

Dissertação de Mestrado Nº 851

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COMPACTAS FRENTE A SOBRETENSÕES
IMPULSIVAS**

WILLIAM ALVES DE SOUZA

DATA DA DEFESA: 04/02/2015

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COMPACTAS FRENTE A SOBRETENSÕES
IMPULSIVAS**

WILLIAM ALVES DE SOUZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

**Orientador: Prof. Dr. Fernando Henrique
Silveira**

BELO HORIZONTE
FEVEREIRO – 2015

Dedico este trabalho a minha família em especial meu pai Geraldo, minha mãe Eloiza, minha esposa Ana Maria e aos meus filhos Luiz, Otávio e Ana Carolina.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo desafio e oportunidade de aprendizado e convivência no mundo acadêmico.

Agradeço a minha esposa Ana Maria, pelo apoio, compreensão e principalmente carinho. Companheira de uma trajetória feliz, a qual me possibilita ser realizado em família.

Agradeço aos meus filhos Luiz Otavio e Ana Carolina, que mesmo não entendendo minhas atividades acadêmicas me incentivaram a prosseguir na busca pelo título de Mestre.

Aos meus pais, que mesmo distantes, em outra cidade mineira, me incentivaram a buscar novas conquistas, dentre elas o Mestrado.

Ao meu orientador Professor Dr. Fernando Silveira pela dedicação, pelos preciosos ensinamentos, pela compreensão e principalmente pelo incentivo à busca do conhecimento.

Concluindo, agradeço a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) pela oportunidade de trabalho e disponibilização de tempo para dedicação a esta pesquisa, e à UFMG (Universidade Federal de Minas Gerias) pelo programa de pós-graduação permitiu meu avanço acadêmico e de meu conhecimento.

“Assim, fixamos os olhos, não naquilo que se vê, mas no que não se vê, pois o que se vê é transitório, mas o que não se vê é eterno.”

(Paulo – 2 Coríntios 4.18)

Resumo

O atual cenário de distribuição de energia elétrica no Brasil tem motivado as concessionárias brasileiras a buscar novas tecnologias que permitam melhores desempenhos do sistema e custos de manutenção reduzidos. Frente a estas expectativas, o padrão de rede de distribuição compacta se tornou bastante atrativo.

Atualmente no Brasil, a maioria das concessionárias de energia elétrica tem aplicado este novo padrão de rede. Sua utilização tem apresentado redução de custos com manutenção e registro de um menor número de ocorrências em comparação às redes convencionais. Além disso, os custos de implantação dos padrões de rede compacta e convencional se equivalem. No entanto, a literatura técnica não reporta muitos trabalhos dedicados à definição de parâmetros elétricos de desempenho das estruturas das redes de distribuição compactas. A falta desse conhecimento impossibilita a avaliação de desempenho deste tipo de rede frente a surtos atmosféricos, dificultando aprimoramentos nos padrões das estruturas que compõem tais redes.

Neste contexto se insere esta dissertação de mestrado que tem como objetivo estudar o comportamento de estruturas de redes de distribuição compactas frente a impulsos atmosféricos, com base na realização de ensaios com tensões impulsivas em laboratório de alta tensão do LRC/UFMG – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Para isso, este trabalho apresenta o histórico da implantação do sistema de distribuição de rede compacta no mundo e no Brasil, a apuração de resultados reais de desempenho destas redes, a proposição de teste para avaliar a suportabilidade a sobretensões das estruturas que compõem este sistema e resultados preliminares relativos à definição da tensão de 50% (CFO – Critical Flashover overvoltage) de um conjunto de estruturas representativas desse tipo de rede. Além disso, ao final do trabalho é apresentada uma proposição de modificações em um tipo de estrutura para apuração de melhor nível de suportabilidade a sobretensões advindas de descarga atmosféricas.

Abstract

The current electricity distribution scenario in Brazil has motivated the Brazilian power utilities to investigate new technologies that allow better system performance and reduced maintenance costs. Based on such expectations, the application of the compact distribution overhead lines has become quite attractive.

Presently in Brazil, most power utilities have applied this new standard. Its use has been quite satisfactory, indicating a reduction of maintenance costs and outages in comparison with those of conventional distribution overhead line standard. Furthermore, the costs related to the installation of compact and conventional distribution overhead line standards are equivalent.

The technical literature does not report dedicated works to define parameters of the electrical performance of compact distribution overhead lines structures. This lack of knowledge prevents a correct understanding of the lightning performance of this overhead line standard, making difficult the indication of measures dedicated to the improvement of its performance.

This work aims to study the lightning performance of the main structures of compact distribution overhead lines, based on laboratorial tests with impulsive voltages performed at the Lightning Research Center of the Federal University of Minas Gerais.

A complete description of the history of compact overhead distribution systems implemented in Brazil and other countries is presented. Furthermore, the evaluation of the performance of this line standard based on real data and the proposition of impulsive tests to assess the surge withstand of structures of compact distribution overhead lines of Brazilian standard are discussed. Preliminary results related to the definition of CFO (Critical Flashover overvoltage) of a representative set of structures are presented. In addition, at the end of the work a proposal of modification of one structure aiming the improvement of its lightning impulse withstand is provided.

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Relevância da Investigação	2
1.2	Objetivo	6
1.3	Metodologia	6
1.4	Organização do Texto.....	6
2	Redes de Distribuição Compactas	8
2.1	Introdução	8
2.2	História da Rede Aérea Compacta	8
2.3	A Experiência Brasileira com as Redes Aéreas Compactas	10
2.4	Características Gerais das Redes de Distribuição Compactas no Brasil	11
2.5	Características Detalhadas dos Componentes da Rede Compacta.....	12
2.6	Detalhamento Construtivo das Estruturas das Redes Compactas.....	18
2.7	Vantagens e Desvantagens Inerentes às Redes de Distribuição Compactas	20
3	Análise de Ocorrências e Viabilidade Econômica das Redes de Distribuição Compactas ..	24
3.1	Introdução	24
3.2	Aspectos Gerais da Análise de Ocorrências no Sistema Elétrico	24
3.3	Análise de Falhas nas Redes de Distribuição Convencionais e Compactas.....	31
3.4	Identificação das Principais Causas de Interrupções em Redes de Distribuição	36
3.5	Viabilidade Econômica das Redes Compactas	40
4	Identificação do Comportamento de Cabos Cobertos e Redes Compactas Frente a Sobretensões Impulsivas: Pesquisas e Ensaios em Laboratório	44
4.1	Introdução	44
4.2	Trabalhos da Literatura Referentes ao Comportamento Impulsivo de Cabos Cobertos e Rede Compacta	46
4.3	Ensaios Elétricos em Acessórios de Rede Compacta	50
4.3.1	Introdução	50
4.3.2	Ensaios Elétricos Aplicados aos Cabos Cobertos da Rede Compacta	50
4.3.3	Tensão de Trilhamento Elétrico do Condutor	51
4.3.4	Tensão Elétrica Suportável do Condutor sob Água	53
4.3.5	Tensão Elétrica Aplicada na Superfície da Cobertura	54
4.4	Ensaios Elétricos Aplicados aos Acessórios da Rede Compacