido com a aplicação de tensões com polaridade negativa é 14,3% maior do que o valor obtido com a aplicação de tensões com polaridade positiva.

Tabela 4.6 - Suportabilidade da estrutura CM1S com cabo nu.

Polaridade	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)	Desvio $U_{50}$ (%)
Positiva (+)	177,90	173,38	182,43	1,98
Negativa (-)	204,52	198,29	210,75	2,38

Comparando a estrutura CM1S à estrutura CM1, avaliada na seção anterior, percebe-se que a tensão de descarga disruptiva a 50% da estrutura CM1 é 4,2% superior ao valor correspondente da estrutura CM1S para polaridade positiva e 4,8% inferior para a polaridade negativa. Essa diferença pode ser considerada desprezível, o que mostra uma pequena influência do braço anti-balanço na suportabilidade da estrutura.

Para o levantamento das curvas Uxt ilustradas na Figura 4.11, foram utilizados os pontos obtidos em ensaio e também a equação (3.8), cujos parâmetros foram obtidos com a aplicação do método dos mínimos quadrados visando obter a curva que melhor se ajusta aos pontos amostrados. Os parâmetros obtidos para (3.8) encontram-se listados na Tabela 4.7. Os coeficientes de regressão,  $R^2$ , apresentados na Tabela 4.7, se aproximam da unidade. Isso mostra que as curvas ajustadas representam bem os pontos amostrados. Os valores de  $R^2$  estão mais próximos da unidade para a estrutura CM1S, considerando polaridade negativa, do que para a estrutura CM1.

Tabela 4.7 - Parâmetros da curva Uxt (estrutura CM1S).

Polaridade	A (kV)	B (kV.µs)	n	$R^2$
Positiva (+)	144,0998	212,7672	-0,9161	0,9276
Negativa (-)	201,2488	427,0258	-2,1171	0,9460

As curvas Uxt ilustradas na Figura 4.11 mostram o instante de tempo em que se espera a ocorrência de uma disrupção na estrutura avaliada caso esta seja submetida a uma tensão impulsiva padronizada cuja amplitude seja suficiente para tocar a curva Uxt. A análise dessas curvas mostra que, quando aplicada uma tensão impulsiva de amplitude igual a  $U_{90}$ , o tempo teórico necessário para que seja observada uma disrupção no meio dielétrico é de 6,49 µs e 5,97 µs para tensões impulsivas com polaridades positiva e negativa, respectivamente.

Com os parâmetros das curvas Uxt pode-se obter também os parâmetros do método DE, ilustrados Tabela 4.8, que são utilizados para avaliar a suportabilidade da estrutura frente a solicitações impulsivas não padronizadas. Os parâmetros apresentados correspondem aos parâmetros da equação (3.9) e foram obtidos através do método do menor desvio padrão proposto por Ancajima et al. (2007).

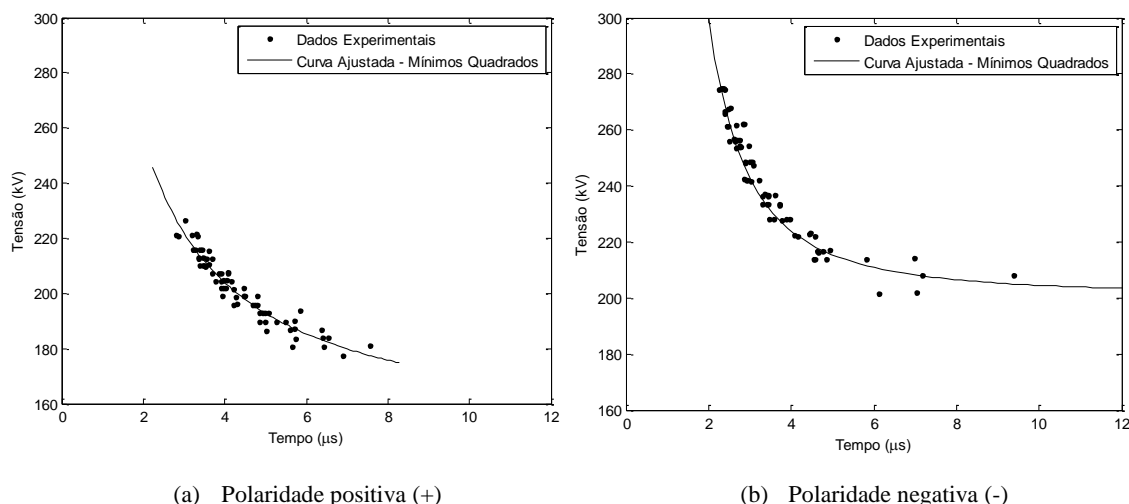


Figura 4.11 - Curvas Uxt da estrutura CM1S. Os pontos amostrados e a curva Uxt para a polaridade negativa são apresentados em módulo.

Tabela 4.8 - Parâmetros do método DE (estrutura CM1S).

Polaridade	$U_0$ (kV)	$DE^*$ (kV.μs)	Desvio $DE^*$ (%)
Positiva (+)	144,0998	194,4563	1,9037
Negativa (-)	175,8881	162,6164	5,84

Conforme mencionado anteriormente, no método DE o parâmetro  $U_0$  corresponde ao valor de tensão que a estrutura é capaz de suportar por tempo indeterminado. No caso analisado, este parâmetro apresenta valores 31% (+) e 59,9% (-) superiores ao valor de referência (110 kV). Para a estrutura CM1S, os valores de  $A$  em (3.8) e de  $U_0$  em (3.9) são numericamente iguais para polaridade positiva, sendo verificado que  $A$  é 14,4% superior a  $U_0$  para a polaridade negativa.

O parâmetro  $DE^*$  foi determinado da mesma forma que para a estrutura CM1, avaliada na seção anterior. O parâmetro  $B$  em (3.8) se mostrou 9,6% (+) e 163% (-) maior que  $DE^*$  em (3.9). Na Figura 4.12 são apresentadas as curvas Uxt obtidas pelo método dos mínimos quadrados, em traço fino, e as curvas Uxt construídas através dos parâmetros do método DE, em traço grosso. Nota-se que as curvas ilustradas têm comportamento muito semelhante no intervalo de tempo considerado.



o espaçador polimérico. No total, foram observadas catorze disrupções no ensaio I e nove disrupções no ensaio II. Na Tabela 4.9 é apresentado o valor médio das tensões impulsivas que levaram a estrutura CM1S à disrupção para os ensaios I e II. No cálculo da média, somente o valor de tensão referente à primeira disrupção verificada em cada cabo foi considerado, ou seja, no total, cinco valores de tensão para o ensaio I e cinco valores para o ensaio II foram considerados, um para cada cabo amostrado.

Tabela 4.9 - Suportabilidade da estrutura CM1S com cabo coberto utilizando tensão impulsiva de polaridade positiva.

Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
289,7	3,6	253,0	15,2

O ensaio I apresenta um valor de tensão suportável ao impulso atmosférico padronizado 163,4% superior ao valor de referência de 110 kV e o ensaio II um valor 130,0% superior ao valor de referência. Quando comparados os ensaios I e II, percebe-se que no primeiro a tensão suportável é 14,5% maior que no segundo.

Uma comparação entre a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) para a rede compacta com cabo nu quando aplicada a tensão positiva, situação tratada nesta dissertação como o caso crítico de operação em situação em que a cobertura isolante do cabo esteja completamente deteriorada, e o valor da tensão disruptiva obtida com cabo coberto novo, referente ao ensaio I, mostra que a estrutura CM1S com cabo coberto suporta um valor de tensão impulsiva 67,1% superior à estrutura CM1S com cabo nu.

Comparando os resultados obtidos no ensaio I para as estruturas CM1S e CM1, analisada na seção 4.3.2, percebe-se que a tensão suportável da estrutura CM1 é 2,8% inferior ao valor correspondente da estrutura CM1S para polaridade positiva. Essa pequena diferença observada reforça a hipótese da pouca influência do braço anti-balanço na suportabilidade da estrutura CM1. Com base nesse resultado e nos resultados anteriores obtidos para a condição crítica, utilizando cabos nus, confirma-se a decisão de não se realizar nesta dissertação ensaios com tensões impulsivas de polaridade negativa para a estrutura CM1S com cabos cobertos.

Após a ocorrência de uma disrupção no ensaio I, para cada cabo amostrado foi medida a distância do furo em relação ao espaçador polimérico. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.13, onde se observa uma maior concentração de furos na

faixa de 20 cm a 60 cm. Comparando-se estes resultados com aqueles apresentados na Figura 4.9, correspondente à estrutura CM1, observa-se que no último caso a concentração dos furos está na faixa de 60 cm a 80 cm a partir do espaçador. Esta distribuição dos furos ao longo do cabo teve influência direta na suportabilidade do cabo quando da realização do ensaio II, o que fica evidente quando se confronta a suportabilidade obtida para a estrutura CM1S com a estrutura CM1 e se observa que a segunda teve uma suportabilidade 7,2% superior à primeira (no caso do ensaio II).

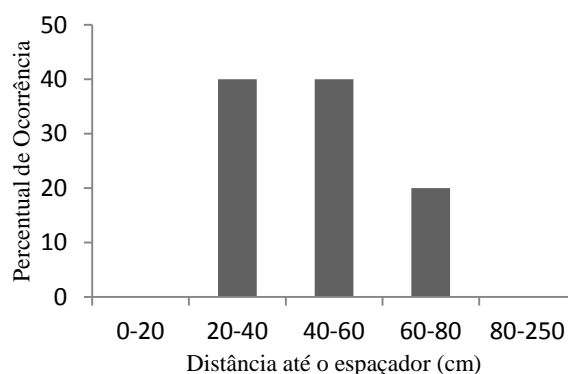


Figura 4.13 - Distância do furo até o espaçador considerando a aplicação de tensões impulsivas de polaridade positiva (CM1S).

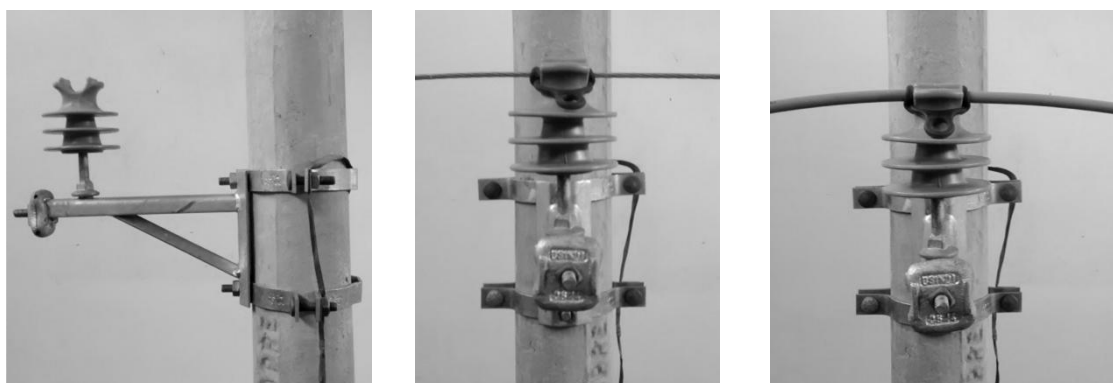
Os tempos de ruptura médios obtidos para os cabos cobertos nos ensaios I e II são apresentados na Tabela 4.10. Comparando os tempos de ruptura médios para os cabos cobertos no ensaio I com aqueles obtidos para os cabos nus (polaridade positiva), tendo como referência o instante de tempo correspondente ao valor de  $U_{90}$  na curva  $U_{xt}$  da Figura 4.11 (a), verifica-se que o tempo de ruptura para os cabos cobertos é 50,0% superior em relação aos cabos nus.

Tabela 4.10 - Tempos de ruptura médios para cabos cobertos para a estrutura CM1S obtidos através da aplicação do impulso atmosférico padronizado com polaridade positiva.

	Ensaio I	Ensaio II	Média dos ensaios I e II
Tempo de ruptura ( $\mu$ s)	9,737	11,54	10,64

## 4.5 Ensaios Realizados com a Estrutura CM2

Na Figura 4.14 (a) é apresentada a estrutura CM2 montada em laboratório para a realização dos ensaios. Na Figura 4.14 (b) é mostrada a estrutura CM2 montada com cabo nu e, na Figura 4.14 (c), a montagem com cabo coberto.



(a) Montagem em laboratório (b) Montagem com cabo nu (c) Montagem com cabo coberto

Figura 4.14 - Estrutura CM2 testada.

#### 4.5.1 Resultados de Ensaios da Estrutura CM2 com Cabos Nus

A Tabela 4.11 apresenta a tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ), a tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) e o desvio padrão calculado considerando a aplicação de tensões impulsivas com polaridades positiva e negativa na estrutura CM2 considerando a utilização de cabo nu. Tendo como base a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) e a tensão adotada como referência (110 kV) para as estruturas avaliadas, nota-se que o valor obtido em ensaio para tensões com polaridade positiva é 14,8% maior que o especificado. O valor de  $U_{10}$  obtido para a aplicação de tensões com polaridade negativa é, por sua vez, 19,5% maior que o valor obtido para a aplicação de tensões com polaridade positiva.

Tabela 4.11 - Suportabilidade da estrutura CM2 com cabo nu.

Polaridade	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)	Desvio $U_{50}$ (%)
Positiva (+)	129,87	126,28	133,47	2,1587
Negativa (-)	156,12	150,91	161,33	2,60

Para o levantamento das curvas  $U_{xt}$  ilustradas na Figura 4.15 foram utilizados os pontos obtidos em ensaio e também a equação (3.8), cujos parâmetros estimados pelo método de mínimos quadrados se encontram listados na Tabela 4.12. Por sua vez, a Tabela 4.13 apresenta os parâmetros do método DE correspondentes à estrutura avaliada. Uma comparação entre as curvas  $U_{xt}$  calculadas com o método de mínimos quadrados e o método DE é apresentada na Figura 4.16, onde se vê uma boa concordância entre as curvas obtidas.



Tabela 4.12 - Parâmetros da curva Uxt (estrutura CM2).

Polaridade	A (kV)	B (kV.μs)	n	R <sup>2</sup>
Positiva (+)	115,7164	103,9149	-1,1196	0,8617
Negativa (-)	154,4044	48,3813	-1,7186	0,5909

Tabela 4.13 - Parâmetros do método DE (estrutura CM2).

Polaridade	U <sub>0</sub> (kV)	DE* (kV.μs)	Desvio DE* (%)
Positiva (+)	112,9891	74,9392	1,8567
Negativa (-)	146,7544	26,0050	13,7266

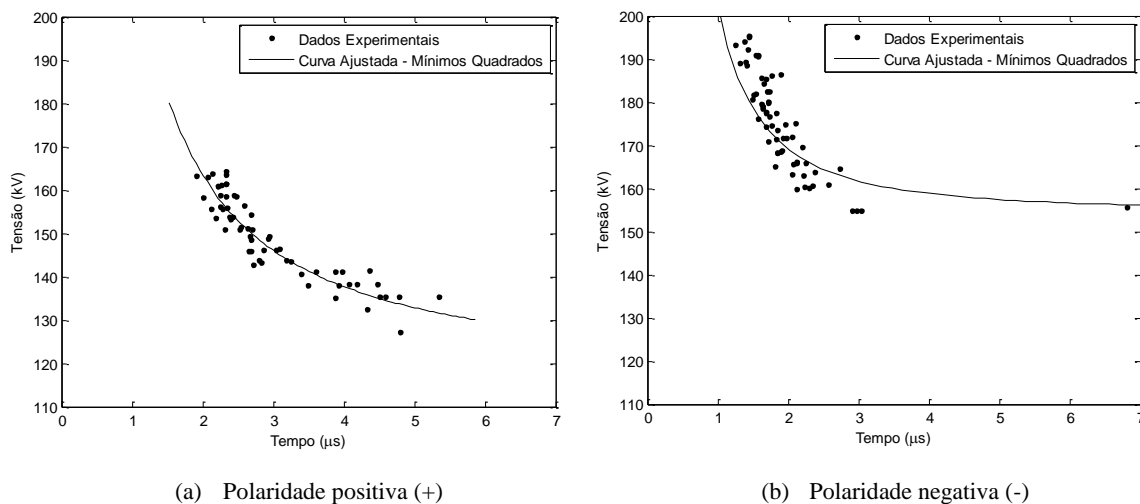


Figura 4.15 - Curva Uxt da estrutura CM2. Os pontos amostrados e a curva Uxt para a polaridade negativa são apresentados em módulo.

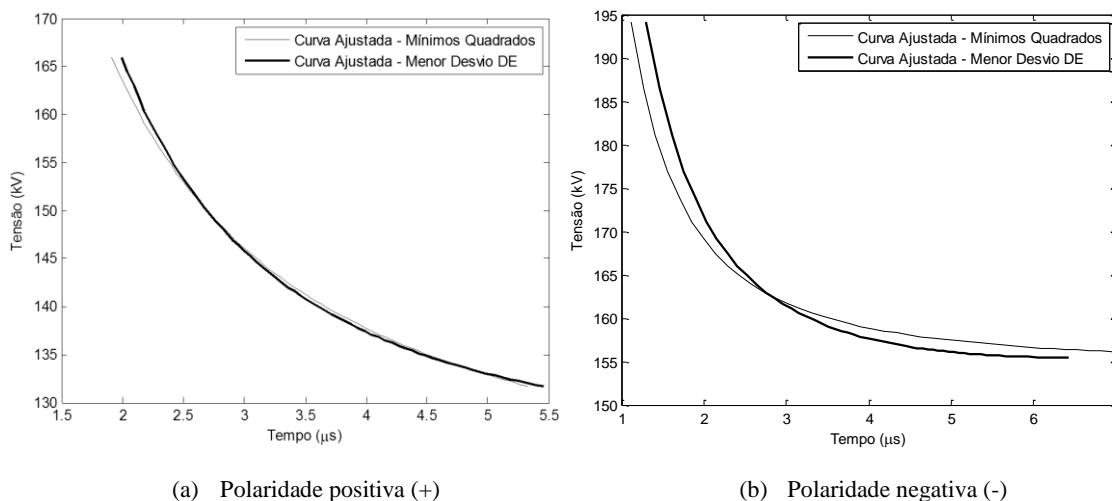


Figura 4.16 - Comparação entre as curvas Uxt ajustadas pelo método DE e pelo método de mínimos quadrados (estrutura CM2). As curvas para a polaridade negativa são apresentadas em módulo.

#### ***4.5.2 Resultados de Ensaios da Estrutura CM2 com Cabos Cobertos***

A partir dos testes de tensão suportável para isolamento não autorrecuperante realizados na montagem ilustrada na Figura 4.14 (c), foram obtidos os dados apresentados na Tabela 4.14, referentes aos ensaios I (cabo coberto novo) e II (cabo coberto perfurado). Foram utilizadas cinco amostras de cabos cobertos de dois fabricantes diferentes para os ensaios com polaridade positiva e cinco amostras de cabos cobertos de um único fabricante para os ensaios com polaridade negativa.

No ensaio I, o primeiro nível de tensão aplicado foi de 200 kV (polaridade positiva) e de 180 kV (polaridade negativa). Após a aplicação de cinco impulsos, a tensão foi elevada, em módulo, em passos de 10 kV até que fosse observada uma disrupção. No ensaio II, quando utilizada a polaridade positiva, o primeiro nível de tensão aplicado foi de 200 kV, quando o furo causado pelo ensaio I se manifestou em uma distância maior que 50 cm do isolador polimérico, ou de 110 kV, quando o furo se manifestou em uma distância mais próxima do isolador. No ensaio II, quando a polaridade utilizada foi a negativa, o primeiro nível de tensão aplicado foi de 170 kV, independentemente da distância onde se manifestou o furo. Novamente, em procedimento análogo ao ensaio I, a cada cinco impulsos aplicados a tensão foi elevada, em módulo, em 10 kV até ser observada uma disrupção. Além disso, após cada impulso de tensão aplicado sobre a estrutura foi realizada a limpeza das cargas estáticas acumuladas sobre o cabo coberto e o isolador de pino.

No total foram observadas treze disrupções no ensaio I e dezoito disrupções no ensaio II para a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva e quatorze disrupções no ensaio I e nove disrupções no ensaio II para a aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa. Além das disrupções que levaram o cabo à perfuração ou daquelas que ocorreram após a perfuração do cabo (ensaio II), para os ensaios com tensão de polaridade negativa foram observadas cento e quinze disrupções para a ponta do cabo durante os ensaios realizados com a estrutura CM2.

Na Tabela 4.14 são apresentados os valores médios das tensões impulsivas que levaram a estrutura CM2 à disrupção para os ensaios I e II. Assim como no caso das demais estruturas, no cálculo das médias somente a primeira disrupção associada a cada

nível de tensão foi considerada. Com isso, para tensões impulsivas com polaridade positiva dez valores de tensão foram considerados para o ensaio I (um valor para cada um dos cinco cabos de cada fabricante) e dez valores foram considerados para o ensaio II (um valor para cada um dos cinco cabos de cada fabricante). Para tensões com polaridade negativa, dez valores de tensão foram considerados para obtenção do valor médio, cinco para o ensaio I e outros cinco para o ensaio II.

Tabela 4.14 - Suportabilidade da estrutura CM2 com cabos cobertos.

Polaridade	Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
Positiva (+)	248,6	6,5	232,7	13,7
Negativa (-)	219,5	8,2	185,9	5,9

Uma comparação entre a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ) obtida para a rede compacta com cabo nu e o valor da tensão disruptiva obtida com cabo coberto novo, referente ao ensaio I, mostra que a estrutura CM2 com cabo coberto suporta valores de tensão impulsiva 96,8%, para a polaridade positiva, e 45,5%, para a polaridade negativa, superiores à estrutura CM2 com cabo nu. No ensaio II a suportabilidade é 82% (+) e 20,7% (-) superior ao valor de  $U_{10}$  para os cabos nus. Quando comparados os ensaios I e II, percebe-se que no primeiro a tensão suportável é 6,8% (+) e 18,1% (-) maior que no segundo.

Após a ocorrência de uma interrupção no ensaio I, para cada cabo amostrado foi medida a distância do furo em relação ao espaçador polimérico. Na Figura 4.17 (a), referente aos testes com tensões impulsivas com polaridade positiva, nota-se que a maior concentração de ocorrências de furos está na faixa de 40 cm a 60 cm. Na Figura 4.17 (b), referente aos testes com tensões impulsivas com polaridade negativa, a maior concentração de ocorrências de furos está na faixa de 80 cm a 250 cm.

Os tempos de ruptura médios obtidos para os cabos cobertos nos ensaios I e II são apresentados na Tabela 4.15. Comparando os tempos de ruptura médios obtidos para os cabos cobertos no ensaio I com aqueles obtidos para os cabos nus, tendo como referência o tempo de ruptura correspondente ao valor de  $U_{90}$  nas curvas  $U_{xt}$  da Figura 4.15, verifica-se que os tempos de ruptura para os cabos cobertos são 163% e 62,1% superiores aos tempos de ruptura dos cabos nus para tensões com polaridades positiva e negativa, respectivamente.

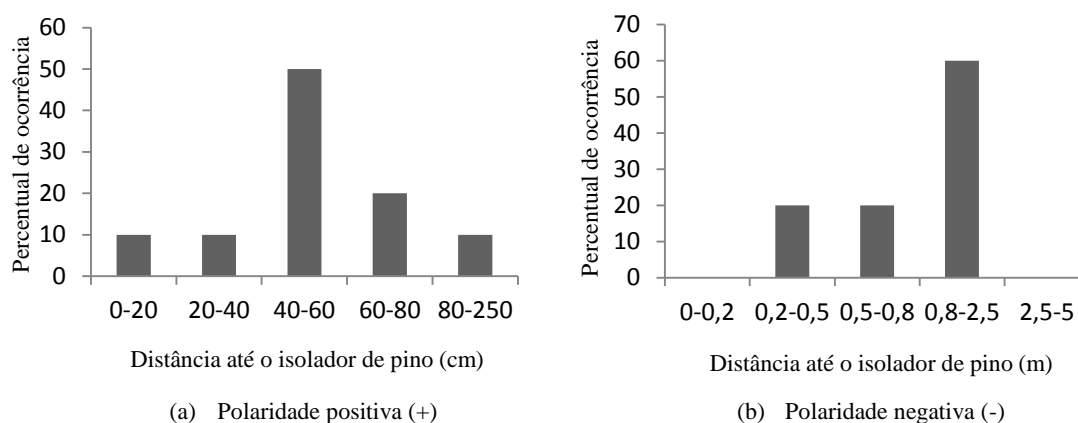


Figura 4.17 - Distância do furo até o isolador de pino (CM2).

Tabela 4.15 - Tempos de ruptura médios para cabos cobertos na estrutura CM2.

	Polaridade	Ensaio I	Ensaio II	Média dos ensaios I e II
Tempo de ruptura ( $\mu$ s)	Positiva (+)	12,8	10,0	11,40
	Negativa (-)	4,96	7,07	6,02

## 4.6 Ensaios Realizados com a Estrutura CM3

Na Figura 4.18 (a) é mostrada a montagem feita em laboratório para testar a estrutura CM3 considerando a utilização de cabo nu. Na Figura 4.18 (b) é apresentada a montagem com cabo coberto.



(a) Montagem com cabo nu



(b) Montagem com cabo coberto

Figura 4.18 - Estrutura CM3 testada.

### 4.6.1 Resultados de Ensaios da Estrutura CM3 com Cabos Nus

A Tabela 4.16 apresenta os valores de  $U_{50}$ ,  $U_{10}$ ,  $U_{90}$  e o desvio padrão calculado a partir dos testes realizados com a estrutura CM3 considerando cabos nus. Dos valores apresentados na Tabela 4.16, verifica-se que o valor de  $U_{10}$  calculado para a aplicação de tensões com polaridade positiva é 23,2% maior que a tensão suportável estatística de 110 kV associada a redes de distribuição com classe de isolamento de 15 kV. O valor de

$U_{10}$  obtido para a aplicação de tensões com polaridade negativa é 13,1% maior do que o valor obtido para a aplicação de tensões com polaridade positiva.

Tabela 4.16 - Suportabilidade da estrutura CM3 com cabo nu.

Polaridade	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)	Desvio $U_{50}$ (%)
Positiva (+)	141,60	135,55	147,65	3,33
Negativa (-)	155,92	153,29	158,55	1,31

Para o levantamento das curvas Uxt ilustradas na Figura 4.19 foram utilizados os pontos obtidos em ensaio e também a equação (3.8), cujos parâmetros estimados com o método de mínimos quadrados encontram-se listados na Tabela 4.17. A partir das curvas Uxt também é possível determinar os parâmetros do método DE, que se encontram listados na Tabela 4.18. A Figura 4.20 mostra que as curvas Uxt obtidas pelos diferentes métodos são muito semelhantes.

Tabela 4.17 - Parâmetros da curva Uxt (estrutura CM3).

Polaridade	A (kV)	B (kV.μs)	n	$R^2$
Positiva (+)	141,6027	191,5825	-2,0096	0,8754
Negativa (-)	131,1268	126,7531	-0,8090	0,9053

Tabela 4.18 - Parâmetros do método DE (estrutura CM3).

Polaridade	$U_0$ (kV)	$DE^*$ (kV.μs)	Desvio $DE^*$ (%)
Positiva (+)	126,0264	89,3432	4,4384
Negativa (-)	141,8851	88,9456	6,3794

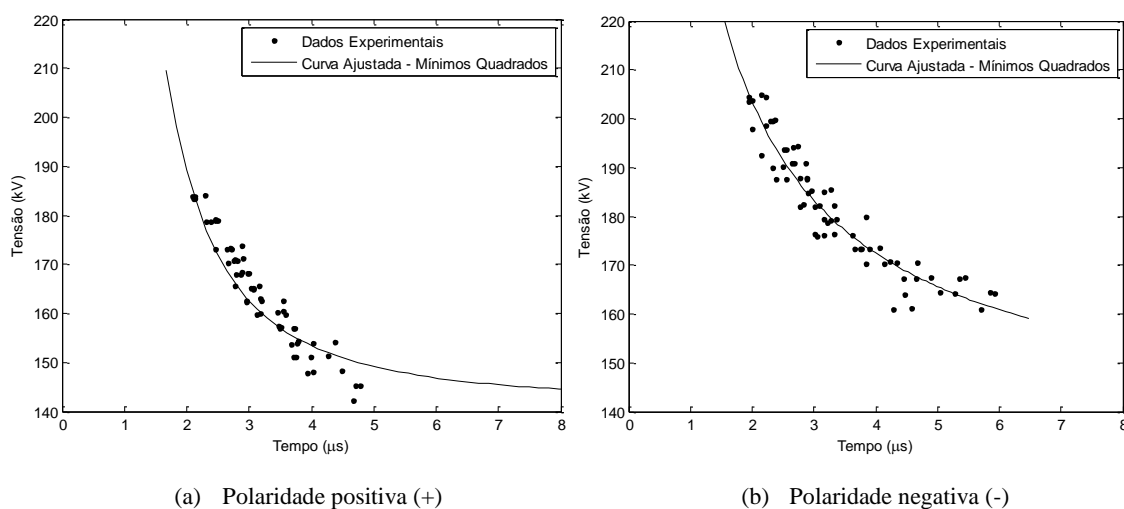


Figura 4.19 - Curvas Uxt da estrutura CM3. Os pontos amostrados e a curva Uxt para a polaridade negativa são apresentados em módulo.

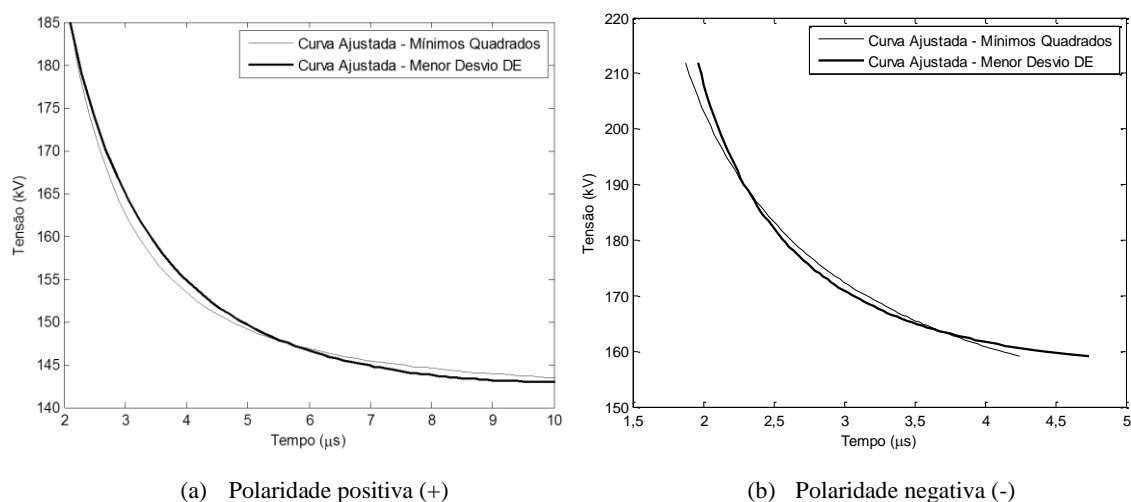


Figura 4.20 - Comparação entre as curvas Uxt ajustadas pelo método DE e pelo método de mínimos quadrados (estrutura CM3). As curvas para a polaridade negativa são apresentadas em módulo.

#### 4.6.2 Resultados de Ensaios da Estrutura CM3 com Cabos Cobertos

Aplicando-se o teste de tensão suportável para isolamento não autorrecuperante na montagem ilustrada na Figura 4.18 (c) considerando-se os três diferentes comprimentos de rabicho indicados na Figura 4.21, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 4.19. Estes se referem aos resultados obtidos para o caso em que se utiliza o cabo coberto novo (ensaio I) e o caso em que se utiliza o cabo coberto perfurado (ensaio II). Nos ensaios com polaridade positiva, três comprimentos de rabicho foram considerados, visando verificar a influência deste comprimento na suportabilidade da estrutura. Os comprimentos adotados foram de 10 cm, 50 cm e 1 m, sendo que o rabicho de 10 cm corresponde ao padrão adotado pela CEMIG. Nos ensaios com polaridade negativa apenas o rabicho de 10 cm foi considerado. Nesses ensaios foram utilizadas cinco amostras de cabos cobertos. No ensaio I, a ponta do cabo foi isolada através da utilização de fita de alta fusão (quatro voltas sobre a terminação do cabo) envolvida por fita isolante (três voltas sobre a fita de alta fusão), conforme padrão adotado pela CEMIG. O primeiro nível de tensão aplicado foi de 170 kV. Após a aplicação de cinco impulsos a tensão foi elevada, em módulo, em 10 kV até que fosse observada uma interrupção. No ensaio II, o primeiro nível de tensão aplicado também foi de 170 kV. Novamente, a cada cinco impulsos aplicados a tensão foi elevada, em módulo, em 10 kV até ser observada uma interrupção. Após a aplicação de cada impulso de tensão realizou-se a limpeza das cargas estáticas acumuladas no cabo coberto e no isolador de ancoragem. Esse procedimento de ensaio foi o mesmo utilizado tanto para a tensão de

polaridade positiva quanto para a tensão de polaridade negativa. Vale ressaltar que a diferença principal entre os ensaios com polaridades diferentes residiu no tamanho do cabo utilizado, enquanto para os ensaios com polaridade positiva o tamanho foi de 2,5 m, nos ensaios com polaridade negativa considerou-se um cabo com comprimento de 5 m. Estes dois comprimentos de cabos foram escolhidos de forma que não se observasse nenhuma descarga superficial ao longo do cabo.

Nos ensaios com polaridade positiva, no total foram observadas dez disrupções no ensaio I e dezesseis disrupções no ensaio II, para o rabicho de 10 cm, doze disrupções no ensaio I e onze disrupções no ensaio II, para o rabicho de 50 cm, e treze disrupções no ensaio I e doze disrupções no ensaio II, para o rabicho de 1 m. Nos ensaios realizados com tensão de polaridade negativa, foram observadas no total dez disrupções no ensaio I e doze disrupções no ensaio II. Na Tabela 4.19 é apresentado o valor médio das tensões impulsivas que levaram a estrutura CM3 à disrupção para os ensaios I e II. Para estimar este valor médio, somente a primeira disrupção para um nível de tensão foi considerada. Isso significa que, no total, cinco valores de tensão foram considerados para o ensaio I e cinco valores foram considerados para o ensaio II, um para cada cabo amostrado. O procedimento foi aplicado para os diferentes comprimentos de rabicho e para as diferentes polaridades aplicadas.



(a) Rabicho de 10 cm

(b) Rabicho de 50 cm.

(c) Rabicho de 1 m.

Figura 4.21 - Variações no comprimento do rabicho da estrutura CM3; o rabicho de 10 cm corresponde ao padrão adotado pela CEMIG.

Tabela 4.19 - Suportabilidade da estrutura CM3 com cabo coberto para variações no comprimento do rabicho e variação da polaridade da tensão impulsiva aplicada.

Polaridade	Tamanho do Rabicho	Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
Positiva (+)	10 cm	197,3	0,4	196,2	2,4
	50 cm	194,9	2,8	186,9	3,0
	1 m	190,9	5,5	189,1	3,7
Negativa (-)	10 cm	223,5	3,3	224,0	3,5

Os dados da Tabela 4.19 mostram que os valores de tensão disruptiva associados à estrutura CM3 são praticamente insensíveis ao comprimento do rabicho. Além disso, uma comparação entre o valor da tensão disruptiva obtida para o cabo coberto novo com rabicho de 10 cm e o valor de  $U_{10}$  obtido com cabo nu indica um aumento de suportabilidade de 37,7% (+) e 35,9% (-) quando a cobertura isolante é considerada. Os resultados obtidos com cabos cobertos já perfurados são praticamente iguais àqueles obtidos com cabo novo.

O baixo desvio padrão observado na Tabela 4.19 para o caso do rabicho de 10 cm e polaridade positiva se deve ao fato de as disrupções terem ocorrido para o mesmo nível de tensão. Além disso, a grande maioria das disrupções ocorreu no ponto onde foi realizada a isolação do rabicho com fita de alta fusão e fita isolante. Vale observar que no ensaio com o rabicho de 50 cm foi notado que em duas das cinco amostras ocorreu perfuração na cobertura isolante de XLPE do cabo coberto e que nas outras três a disrupção ocorreu na isolação realizada com fita de alta fusão e fita isolante. Por outro lado, nos ensaios com o rabicho de 1 m todas as cinco disrupções ocorreram na isolação realizada com fita de alta fusão e fita isolante. Nos ensaios com polaridade negativa e rabicho de 10 cm, nas cinco amostras utilizadas as disrupções ocorreram na isolação realizada com fita de alta fusão e fita isolante. Isso mostra que este é o ponto mais frágil da estrutura CM3 para as três variações do comprimento do rabicho propostas neste trabalho, independentemente da polaridade da tensão aplicada.

Os tempos de ruptura médios obtidos para os cabos cobertos nos ensaios I e II são apresentados na Tabela 4.20. Comparando-se os tempos de ruptura médios para cabos cobertos com rabicho de 10 cm, obtidos no ensaio I, com os tempos de ruptura correspondentes aos valores de  $U_{90}$  associados às curvas  $U_{xt}$  da Figura 4.19, verifica-se que os tempos de ruptura obtidos nos testes com cabos cobertos são 1,8% e 32,4% superiores aos tempos obtidos nos testes com cabos nus, para tensões impulsivas com polaridades positiva e negativa, respectivamente. Verifica-se um aumento nos tempos de disrupção para a condição onde o rabicho é de 50 cm em relação ao rabicho de 10 cm, nos testes com polaridade positiva. Esse aumento é de 41,7%, no ensaio I, de 94,9%, no ensaio II, e de 66,6% no valor médio dos ensaios I e II. Também é verificado um aumento nos tempos de disrupção na condição de rabicho de 1 m em relação ao



rabicho de 10 cm, para os testes com polaridade positiva. Esse aumento é de 30,2%, no ensaio I, 50,1%, no ensaio II e 39,4%, na média dos ensaios I e II. Entretanto, comparando o rabicho de 1 m com o rabicho de 50 cm verificou-se a ocorrência de uma diminuição nos tempos de disrupção de 8,1%, no ensaio I, de 23%, no ensaio II e de 16,3%, na média dos ensaios I e II. Verifica-se também um aumento nos tempos de disrupção para a condição onde o rabicho é de 10 cm com polaridade negativa em relação ao rabicho de 10 cm com polaridade positiva. Esse aumento é de 52,6%, no ensaio I, 63%, no ensaio II e 57,2%, na média dos ensaios I e II.

Tabela 4.20 - Tempos de ruptura médios para cabos cobertos na estrutura CM3 para variações no comprimento do tamanho do rabicho e da polaridade da tensão impulsiva aplicada.

	Polaridade	Tamanho do Rabicho	Ensaio I	Ensaio II	Média dos ensaios I e II
Tempo de ruptura ( $\mu$ s)	Positiva (+)	10 cm	5,76	5,13	5,45
		50 cm	8,16	10,00	9,08
		1 m	7,50	7,70	7,60
	Negativa (-)	10 cm	8,79	8,36	8,57

Para as variações realizadas no comprimento do rabicho não se obteve melhora na suportabilidade da estrutura CM3, o que indica que a ponta do cabo, onde é realizada a isolamento com fita de alta fusão e fita isolante, continua a ser o ponto mais vulnerável da estrutura. Uma saída a ser buscada seria a troca do material utilizado para realizar a isolamento da ponta do cabo por outro que tenha suportabilidade maior. De qualquer maneira, na CEMIG as terminações de rede são usualmente protegidas por para-raios, o que reduz a probabilidade de disrupção causada por sobretensões de origem atmosférica em postes contendo a estrutura CM3.

## 4.7 Considerações finais

A correção para as condições atmosféricas de referência realizada em todos os resultados apresentados utilizou a formulação proposta na norma ABNT (2013). No entanto, a formulação em questão é rigorosamente válida somente para o caso de estruturas com isolamento autorrecuperante. Dessa forma, é interessante avaliar o efeito da correção aplicada nos resultados obtidos nos testes com cabos cobertos, cuja isolamento é parcialmente não autorrecuperante. Assim, a Tabela 4.21 apresenta uma comparação entre os valores obtidos com e sem correção. Nota-se que na maioria dos casos a

correção não teve impacto significativo no valor da suportabilidade da estrutura. Verifica-se também que a maior diferença entre os valores com e sem correção foi observada nos resultados referentes à estrutura CM3 considerando rabicho de 10 cm. Essa diferença é de 4,6%, considerando a aplicação de tensões de polaridade positiva, e de 7,2%, considerando a aplicação de tensões de polaridade negativa. Dessa forma, embora requeira uma avaliação mais criteriosa, a aplicação da correção prevista em norma teve pouca influência nos resultados obtidos considerando cabos com cobertura isolante. A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.21, também é possível notar que a estrutura CM2 é aquela que apresenta a menor suportabilidade dentre as estruturas avaliadas, enquanto as estruturas CM1S e CM1 apresentam maior suportabilidade frente a impulsos de tensão de polaridades positiva e negativa, respectivamente.

Tabela 4.21 - Valores de tensão disruptiva para cabos cobertos com e sem correção atmosférica.

Estrutura	Polaridade	Ensaio I (kV) com correção	Ensaio I (kV) sem correção	Ensaio II (kV) com correção	Ensaio II (kV) sem correção
CM1	Positiva (+)	281,7	279,5	271,17	269,5
	Negativa (-)	243,8	243,7	192,0	192,0
CM1S	Positiva (+)	289,7	279,7	253,0	248,0
	Negativa (-)	*	*	*	*
CM2	Positiva (+)	248,6	243,8	232,7	229,9
	Negativa (-)	219,5	215,9	185,9	182,2
CM3	Positiva (+) Rabicho 10 cm	197,3	188,7	196,2	186,6
	Positiva (+) Rabicho 50 cm	194,9	192,6	186,9	184,6
	Positiva (+) Rabicho 1 m	190,9	190,5	189,1	188,7
	Negativa (-) Rabicho 10 cm	223,5	208,5	224,0	208,4

# 5 Síntese e Análise

## Comparativa dos

### Resultados Obtidos

#### 5.1 Introdução

Nas próximas seções apresenta-se uma análise comparativa dos resultados obtidos para as estruturas monofásicas ensaiadas da rede compacta: CM1, CM1S, CM2 e CM3. A seção 5.2 se concentra na síntese e na análise comparativa dos resultados obtidos para a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva, considerando estruturas monofásicas da rede compacta com cabos nus ou cobertos. A seção 5.3 repete a análise para os resultados obtidos com a aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa. Finalmente, a seção 5.4 compara os resultados obtidos para a aplicação de tensões impulsivas com polaridades positiva e negativa.

#### 5.2 Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos nos Ensaio com Polaridade Positiva

##### *5.2.1 Resultados dos Ensaio e Análises para as Estruturas da Rede*

##### *Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Nus*

A Tabela 5.1 apresenta a tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ), a tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) e o desvio padrão calculados para cada uma das estruturas testadas considerando a utilização de cabos nus e a aplicação de tensões de polaridade positiva.

Tabela 5.1 - Suportabilidade das estruturas da rede monofásica de distribuição compacta considerando a utilização de cabo nu e a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

Estrutura	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)	Desvio $U_{50}$ (%)
CM1	185,36	180,22	190,50	2,16
CM1S	177,90	173,38	182,43	1,98
CM2	129,87	126,28	133,47	2,16
CM3	141,60	135,55	147,65	3,33

A partir dos dados apresentados na Tabela 5.1, pode-se inferir que a suportabilidade estatística,  $U_{10}$ , das estruturas de redes compactas monofásicas com cabos nus têm valor médio de 153,85 kV. Também se nota que a estrutura CM1, que é aquela que apresenta a maior suportabilidade dentre as estruturas avaliadas, tem suportabilidade 42,7% maior que a estrutura CM2, que é aquela que apresenta menor suportabilidade dentre as estruturas avaliadas.

A Tabela 5.2 ilustra os parâmetros da equação (3.8) que levam ao melhor ajuste das curvas Uxt obtidas nos ensaios em laboratório referentes a cada uma das estruturas. Uma análise dos coeficientes de regressão mostra que os parâmetros das curvas Uxt que melhor reproduzem os pontos amostrados foram os obtidos para a estrutura CM1. A média obtida para o parâmetro  $A$  foi de 141,39 kV, o que representa um valor 8,1% menor que a tensão suportável estatística média das estruturas. Percebe-se também que o parâmetro  $A$  assumiu valores da ordem de 88%, 81%, 89% e 100% do valor de  $U_{50}$ , respectivamente, para as estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3.

Tabela 5.2 - Parâmetros das curvas Uxt das estruturas da rede de distribuição compacta para a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

Estrutura	$A$ (kV)	$B$ (kV.μs)	$n$	$R^2$
CM1	164,2298	275,7302	-1,4209	0,9668
CM1S	144,0998	212,7672	-0,9161	0,9276
CM2	115,7164	103,9149	-1,1196	0,8617
CM3	141,6027	191,5825	-2,0096	0,8754

Com os parâmetros da Tabela 5.2 pode-se construir as curvas Uxt apresentadas na Figura 5.1. Nela, vê-se novamente que a estrutura CM1 apresenta a maior suportabilidade dentre as estruturas avaliadas com cabos nus, enquanto a estrutura CM2, a menor. Percebe-se que o valor de tensão que teoricamente uma dada estrutura suportaria por tempo indeterminado, representado pelo parâmetro  $A$ , tem a mesma ordem de grandeza do valor de  $U_{50}$  associado às estruturas avaliadas, com diferenças percentuais inferiores a aproximadamente 20%.

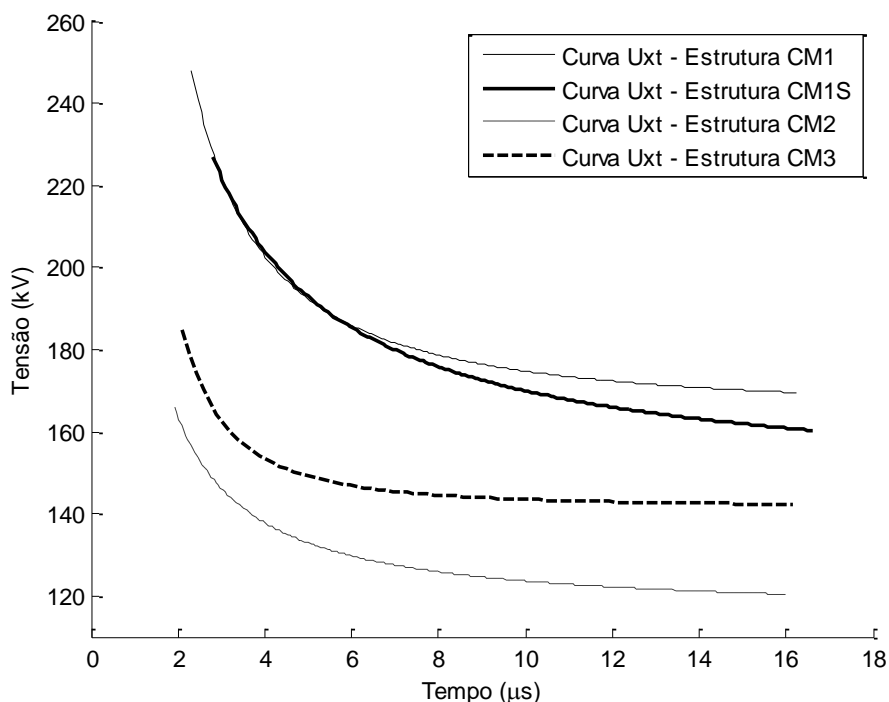


Figura 5.1 - Curvas Uxt das estruturas da rede monofásica de distribuição compacta para a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

A Tabela 5.3 ilustra os parâmetros obtidos para uso no método DE, descrito pela equação (3.9), que pode ser empregado para avaliar a suportabilidade das estruturas de redes compactas frente a solicitações com forma de onda não padronizada desde que seja considerada a utilização de cabos nus. Os parâmetros do método DE que levaram ao menor desvio padrão foram aqueles obtidos para a estrutura CM1. A média obtida para o parâmetro  $U_0$  foi de 132,85 kV, o que representa um valor 13,6% menor que a tensão suportável estatística média das estruturas.

Tabela 5.3 - Parâmetros do método DE considerando  $k=1$  e a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

Estrutura	$U_0$ (kV)	$DE^*$ (kV.µs)	Desvio $DE^*$ (%)
CM1	148,2888	176,5184	0,4748
CM1S	144,0998	194,4563	1,9037
CM2	112,9891	74,9392	1,8567
CM3	126,0264	89,3432	4,4384

Através da análise da Tabela 5.2 e da Tabela 5.3 verifica-se que quanto mais próximo o valor de  $n$  está de -1, mais o parâmetro  $A$  se aproxima de  $U_0$  no método DE. Quando  $n$  é igual a -0,9161,  $A$  e  $U_0$  são iguais. Por outro lado, quando  $n$  é igual a

-2,0096, verifica-se a maior diferença percentual entre  $A$  e  $U_0$ , em que aquele é 12,3% maior do que este.

O parâmetro  $U_0$  variou para as quatro estruturas monofásicas analisadas na faixa de 80% e 90% do valor da tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), tendo assumido valores de 80%, 81%, 87% e 89% de  $U_{50}$ , respectivamente, para as estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3. Esta faixa foi a mesma observada por Gomes et al. (2015) para a estrutura CE2, empregada em redes compactas trifásicas, quando da utilização de tensões impulsivas de polaridade positiva.

### ***5.2.2 Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede***

#### ***Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Cobertos***

Os resultados obtidos para as estruturas monofásicas básicas, CM1, CM1S, CM2 e CM3, considerando a utilização de cabos com cobertura isolante são apresentados na Tabela 5.4. Em média, a tensão disruptiva das estruturas testadas no ensaio I, que considera cabos novos, foi de 254,3 kV. Percebe-se que a estrutura CM3, que dentre as estruturas avaliadas é aquela com menor suportabilidade, apresentou uma suportabilidade 22,4% menor que a média, enquanto a estrutura CM1S, que dentre as estruturas avaliadas é aquela com maior suportabilidade, apresentou suportabilidade 13,9% acima da média. O valor médio da tensão disruptiva obtida no ensaio II, que considera o cabo já perfurado, foi de 238,3 kV, que é 6,3% menor que o valor médio obtido para o cabo novo. Essa pequena diferença percentual entre o nível de suportabilidade obtido para o ensaio II em relação ao ensaio I indica que, para o cabo coberto já danificado em sua cobertura, caso simulado neste trabalho com a utilização de cabos cobertos perfurados por uma ruptura, o efeito do dano pode ter uma influência pouco significativa na suportabilidade da rede. No entanto, percebeu-se ao longo dos ensaios realizados, que quanto mais próximo o furo na cobertura do cabo se manifesta em relação ao espaçador polimérico ou ao isolador de pino, menor é a tensão necessária para levar a estrutura testada à ruptura no ensaio II. Em alguns casos, foram verificados valores de tensão disruptiva semelhantes ao valor de  $U_{10}$  obtido para o caso onde foram utilizados cabos nus. Por exemplo, o menor nível de suportabilidade da estrutura CM1S em relação à estrutura CM1 no ensaio II se deve à menor distância observada entre os furos e o espaçador polimérico (vide Figura 4.13 e Figura 4.9). Este

fato resulta no maior desvio percentual obtido para a estrutura CM1S, visto que os níveis de tensão disruptiva oscilaram em uma faixa maior de valores, conforme ilustrado na Figura 5.2, na Figura 5.3 e na Figura 5.4.

Tabela 5.4 - Tensão disruptiva média e desvio padrão associados a cada uma das estruturas ensaiadas considerando tensões impulsivas com polaridade positiva e a utilização de cabos cobertos.

Estrutura	Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
CM1	281,7	3,09	271,17	4,79
CM1S	289,7	3,6	253,0	15,2
CM2	248,6	6,5	232,7	13,7
CM3	197,3	0,4	196,2	2,4

Tendo em vista a necessidade prática de se desencapar os cabos cobertos para realizar conexões com equipamentos e com outros cabos, para efeito de comparação foram retirados da média os valores associados a furos distantes a menos de 40 cm do isolador de pino, no caso da estrutura CM2, e do separador polimérico, no caso das estruturas CM1 e CM1S. Nesse caso, a suportabilidade para o ensaio II passa a ser de 247,78 kV, valor que é 2,56% menor que a suportabilidade para o ensaio I. Essa pequena diferença indica que alterações na cobertura isolante do cabo causadas por derivações e conexões feitas na rede a distâncias superiores a 40 cm do isolador de pino ou do espaçador polimérico tendem a ter impacto pouco significativo na suportabilidade da estrutura, considerando a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

A Figura 5.2 apresenta uma comparação entre os valores médios, máximos e mínimos da tensão disruptiva associada a cada uma das estruturas avaliadas considerando cabo coberto novo, isto é, tendo em conta o ensaio I. A Figura 5.3 faz comparação semelhante, porém tendo como referência os testes realizados com cabos já perfurados (ensaios II). A Figura 5.4 combina os resultados obtidos nos ensaios I e II. Nas figuras pode ser visto que a estrutura que suportou o maior nível de tensão foi a CM1S e que a estrutura CM2 sofreu ruptura em um menor nível de tensão. Também é perceptível que a estrutura CM3 é a que apresentou menor variação entre os valores máximos e mínimos.

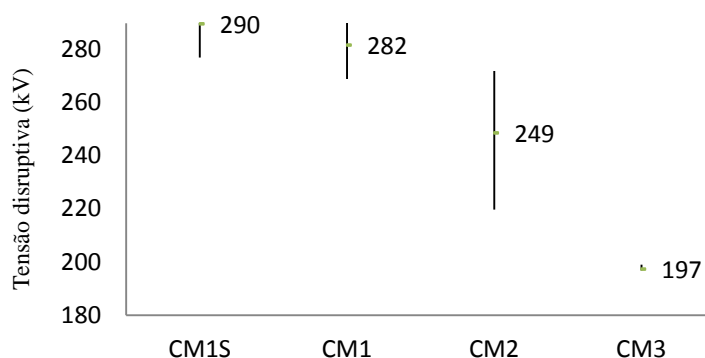


Figura 5.2 - Suportabilidade do cabo coberto novo por estrutura (ensaio I). Os valores apresentados correspondem às tensões disruptivas referentes à aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

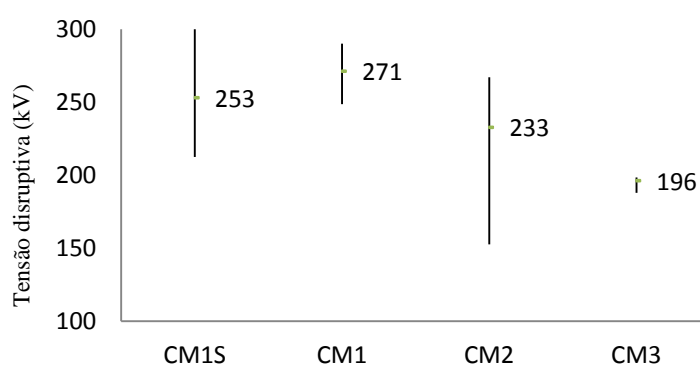


Figura 5.3 - Suportabilidade do cabo coberto novo por estrutura (ensaio II). Os valores apresentados correspondem às tensões disruptivas referentes à aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

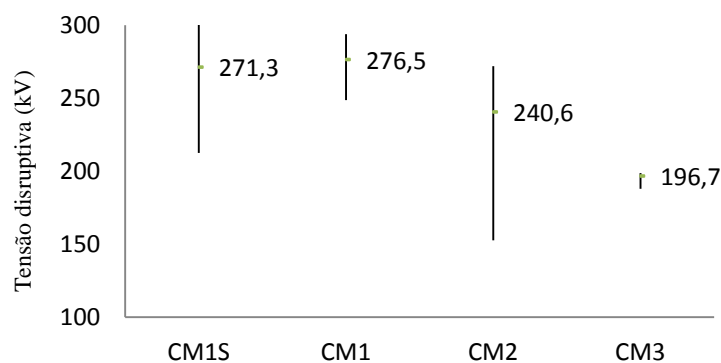


Figura 5.4 - Suportabilidade do cabo coberto novo por estrutura (ensaios I e II combinados). Os valores apresentados correspondem às tensões disruptivas referentes à aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

Na Figura 5.5 é realizado o agrupamento das distâncias observadas entre furos e o isolador para as estruturas CM1S, CM1 e CM2. Esse agrupamento mostra uma tendência de distribuição dos furos que se assemelha a uma distribuição normal, representada pela linha contínua da Figura 5.5, com média de 66,6 cm, desvio padrão percentual de 0,61% em relação à média, e maior probabilidade de ocorrência entre a faixa de 40 a 60 cm. A estrutura CM3 não foi considerada para a obtenção da



Figura 5.5, visto que, para a maioria dos cabos amostrados as perfurações observadas ocorreram na terminação do cabo onde se realizou a isolação com fita de alta fusão e fita isolante.

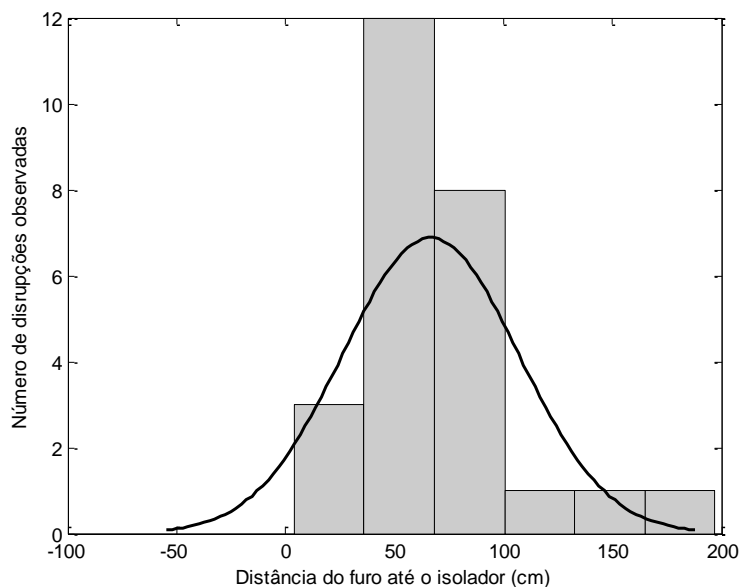


Figura 5.5 - Distância do furo até o isolador considerando as estruturas CM1S, CM1 e CM2.

Através das curvas  $U_{xt}$  obtidas para as estruturas com cabos nus, ilustrada na Figura 5.1, foi possível determinar os tempos de disrupção esperados quando aplicada a tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) sobre as estruturas testadas. Esses valores podem ser comparados com os valores médios dos tempos de disrupção estimados a partir dos testes com cabos cobertos, referentes ao ensaio I. Na Tabela 5.5 são apresentados os tempos de disrupção para os cabos nus e os tempos de disrupção para os cabos cobertos. As estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3 tiveram um tempo de disrupção médio de  $5,56 \mu s$ , no caso de utilização de cabo nu. O tempo de disrupção médio para essas estruturas com cabo coberto, referente ao ensaio I, foi de  $9,51 \mu s$ . Pode-se ver com isso que o tempo de disrupção médio para o caso onde se consideram cabos nus é 41,5% menor que o tempo de disrupção médio quando se utilizam cabos cobertos. Para a estrutura CM3 obteve-se um valor de tempo de disrupção médio para o cabo coberto bem diferente do valor obtido para as outras estruturas. Comparando-se o tempo de disrupção para a estrutura CM3 com cabos cobertos com o tempo de disrupção médio para as demais estruturas percebe-se que aquele é 53,5% inferior a este. Por outro lado, o tempo de disrupção da estrutura CM3 com cabos cobertos é 3,6% superior ao tempo de disrupção médio das estruturas ensaiadas com cabos nus. Isso nos

mostra que o tempo de disrupção para a estrutura CM3 com cabos cobertos está mais próximo ao tempo de disrupção médio das estruturas CM1, CM1S e CM2 com cabos nus que do tempo de disrupção dessas estruturas com cabos cobertos.

Tabela 5.5 - Tempo até à disrupção para cabos nus e para cabos cobertos, considerando a aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva.

Estrutura	$U_{90}$ (kV) (cabo nu)	Tempo de disrupção ( $\mu$ s) (cabo nu)	Suportabilidade (kV) (cabo coberto, ensaio I)	Tempo de disrupção médio ( $\mu$ s) (cabo coberto, ensaio I)
CM1	190,5	5,25	279,5	9,76
CM1S	182,4	6,49	279,7	9,73
CM2	133,5	4,86	243,8	12,8
CM3	147,7	5,66	188,7	5,76

### 5.3 Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos nos Ensaios com Polaridade Negativa

#### 5.3.1 Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede

##### *Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Nus*

Na Tabela 5.6 apresenta-se a tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), a tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ), a tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ) e o desvio padrão calculado para cada uma das estruturas testadas considerando a utilização de cabos nus e a aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa.

Tabela 5.6 - Suportabilidade das estruturas da rede monofásica de distribuição compacta considerando utilização de cabos nus e polaridade negativa.

Estrutura	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)	Desvio $U_{50}$ (%)
CM1	194,55	188,99	200,12	2,23
CM1S	204,52	198,29	210,75	2,37
CM2	156,12	150,91	161,34	2,61
CM3	155,92	153,29	158,55	1,31

A partir dos dados apresentados na Tabela 5.6, pode-se inferir que a suportabilidade estatística,  $U_{10}$ , das estruturas de redes compactas monofásicas com cabos nus têm valor médio de 177,78 kV. Pode ser notado também que a estrutura CM1S, que é aquela que apresenta a maior suportabilidade dentre as estruturas

avaliadas, tem suportabilidade 31,4% maior que a CM2, que é aquela que apresenta a menor suportabilidade dentre as estruturas avaliadas.

A Tabela 5.7 ilustra os parâmetros de (3.8) que levam ao melhor ajuste das curvas Uxt obtidas em laboratório referentes a cada uma das estruturas avaliadas. Uma análise dos coeficientes de regressão mostra que os parâmetros das curvas Uxt que melhor representam os pontos amostrados foram os obtidos para a estrutura CM1S. A média obtida para o parâmetro A foi de 170,33 kV, o que representa um valor 4,2% menor que a tensão suportável estatística média das estruturas. Percebe-se também que o parâmetro A assumiu valores da ordem de 100%, 98%, 99% e 84% do valor de  $U_{50}$ , respectivamente, para as estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3.

Tabela 5.7 - Parâmetros das curvas Uxt para aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa.

Estrutura	A (kV)	B (kV.μs)	n	R <sup>2</sup>
CM1	194,5533	160,2672	-1,0728	0,8231
CM1S	201,2488	427,0258	-2,1171	0,9460
CM2	154,4044	48,3813	-1,7186	0,5909
CM3	131,1268	126,7531	-0,8090	0,9053

Com os parâmetros da Tabela 5.7 pode-se construir as curvas Uxt apresentadas na Figura 5.6. Verifica-se que as estruturas CM1 e CM1S apresentam suportabilidade praticamente idênticas. Através das curvas Uxt percebe-se que a estrutura CM3 apresenta a menor suportabilidade dentre as estruturas analisadas. Isso está relacionado ao valor do parâmetro A, que determina o maior nível de tensão a qual a estrutura pode ser submetida sem que ocorra uma disrupção.

A estrutura CM2 apresentou a menor suportabilidade considerando a tensão suportável estatística,  $U_{10}$ , enquanto a estrutura CM3 apresentou a menor suportabilidade considerando a análise das curvas Uxt. Isto se explica com a consideração de que no ajuste dos parâmetros da curva Uxt, para a estrutura CM3, a variável A apresentou valor da ordem de 84% do valor de  $U_{50}$ , enquanto para as outras estruturas, a variável A apresentou valores mais próximos a  $U_{50}$ .

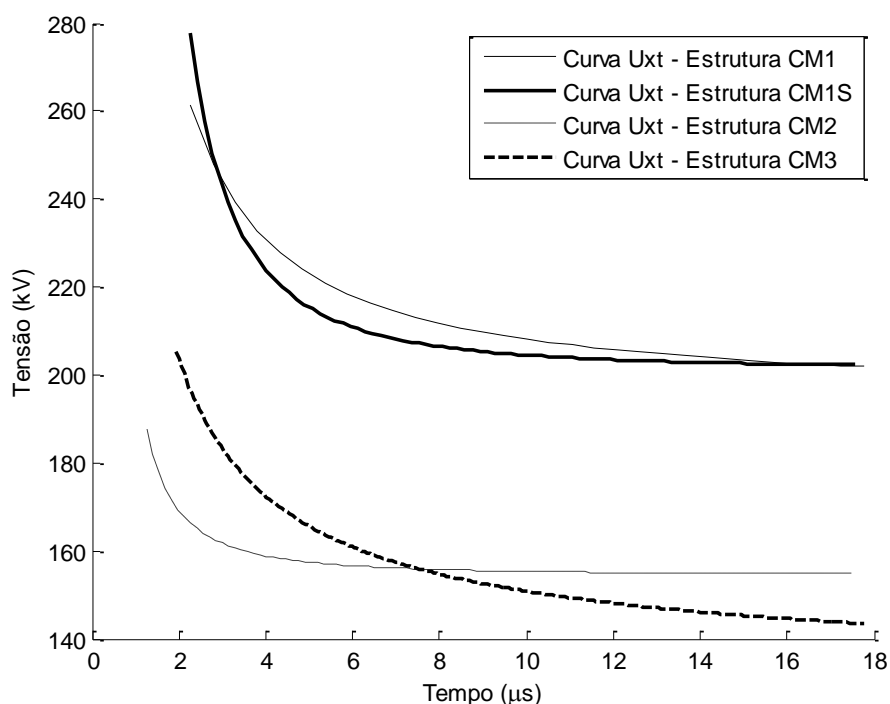


Figura 5.6 - Curvas Uxt das estruturas da rede monofásica de distribuição compacta com a aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa.

A Tabela 5.8 ilustra os parâmetros obtidos para uso no método DE, tendo sido a estrutura CM1S a que apresentou o menor desvio padrão. A média obtida para o parâmetro  $U_0$  foi de 158,45 kV, o que representa um valor 10,9% menor que a tensão suportável estatística média para as estruturas em análise.

Tabela 5.8 - Parâmetros do método DE considerando  $k=1$  e a aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa.

Estrutura	$U_0$ (kV)	$DE^*$ (kV.µs)	Desvio $DE^*$ (%)
CM1	169,2614	205,6664	15,5443
CM1S	175,8881	162,6164	5,8415
CM2	146,7544	26,0050	13,7266
CM3	141,8851	88,9456	6,3794

Na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8 verifica-se que, como já ocorrera nos resultados referentes a tensões de polaridade positiva, quanto mais próximo o valor de  $n$  está de -1, mais o parâmetro  $A$  se aproxima de  $U_0$  no método DE. Quando  $n$  é igual a -1,0728,  $A$  e  $U_0$  são iguais; quando  $n$  é igual a -2,1171, verifica-se a maior diferença percentual entre  $A$  e  $U_0$ , sendo que aquele é 14,4% maior do que este.

O parâmetro  $U_0$  variou para as quatro estruturas monofásicas analisadas na faixa de 85% e 95% do valor da tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), tendo assumido

valores de 87%, 86%, 94% e 91% de  $U_{50}$ , respectivamente, para as estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3.

### 5.3.2 Resultados dos Ensaios e Análises para as Estruturas da Rede

#### *Monofásica de Distribuição Compacta com Cabos Cobertos*

Os resultados obtidos para as estruturas básicas da rede monofásica de distribuição compacta considerando a utilização de cabos com cobertura isolante são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Tensão disruptiva média e desvios padrões associados a cada uma das estruturas ensaiadas considerando a aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa e a utilização de cabos cobertos.

Estrutura	Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
CM1	243,8	2,12	192,0	3,03
CM2	219,5	8,2	185,9	5,9
CM3	223,5	3,3	224,0	3,5

Em média, a tensão disruptiva obtida para as estruturas no ensaio I, que considera cabos novos, foi de 228,9 kV. Percebe-se que a estrutura CM2, que dentre as estruturas avaliadas é aquela com menor suportabilidade, apresentou uma suportabilidade 4,1% menor que a média, enquanto a estrutura CM1, que dentre as estruturas avaliadas é aquela com maior suportabilidade, apresentou suportabilidade 6,5% acima da média. O valor médio da tensão disruptiva obtida no ensaio II, que considera o cabo já perfurado, foi de 200,6 kV, que é 12,4% menor que o valor médio obtido para o cabo novo. Também se constatou que danos (furos) na cobertura dos cabos a distâncias inferiores a 6 m (distância máxima alcançada em laboratório) de um ponto aterrado reduzem drasticamente a suportabilidade da rede compacta, até níveis próximos da suportabilidade para cabos nus, no caso da aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa. Isso é constatado ao se verificar que a suportabilidade obtida para o ensaio II é 11,3% superior à tensão de descarga disruptiva assegurada,  $U_{90}$ , para cabos nus. Uma explicação para essa constatação está relacionada ao acúmulo de cargas positivas sobre o cabo coberto, fenômeno que é observado após a aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa diretamente no condutor (NAKAMURA et al., 1986) e que facilita o fluxo de corrente superficial sobre o cabo. Essas cargas se distribuem ao longo de uma extensão maior na superfície do cabo do que as cargas de polaridade negativa que são induzidas com a aplicação de tensões positivas nos cabos, que tendem

a se concentrar em pontos mais próximos do isolador de pino ou do espaçador polimérico. A maior distribuição de cargas positivas associada à aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa facilita a ocorrência de descargas superficiais (DARVENIZA, 2000). Desse modo, qualquer dano na rede a distâncias inferiores a 6 m de um ponto aterrado reduz muito a suportabilidade da estrutura para solicitações com polaridade negativa.

A Figura 5.7 apresenta uma comparação entre os valores médios, máximos e mínimos da tensão disruptiva associada a cada uma das estruturas avaliadas considerando cabo coberto novo, isto é, tendo em conta o ensaio I. A Figura 5.8 faz comparação semelhante, porém tendo como referência os testes realizados com cabo já perfurado (ensaios II). A Figura 5.9 faz uma composição dos resultados obtidos para os ensaios I e II.

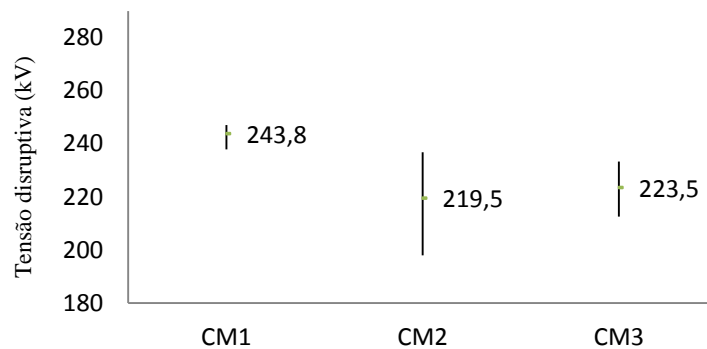


Figura 5.7 - Suportabilidade do cabo coberto novo por estrutura (ensaio I). Os valores apresentados correspondem às tensões disruptivas referentes à aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa.

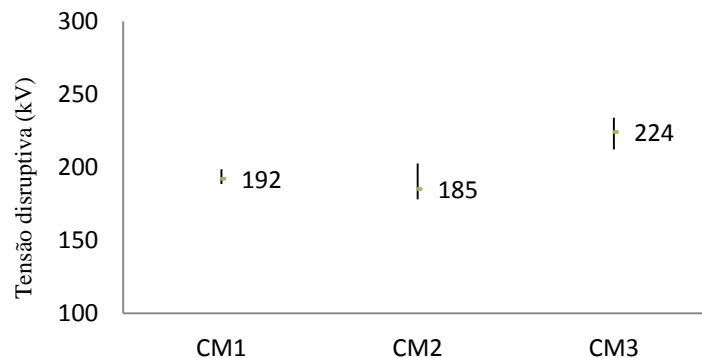


Figura 5.8 - Suportabilidade do cabo coberto novo por estrutura (ensaio II). Os valores apresentados correspondem às tensões disruptivas referentes à aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa.

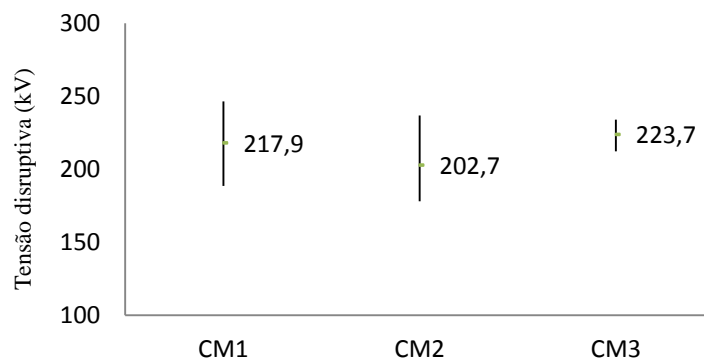


Figura 5.9 - Suportabilidade do cabo coberto novo por estrutura (ensaios I e II combinados). Os valores apresentados correspondem às tensões disruptivas referentes à aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa.

Através das curvas  $U_{xt}$  obtidas para as estruturas com cabos nus, ilustradas na Figura 5.6, foi possível determinar os tempos de ruptura teóricos associados à aplicação da tensão de descarga disruptiva assegurada  $U_{90}$  na estrutura testada. Esses valores podem ser comparados com os valores médios do tempo de ruptura estimados a partir dos testes com cabos cobertos para o ensaio I. Na Tabela 5.10 são apresentados os tempos de ruptura para os cabos nus e os tempos de ruptura para os cabos cobertos. As estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3 tiveram um tempo de ruptura médio para o cabo nu de  $9,6 \mu s$ . O tempo de ruptura médio para essas estruturas com cabo coberto, referente ao ensaio I, foi de  $9,91 \mu s$ . Pode-se ver com isso que o tempo de ruptura médio para o caso onde se consideram cabos nus é praticamente igual ao tempo de ruptura médio quando se utilizam cabos cobertos para a aplicação de tensões impulsivas padronizadas de polaridade negativa, pelo menos com base nos testes realizados.

Para a estrutura CM1 foram obtidos valores de tempo de ruptura (cabo nu) e de tempo de ruptura médio (cabo coberto) bem diferentes dos valores obtidos para as outras estruturas. Tais parâmetros se mostraram maiores que as médias globais obtidas considerando os tempos de ruptura e os tempos de ruptura das outras estruturas. A justificativa para essa diferença no tempo de ruptura se deve ao desvio padrão obtido no método dos acréscimos e decréscimos, aplicado nos testes com cabos nus, que foi maior que o obtido para as demais estruturas. Isso levou a maiores erros nos parâmetros de ajuste da curva  $U_{xt}$  da estrutura CM1, o que refletiu em erros na extrapolação dos resultados obtidos em laboratório. Por outro lado, uma explicação da diferença no tempo de ruptura médio da estrutura CM1 em relação às demais estruturas requer que

novos ensaios com cabos cobertos sejam realizados considerando cabos mais longos, visando à eliminação da eventual influência das extremidades do cabo nos resultados obtidos.

Tabela 5.10 - Tempo até à disrupção, para cabos nus e cabos cobertos, considerando a aplicação de tensões impulsivas com polaridade negativa.

Estrutura	$U_{90}$ (kV) (cabo nu)	Tempo de disrupção ( $\mu$ s) (cabo nu)	Suportabilidade (kV) (cabo coberto, ensaio I)	Tempo de disrupção médio ( $\mu$ s) (cabo coberto, ensaio I)
CM1	200,1	22,7	243,7	15,14
CM1S	210,7	5,97	*	*
CM2	161,3	3,06	215,9	6,02
CM3	158,5	6,64	208,5	8,57

## 5.4 Síntese e Análise Comparativa dos Resultados Obtidos com a Aplicação de Tensões Impulsivas com Polaridades Positiva e Negativa

### 5.4.1 Estruturas Monofásicas da Rede de Distribuição Compacta com Cabos Nus

A Tabela 5.11 sintetiza os parâmetros obtidos nos testes com tensões impulsivas de polaridades positiva e negativa considerando as diferentes estruturas avaliadas, supondo a utilização de cabos nus. Analisando-se os valores apresentados percebe-se, conforme esperado (KUFFEL, 2000), que em todos os casos a suportabilidade é maior quando aplicadas tensões com polaridade negativa. Verifica-se que as tensões de descarga disruptiva assegurada são, para tensões impulsivas padronizadas com polaridade positiva, 4,7%, 13,0%, 16,8% e 9,2% menores que os valores correspondentes à aplicação de tensões com polaridade negativa, tendo como referência as estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3, respectivamente. Isso mostra que a estrutura CM2 é a que tem maior variação na suportabilidade quando modificada a polaridade da tensão impulsiva aplicada.



Tabela 5.11 - Suportabilidade das estruturas monofásicas da rede de distribuição compacta considerando a utilização de cabos nus e a aplicação de tensões impulsivas de polaridades positivas e negativas.

Estrutura	Polaridade	$U_{50}$ (kV)	$U_{10}$ (kV)	$U_{90}$ (kV)
CM1	Positiva (+)	185,36	180,22	190,50
	Negativa (-)	194,55	188,99	200,12
CM1S	Positiva (+)	177,90	173,38	182,43
	Negativa (-)	204,52	198,29	210,75
CM2	Positiva (+)	129,87	126,28	133,47
	Negativa (-)	156,12	150,91	161,34
CM3	Positiva (+)	141,60	135,55	147,65
	Negativa (-)	155,92	153,29	158,55

Os valores que melhor representam os parâmetros da equação (3.8) usados para reproduzir as curvas  $U_{xt}$ , Figura 5.10, são mostrados na Tabela 5.12. A análise dos coeficientes de regressão ( $R^2$ ) mostra que, no ajuste dos parâmetros de (3.8) para aproximar os pontos obtidos em laboratório, a estrutura CM2, para os testes com polaridade negativa, foi a que obteve uma pior aproximação. Por outro lado, a melhor aproximação foi obtida para a estrutura CM1 nos testes com polaridade positiva.

Tabela 5.12 - Parâmetros das curvas  $U_{xt}$  para tensões impulsivas de polaridades positiva e negativa.

Estrutura	Polaridade	$A$ (kV)	$B$ (kV.μs)	$n$	$R^2$
CM1	Positiva (+)	164,2298	275,7302	-1,4209	0,9668
	Negativa (-)	194,5533	160,2672	-1,0728	0,8231
CM1S	Positiva (+)	144,0998	212,7672	-0,9161	0,9276
	Negativa (-)	201,2488	427,0258	-2,1171	0,9460
CM2	Positiva (+)	115,7164	103,9149	-1,1196	0,8617
	Negativa (-)	154,4044	48,3813	-1,7186	0,5909
CM3	Positiva (+)	141,6027	191,5825	-2,0096	0,8754
	Negativa (-)	131,1268	126,7531	-0,8090	0,9053

Na Figura 5.10 são apresentadas todas as curvas  $U_{xt}$  obtidas a partir dos ensaios frente a tensões impulsivas de polaridades positiva e negativa, organizadas por estrutura testada. Com base nos resultados apresentados, fica nítido que tensões com polaridade positiva são mais severas quando se considera o ar como único meio dielétrico entre o condutor e as partes aterradas. Além disso, também é possível observar que a estrutura CM2 é aquela que apresenta uma maior diferença entre a suportabilidade para tensão impulsiva de polaridade positiva e a tensão impulsiva de polaridade negativa para instantes de tempo entre 2 μs e 6 μs, ou seja, para os instantes em que foi obtida a maioria dos tempos de disrupção para as estruturas ensaiadas.

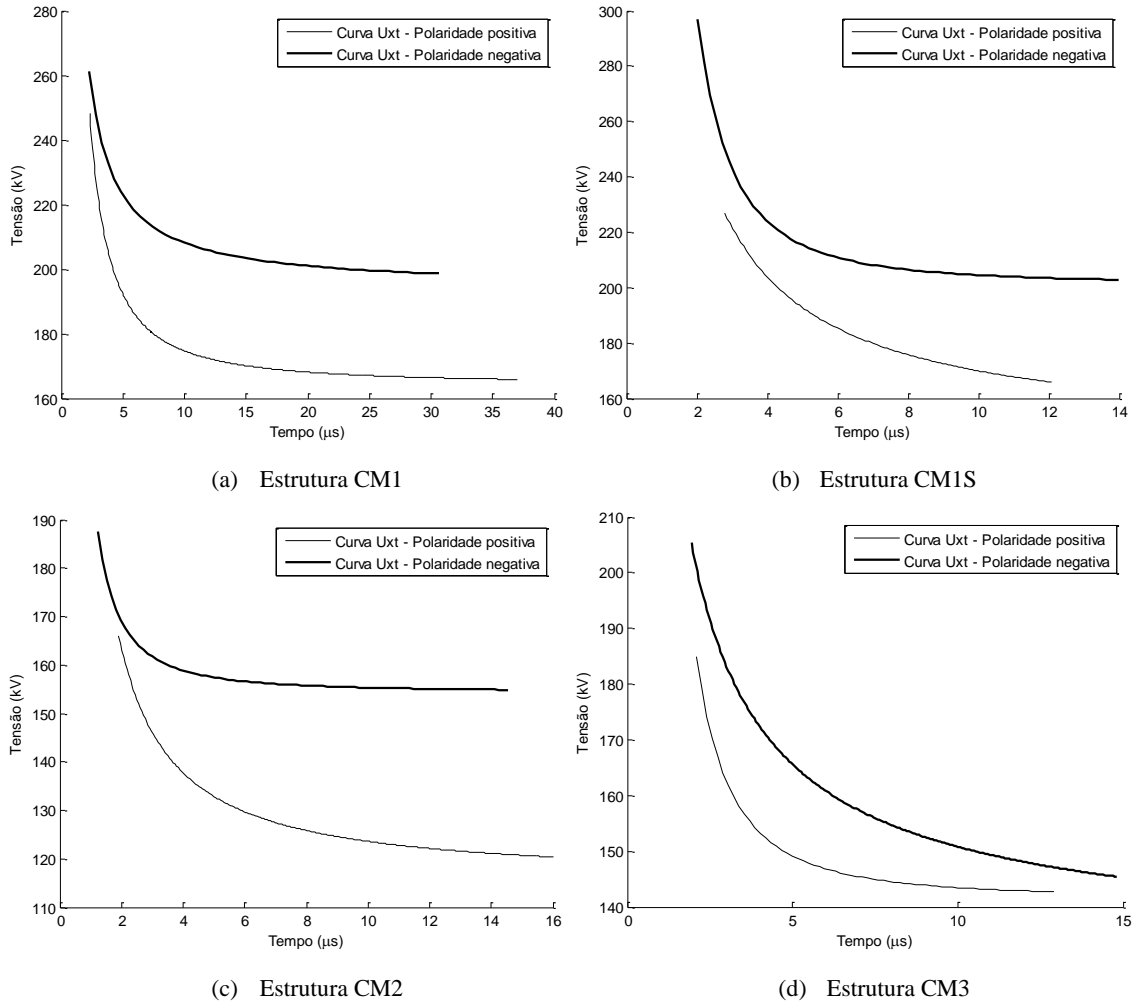


Figura 5.10- Curvas Uxt obtidas através da aplicação de tensões impulsivas com polaridades positiva e negativa nas estruturas monofásicas da rede de distribuição compacta com cabos nus. As curvas são apresentadas em módulo.

Os parâmetros do método DE, obtidos através das curvas Uxt da Figura 5.10, são apresentados na Tabela 5.13. A análise realizada nas seções 5.2 e 5.3 mostram que  $U_0$  assume valores entre 80% e 90% do valor de  $U_{50}$  considerando-se a aplicação de tensões impulsivas com polaridades positivas e valores entre 85% e 95% do valor de  $U_{50}$  considerando-se a aplicação de tensões impulsivas com polaridades negativas. Um fato interessante consiste em observar que a mudança na polaridade alterou a faixa de variação de  $U_0$  em relação a  $U_{50}$ , o que está em conformidade com o significado físico de  $U_0$  e com a expectativa de a suportabilidade do ar (meio dielétrico autorrecuperante estressado) ser maior para tensões impulsivas de polaridade negativa do que para tensões de polaridade positiva. Também na Tabela 5.13 verifica-se que, para tensões de polaridade negativa, os desvios referentes ao cálculo dos parâmetros para o método DE foram maiores do que para tensões com polaridade positiva.

Tabela 5.13 - Parâmetros do método DE considerando  $k=1$  e a aplicação de tensões impulsivas de polaridades positivas e negativas.

Estrutura	Polaridade	$U_0$ (kV)	$DE^*$ (kV.μs)	Desvio $DE^*$ (%)
CM1	Positiva (+)	148,2888	176,5184	0,4748
	Negativa (-)	169,2614	205,6664	15,5443
CM1S	Positiva (+)	144,0998	194,4563	1,9037
	Negativa (-)	175,8881	162,6164	5,8415
CM2	Positiva (+)	112,9891	74,9392	1,8567
	Negativa (-)	146,7544	26,0050	13,7266
CM3	Positiva (+)	126,0264	89,3432	4,4384
	Negativa (-)	141,8851	88,9456	6,3794

#### 5.4.2 Estruturas Monofásicas da Rede de Distribuição Compacta com Cabos Cobertos

A Tabela 5.14 apresenta os resultados da suportabilidade dos cabos cobertos para o ensaio I (cabo novo) e para o ensaio II (cabo perfurado) comparando os desempenhos obtidos para a aplicação de tensões impulsivas padronizadas com polaridades positiva e negativa. Nota-se que para as estruturas CM1 e CM2 a suportabilidade para os testes com polaridade negativa foi menor que para os testes com polaridade positiva, o que está de acordo com os resultados obtidos por Nakamura et al. (1986) na avaliação do desempenho de cabos com cobertura isolante frente a solicitações impulsivas. Nakamura et al. associam esta menor suportabilidade para tensões de polaridade negativa ao acúmulo de cargas positivas que ocorre sobre o cabo coberto durante testes com polaridade negativa. Conforme discutido anteriormente, verifica-se que cargas positivas se distribuem em maiores extensões ao longo da cobertura isolante do cabo, enquanto cargas negativas se concentram em pontos mais próximos da estrutura (DARVENIZA, 2000). A menor densidade de cargas positivas acumuladas na superfície do cabo em pontos próximos à estrutura, referente à aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa diretamente no cabo, gera uma menor tensão de oposição ao impulso atmosférico aplicado. Isso permite que um menor nível de tensão de polaridade negativa seja necessário para levar a estrutura testada a uma disrupção, em comparação com a aplicação de tensões de polaridade positiva.

Nos casos avaliados, a suportabilidade das estruturas CM1 e CM2 para tensões impulsivas padronizadas com polaridade negativa é 13,4% e 11,7% menor que os

valores correspondentes para a polaridade positiva, considerando o ensaio I. Por outro lado, para a estrutura CM3 a suportabilidade para a tensão impulsiva padronizada com polaridade positiva foi 11,7% menor que para a polaridade negativa, considerando o ensaio I. Isso é justamente o contrário do observado para as estruturas CM1 e CM2. Justifica-se esta observação levando-se em consideração que as disrupções verificadas na estrutura CM3 ocorreram em sua grande maioria na isolação realizada com fita de alta fusão e fita isolante, e não na cobertura de XLPE do cabo. Esta menor suportabilidade da estrutura CM3 com cabos cobertos para polaridade positiva vai ao encontro do resultado mostrado na seção 5.2, onde se vê que a utilização desta estrutura com cabos cobertos tem comportamento parecido com o de outras estruturas utilizando cabos nus. Com base nestes resultados pode-se afirmar que na estrutura CM3 o meio dielétrico preponderante é o ar, sendo as contribuições proporcionadas pela fita de alta fusão e pela fita isolante são praticamente irrelevantes no que se refere ao aumento da suportabilidade da estrutura frente à aplicação de impulsos atmosféricos padronizados.

Tabela 5.14 - Tensões disruptivas médias e desvios padrões associados a cada uma das estruturas monofásicas ensaiadas da rede de distribuição compacta considerando a utilização de cabos cobertos.

Estrutura	Polaridade	Ensaio I (kV)	Desvio (%)	Ensaio II (kV)	Desvio (%)
CM1	Positiva (+)	281,7	3,09	271,17	4,79
	Negativa (-)	243,8	2,12	192,0	3,03
CM1S	Positiva (+)	289,7	3,6	253,0	15,2
	Negativa (-)	*	*	*	*
CM2	Positiva (+)	248,6	6,5	232,7	13,7
	Negativa (-)	219,5	8,2	185,9	5,9
CM3	Positiva (+)	197,3	0,4	196,2	2,4
	Negativa (-)	223,5	3,3	224,0	3,5

A partir da Tabela 5.14 é possível inferir que a suportabilidade média das estruturas CM1, CM2 e CM3 é de 242,5 kV (+) e de 228,9 kV (-) para o ensaio I, com cabos cobertos novos, e de 233,4 kV (+) e 200,6 kV (-) para o ensaio II, com cabos cobertos perfurados. Percebe-se dessa forma que a suportabilidade das estruturas testadas foi, para a aplicação de tensões impulsivas padronizadas com polaridade negativa, 5,6% e 14,1% menor do que para a aplicação de tensões com polaridade positiva, considerando os ensaios I e II, respectivamente. Para tensões de polaridade positiva é observado que o ensaio I apresenta suportabilidade 3,9% superior ao ensaio II; para tensões de polaridade negativa, o ensaio I apresenta suportabilidade 14,1%

superior ao ensaio II. É válido notar que na realização dos ensaios com cabos cobertos e tensões de polaridade negativa foram verificadas dificuldades associadas às dimensões físicas do laboratório, que não permitiram a realização de testes com cabos suficientemente longos para eliminar por completo a ocorrência de disrupções para a sua extremidade. Dessa forma, espera-se que quando aumentado o tamanho dos cabos cobertos utilizados nos ensaios com tensões impulsivas de polaridade negativa, os furos que ocorrerem na cobertura isolante possam se manifestar em distâncias superiores às indicadas nesta dissertação, possibilitando o aumento da suportabilidade para o ensaio II e a diminuição da diferença entre a suportabilidade dos ensaios I e II.

A Tabela 5.15 apresenta uma comparação entre a tensão de descarga disruptiva assegurada, para os cabos nus, e a tensão suportável, para os cabos cobertos, considerando a aplicação de tensões impulsivas de polaridades positiva e negativa.

Tabela 5.15 - Tensões disruptivas associadas às estruturas das redes compactas monofásicas considerando a aplicação de tensões impulsivas de polaridades positiva e negativa e supondo a utilização de cabos nus ou cobertos.

Estrutura Polaridade	CM1		CM1S		CM2		CM3	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
$U_{90}$ (kV) (cabo nu)	190,5	200,1	182,4	210,7	133,5	161,3	147,7	158,5
Suportabilidade (kV) (cabo coberto, ensaio I)	281,7	243,8	289,7	*	248,6	219,5	197,3	223,5

Para a estrutura CM1 a suportabilidade com cabos cobertos foi 47,9% (+) e 21,8% (-) superior à suportabilidade para cabos nus. A estrutura CM1S apresenta suportabilidade para cabos cobertos 58,8% superior à suportabilidade para cabos nus. Já para a estrutura CM2, a suportabilidade para cabos cobertos é 86,2% (+) e 36,1% (-) superior à suportabilidade para cabos nus. Por fim, a estrutura CM3 apresenta suportabilidade para cabos cobertos 33,6% (+) e 41,0% (-) superior à suportabilidade para cabos nus. Com exceção da estrutura CM3, nas demais estruturas a substituição dos cabos nus por cabos cobertos levou a um aumento relativo da suportabilidade que é maior para a aplicação de tensões impulsivas de polaridade positiva do que para a aplicação de tensões de polaridade negativa.

# 6 Conclusões e Propostas de Continuidade

## 6.1 Considerações Iniciais

A principal motivação para a realização desta dissertação foi a necessidade de se caracterizar a suportabilidade das redes de distribuição compactas frente a solicitações de origem atmosférica. Esse conhecimento é de fundamental importância, visto que aproximadamente 30% dos desligamentos não programados nas redes de distribuição aéreas da CEMIG são causados por descargas atmosféricas. Nesse contexto, este trabalho teve início com o estudo dos tipos de redes de distribuição, apresentado no capítulo 2, e das metodologias utilizadas para análise do nível de suportabilidade da isolação de materiais dielétricos, apresentado no capítulo 3. Em seguida, foram realizados ensaios em laboratório com as estruturas monofásicas básicas das redes compactas, cujos resultados, apresentados no capítulo 4, foram empregados para a estimação de parâmetros úteis para a caracterização do comportamento da isolação. Em seguida, apresentou-se no capítulo 5 uma síntese e uma análise comparativa dos resultados obtidos.

As principais conclusões obtidas nesta dissertação são apresentadas na seção 6.2. As propostas de continuidade são apresentadas na seção 6.3.

## 6.2 Conclusões

A principal diferença entre as redes compactas e as redes convencionais consiste na presença da cobertura isolante na primeira e na utilização de cabos nus na segunda. No caso de cabos nus, a isolação entre os condutores e as partes aterradas é autorrecuperante. Por outro lado, na presença da cobertura isolante essa isolação torna-se não autorrecuperante. Assim, duas metodologias de ensaios se fazem necessárias: uma para redes que utilizam cabos nus, como é o caso das redes de distribuição

convencionais, e outra para redes que utilizam cabos cobertos, como é o caso das redes de distribuição compactas. A norma ABNT (2013) prevê metodologias para a obtenção do nível de suportabilidade de redes com cabos nus frente a sobretensões impulsivas padronizadas. Para redes compactas, contudo, não existe definição em norma de procedimentos para obtenção do seu nível de suportabilidade. Sendo assim, nesta dissertação foram propostos procedimentos de ensaios para a obtenção do nível de suportabilidade das estruturas das redes compactas considerando cabos com cobertura isolante.

Foi analisado o comportamento de quatro estruturas utilizadas em redes de distribuição compactas monofásicas: CM1, CM1S, CM2 e CM3. Duas condições foram avaliadas: utilização de cabos nus e utilização de cabos cobertos. Os ensaios com cabos nus buscaram simular uma situação crítica da rede quando a cobertura do cabo está muito deteriorada. A partir desses ensaios, foram obtidos os seguintes parâmetros: tensão de descarga disruptiva a 50% ( $U_{50}$ ), tensão de descarga disruptiva assegurada ( $U_{90}$ ), tensão suportável estatística ( $U_{10}$ ), curvas tensão-tempo (Uxt) para o impulso atmosférico padronizado e parâmetros para o método do efeito disruptivo (DE), que permite prever o comportamento da isolação frente a impulsos atmosféricos não padronizados. Os ensaios com cabos cobertos buscaram simular a condição na qual o cabo está novo (ensaio I) ou sofreu um pequeno dano (ensaio II). Todos os ensaios foram realizados considerando tensões impulsivas com polaridades positivas e negativas.

Considerando as redes compactas monofásicas com cabos nus, caso crítico quando os cabos cobertos perdem sua isolação por completo, e a aplicação de tensões de polaridade positiva, verificou-se que  $U_{50}$  assumiu valores entre 129,9 kV e 185,4 kV, que são 18% e 69% superiores ao valor de referência de 110 kV. Nos casos em questão, a estrutura CM1 foi a que apresentou maior suportabilidade dentre as estruturas avaliadas, enquanto a CM2, a menor. Para os casos onde foram aplicadas tensões de polaridade negativa,  $U_{50}$  assumiu valores entre 155,9 kV e 204,5 kV, que são 42% e 86% superiores ao valor de referência de 110 kV. Nos casos em questão, a estrutura CM1S apresentou a maior suportabilidade dentre as estruturas avaliadas, enquanto a estrutura CM2, a menor. Nota-se que o parâmetro A da curva Uxt, que representa o nível teórico de tensão abaixo do qual não ocorrerá disrupção, apresentou valores que

---

variaram entre uma faixa de 80% a 100% do valor do  $U_{50}$ , para as duas polaridades. Ao ser utilizado o método DE, percebeu-se que o parâmetro  $U_0$ , que tem significado semelhante ao parâmetro  $A$ , assumiu valores na faixa de 80% a 90% (+) e de 85% a 95% (-) do valor de  $U_{50}$ . O resultado para polaridade positiva foi ao encontro dos anteriormente obtidos na literatura para outros tipos de estruturas da rede de distribuição compacta trifásica.

Nos ensaios com cabos cobertos verificou-se que as estruturas CM1S e CM1 apresentaram a maior suportabilidade dentre as estruturas ensaiadas, respectivamente para as polaridades positiva e negativa, enquanto as estruturas CM3 e CM2 apresentaram a menor suportabilidade, respectivamente para as polaridades positiva e negativa. A média da suportabilidade obtida para as estruturas ensaiadas é de 254,3 kV (+) e de 228,9 kV (-) para o ensaio I, referente ao uso de cabos cobertos novos, e de 238,3 kV (+) e 200,6 kV (-) para o ensaio II, referente ao uso de cabos cobertos perfurados.

Nos testes com cabos cobertos considerando a aplicação de tensões com polaridade positiva, verificou-se que a suportabilidade do cabo novo, obtida por meio do ensaio I, e a do cabo já perfurado por ruptura anterior, obtida por meio do ensaio II, são muito parecidas, sendo esta 6,3% inferior àquela. Percebe-se que a distância do furo até o ponto aterrado mais próximo é o fator determinante no nível de suportabilidade do cabo coberto já danificado, situação simulada no ensaio II. Isso leva à conclusão de que eventuais danos na cobertura isolante dos cabos das redes compactas terão maior influência na suportabilidade da rede quanto mais próximos estes danos estiverem de um ponto aterrado da estrutura, podendo a suportabilidade de estruturas que utilizam cabos cobertos se aproximar da suportabilidade verificada com a utilização de cabos nus.

Outra conclusão importante é que um cabo coberto novo e um cabo coberto já danificado podem ter a mesma suportabilidade, desde que o dano na cobertura esteja suficientemente distante dos pontos aterrados próximos. Por exemplo, se forem desconsiderados furos distantes a menos de 40 cm do isolador de pino (estrutura CM2) ou do separador polimérico (estruturas CM1 e CM1S), a suportabilidade das estruturas de redes compactas obtidas a partir do ensaio II é apenas 2,56% inferior à suportabilidade verificada com a utilização de cabo novo, caso sejam consideradas

---



tensões impulsivas com polaridade positiva. Isso sugere que modificações na cobertura isolante do cabo causadas pela realização de derivações e conexões na rede a distâncias superiores a 40 cm do isolador de pino ou do espaçador polimérico tendem a não ter impacto significativo na suportabilidade da estrutura, desde que se considere a aplicação de tensões impulsivas de polaridade positiva, que são as que se manifestam com maior frequência em condições práticas por estarem relacionadas à incidência de descargas atmosféricas negativas descentes na vizinhança da rede.

Por outro lado, considerando a aplicação de tensões impulsivas de polaridade negativa, constatou-se que danos na rede a uma distância inferior a 6 m podem reduzir significativamente a suportabilidade da rede compacta. Isso é confirmado ao se verificar que a suportabilidade de estruturas com cabos cobertos já perfurados, obtida por meio do ensaio II, é apenas 11,3% superior à tensão de descarga disruptiva assegurada,  $U_{90}$ , das mesmas estruturas utilizando cabos nus. Dessa forma, a distância entre o furo no cabo e o ponto aterrado mais próximo que garante que a suportabilidade das estruturas com cabos novos e perfurados seja praticamente a mesma é muito maior para tensões impulsivas de polaridade negativa que para as de polaridade positiva.

Levando-se em consideração as estruturas CM1S e CM1, verificou-se que ambas apresentaram níveis semelhantes de suportabilidade frente a impulsos atmosféricos padronizados. Isso leva à conclusão de que o braço anti-balanço tem pequena influência sobre a suportabilidade da estrutura CM1, tanto para cabos cobertos quanto cabos nus, independentemente da polaridade de tensão considerada.

As estruturas CM1, CM1S, CM2 e CM3 com cabos nus tiveram maior suportabilidade quando aplicadas tensões impulsivas de polaridade negativa. Esta suportabilidade foi em média 12% superior à suportabilidade para tensões de polaridade positiva. Por outro lado, para as estruturas CM1 e CM2 com cabos cobertos, o contrário foi observado e a suportabilidade para polaridade positiva foi em média 14,5% superior à suportabilidade verificada para polaridade negativa. A partir dos resultados obtidos para cabos cobertos pode-se concluir que o acúmulo de cargas sobre a cobertura isolante é o fator determinante para a dependência do nível de suportabilidade das estruturas devido à polaridade da tensão impulsiva aplicada, e que a maior distribuição de cargas positivas induzidas ao longo da superfície isolante do cabo diminui o nível de

suportabilidade da estrutura testada para a aplicação de tensões de polaridade negativa nos cabos em relação à aplicação de tensões de polaridade positiva.

Nos ensaios com cabos cobertos e aplicação de tensões impulsivas com polaridade positiva, a estrutura CM3, que é utilizada em fim de rede, foi a que apresentou o menor nível de suportabilidade em relação às demais estruturas monofásicas ensaiadas. As disrupções ocorreram em quase todos os casos do ponto aterrado do isolador de ancoragem para a ponta do cabo, onde se realiza isolação com fita de alta fusão e fita isolante. Somente em duas amostras, nos ensaios com polaridade positiva, ocorreu a perfuração da cobertura isolante de XLPE do cabo coberto. Buscando aumentar a suportabilidade, variou-se o tamanho do rabicho do cabo na terminação. Entretanto, essa variação não refletiu em um ganho na suportabilidade da estrutura CM3. Dessa forma foi possível inferir que o ponto frágil é a ponta do cabo onde se realiza a isolação. Além disso, a partir da variação da polaridade da tensão impulsiva aplicada sobre a estrutura CM3, conclui-se que a isolação realizada com fita de alta fusão e com fita isolante não interfere eletricamente na suportabilidade dessa estrutura para solicitações de origem atmosféricas.

Nos ensaios com cabos cobertos, a polaridade da tensão impulsiva aplicada também influenciou no tamanho do cabo a ser utilizado. Quando aplicadas tensões impulsivas de polaridade positiva, o tamanho de 5 m (2,5 m para cada lado da estrutura testada) foi suficiente para que não ocorressem disrupções entre a estrutura e a ponta do cabo. Por outro lado, para tensões de polaridade negativa, um cabo com extensão de 12 m (6 m para cada lado da estrutura testada) não foi suficiente para garantir a não ocorrência de descargas superficiais para a ponta do cabo, para as estruturas CM1, CM1S e CM2. Devido às restrições físicas do laboratório do LRC, o tamanho máximo de cabo utilizado foi de 12 m. Dessa forma, os resultados apresentados nesta dissertação considerando cabos cobertos e tensões de polaridade negativa devem ser vistos com as devidas ressalvas, posto que ocorreram muitas disrupções para a ponta do cabo durante os ensaios. Ainda assim, esses resultados servem de indicativo do nível de suportabilidade das redes compactas frente a impulsos atmosféricos de polaridade negativa.

### 6.3 Propostas de Continuidade

Após o término das atividades relacionadas a esta dissertação, é possível enxergar com maior clareza alguns pontos a serem investigados em trabalhos posteriores.

Um ponto a ser explorado em trabalhos futuros deve ser a avaliação da influência do comprimento do cabo coberto nos ensaios com estruturas da rede compacta com a aplicação de tensões de polaridade negativa, visto que nesta dissertação constatou-se que o comprimento de 12 m é insuficiente para eliminar por completo as disrupções que ocorrem para as extremidades do cabo.

Considerando que as redes de distribuição são compostas por estruturas trifásicas, um tópico importante a ser investigado em trabalhos futuros consiste na determinação dos níveis de suportabilidade das estruturas da rede compacta trifásica e, de forma especial, das estruturas CE1, CE1S, CE2 e CE3, que são as mais comuns em redes urbanas. Nesse contexto, considera-se importante a realização de ensaios em número que permita uma caracterização estatística mais completa da suportabilidade das estruturas das redes compactas. Também é importante avaliar de forma mais criteriosa a correção para as condições atmosféricas de referência a ser empregada em testes com estruturas que utilizam cabos com cobertura isolante.

Por fim, seria importante investigar a aplicação de métodos de predição da suportabilidade das estruturas da rede de distribuição compacta com cabos cobertos para formas de onda impulsivas não padronizadas. Isso abrangeria os casos em que se deseja conhecer a resposta das redes compactas a formas de ondas típicas de sobretensões provocadas por descargas atmosféricas que incidam nas imediações ou diretamente sobre as estruturas da rede.

# Referências Bibliográficas

ANCAJIMA, A., I. BARAN, M. COSTEA, A. CARRUS, E. CINIERI, G. DRAGAN, C. MAZZETTI, **“Breakdown Characteristics of MV Distribution and Electric Traction Lines Insulators Stressed by Standard and Short Tail Lightning Impulses,”** IEEE POWER TECH. CONFENCE, San Petersburg, Russia, 2005.

ANCAJIMA, A., A. CARRUS, E. CINIERI, C. MAZZETTI, **“Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV insulators voltage-time characteristics under standard and non standard lightning impulses,”** IEEE POWER TECH. CONFENCE, Lausanne, Suíça, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), **“Informações Gerenciais,”** 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE), Setor de Distribuição, Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>, Acesso em 15 de Junho de 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **“Cabos cobertos com material polimérico para redes de distribuição aérea de energia elétrica fixados em espaçadores, em tensões de 13,8 kV a 34,5 kV”** ABNT NBR 11873, Rio de Janeiro, 2011b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **“Redes de Distribuição Aérea de Energia Elétrica com Condutores Nus,”** ABNT NBR 15688, Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), “**Cabos de potência com isolamento extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV — Requisitos construtivos**” ABNT NBR 6251, Rio de Janeiro, 2012b.

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

BRITO, M. L. S., P. M. CASTRO, “**Viabilidade Econômica de Redes de Distribuição Protegidas**,” REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ARBORIZAÇÃO URBANA, VOL 2, No 1, 2007.

CALDWELL, R. O., M. DARVENIZA, “**Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation**,” IEEE Trans. PAS, VOL 92, p. 1420-1428, 1973.

CAMPOS, A. F. M., “**Cálculo de Sobretensões Causadas por Descargas Atmosféricas Indiretas em Linhas de Distribuição Aéreas Considerando Falhas de Isolamento**,” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA (CELESC), “**Critérios Para Utilização de Redes de Distribuição**,” Santa Catarina, 2012.

CHISHOLM, W. A., “**New Challenges in Lightning Impulse Flashover Modeling of Air Gaps and Insulator**,” IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010.

CHOWDHURI, P., MISHRA, A. K., MC CONNELL, B. W., “**Volt-time Characteristics of Short Air Gaps and Nonstandard Voltage Waves**,” IEEE Trans. Power Delivery, VOL 12, No 01, p. 470-476, 1997.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG), “**Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas**,” ND-2.9, Minas Gerais, 2012.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL), “**Utilização e Aplicação de Redes de Distribuição Subterrâneas**,” Paraná, 2010.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL), 60 anos em 60 fatos: 1993, Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Ff955de1715fe04f603257d6b003ff7b5>>, Acesso em 06 de Maio de 2015.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ (CPFL), **“Rede Primária Compacta 15 kV e 25 kV - Estruturas Básicas - Montagem,”** São Paulo, 2009.

CORTÉS, F. P. E., VÁZQUEZ, I. R., GÓMEZ, P., **“Electric Field Analysis of Spacer Cable Systems under Polluted Conditions,”** Electrical Insulation Conference, Philadelphia, Pennsylvania, Estados Unidos da América, 2014.

DARVENIZA, M., **“Electrical Breakdown of Air Between Insulated Conductors,”** International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, p. 615-620, 2000.

DARVENIZA, M., VLASTOS, A. E., **“The Generalized Integration Method for Predicting Impulse Volt-Time Characteristics for Non-Standard Wave Shapes - a Theoretical Basis,”** IEEE Trans. Elect. Insul., VOL 23, No 03, p. 373-381, 1988.

DE CONTI, A. R., **“Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas: Transferência de Surtos através de Transformadores de Distribuição,”** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2001.

DE CONTI, A. R., **“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. 2006.

DE CONTI, A. R., S. VISACRO, **“Analytical Representation of Single -and Double-Peaked Lightning Current Waveforms”** IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 49, NO. 2, Maio 2007.

DE CONTI, A. R., E. PEREZ, E. SOTO, F. H. SILVEIRA, S. VISACRO, H. TORRES, **“Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines**

---

**Including Insulation Breakdown,”** IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, Outubro 2010.

FEDERAÇÃO DAS COOPERATIVAS DE ENERGIA DO ESTADO DE SANTA CATARINA (FECOERUSC), “**Rede Compacta de Distribuição de Energia Elétrica: Estruturas,**” FECO-D-11, Santa Catarina, 2010.

GOMES, R. M., G. S. LIMA, A. DE CONTI, F. H. SILVEIRA, S. VISACRO, W. A. SOUZA, J. L. C. LIMA, “**Volt-time Curve Measurements of 15-kV Distribution Line Polymeric Insulators and Estimation of DE Parameters,**” Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Nagoya, Japão, 2015.

GUIMARÃES, M., P. RAMOS, R. SOBREIRO, S. VISACRO, “**Lightning Measurements at Morro do Cachimbo Station: new results,**” International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.

GUIMARÃES, P. R. B., “**Métodos Quantitativos Estáticos,**” Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008.

HAGENGUTH, J. H., “**Volt-time Areas of Impulse Spark-over,**” AIEE Trans., VOL 60, 1941.

HAYT, W. H., J. A. BUCK, “**Eletromagnetismo,**” Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, 2003.

HE, J., S. GU, S. CHEN, R. ZENG, W. CHEN, “**Discussion on Measures Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines,**” IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, No. 2, 2008.

JONES, A. R., “**Evaluation of the Integration Method for Analysis of Nonstandard Surge Voltages,**” IEEE Transactions on Power Delivery, VOL 20, No 2, p. 1206-1208, 1954.

KUFFEL, E., ZAENGL, W. S., KUFFEL, J., “**Higth Voltage Engineering Fundamentals,**” Butterworth-Heinemann, Boston, Estados Unidos da América, 2000.

LEÃO, R., **“GTD - Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica”**  
Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2009

LEE, R. E., D. E. FRITZ, P. H. STILLER, D. F. SHANKLE, **“Prevention of Covered Conductor Burndown on Distribution Circuits - Arcing Protection Devices,”** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-101, No. 8, p 2434-2438, 1982.

NAKAMURA, K., P. J. MC KENNY, M. S. A. A. HAMAMM, G. ADAMS, R. FERNANDES, F. RUSHDEN, **“Impulse Breakdown Characteristics of 13.2 kV Covered Conductor Insulator/Tie Configurations,”** IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. PWRD-1, No. 4, 1986.

NÓBREGA, A. M., M. L. B. MARTINEZ, A. A. A. QUEIROZ, **“Investigation and Analysis of Electrical Aging of XLPE Insulation for Medium Voltage Covered Conductors Manufactured in Brazil,”** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation VOL. 20, No. 2, 2013.

NORMA REGULAMENTADORA (NR), **“Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade,”** NR10, Ministério do Trabalho e Emprego, Portaria GM 598, Brasília, 2004.

NUCCI, C. A., F. RACHIDI, M. V. IANOZ, C. MAZZETTI, **“Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines,”** IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. VOL 35. NO. 1 , 1993.

REDE ENERGIA, **“Montagem de Redes de Distribuição Compacta Protegida - Classe 15 kV,”** NTD-RE-001, Rio de Janeiro, 2009.

ROCHA, R. C. C., R. C. BERRÊDO, R. A. O. BERNIS, E. M. GOMES, F. NISHIMURA, L. D. CICARELLI, M. R. SOARES, **“New Technologies, Standards, and Maintenance Methods in Spacer Cable Systems,”** IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 17, No. 2, 2002.



SILVA, G. C., **“Comportamento Elétrico e Dielétrico de Cabos de Potência Extrudados Utilizados em Redes de Distribuição de Energia Elétrica,”** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2000.

SILVA, G. C., M. MUNARO, F. PIAZZA, S. R. JÚNIOR, L. E. LINERO, L. C. HARTMANN, **“Desenvolvimento de Nova Metodologia para Avaliação de Equipamentos e Acessórios de Redes Compactas Protegidas sob Condições de Multiestressamento,”** 2012.

SILVEIRA, F. H. **“Modelagem para Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas,”** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.

SILVEIRA, F. H., VISACRO, S., **“Evaluation of Lightning-Induced Voltages on Low-Voltage Distribution Networks,”** IX SIPDA, IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 2007.

SOUZA, W. A., **“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. 2015.

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

VISACRO, S., J. V. P. DUARTE, A. R. DE CONTI, F. H. SILVEIRA, C. S. P. FILHO, **“Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas,”** Relatório Técnico Final, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

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

VISACRO, S., **“A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke,”** Geophysical Research Letters, VOL. 31, No L07112, 2004b.

VISACRO, S., A. SOARES, M. A. O. SCHROEDER, L. C. L. CHERCHIGLIA, V. J. SOUSA, **“Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station,”** Journal of Geophysical Research, VOL. 109, No D01105, 2004a.

VISACRO, S., C. R. MESQUITA, R. N. DIAS, F. H. SVEIRA, A. R. DE CONTI, **“A Class of Hazardous Subsequent Lightning Strokes in Terms of Insulation Stress,”** IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, VOL. 54, NO. 5, 2012.

WITZKE, R. L., T. J. BLISS, **“Surge Protection of Cable Connected Equipment,”** AIEE Trans., VOL 69, 1950.

YOKOYAMA, S., ASAKAWA, A., HASHIMOTO, Y., MORO-OKA, Y., **“Lightning Stroke Attachment Characteristics of a Covered Conductor and a Bare Conductor on Power Distribution Lines,”** IEEE High Voltage Engineering, Eleventh International Symposium, , 1999.

YOKOYAMA, S., TOMOYUKI, S., SHOZO, S., HASHIMOTO, Y., **“Lightning Performance of Insulated Wires on Overhead Power Distribution Lines,”** 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP, 2010.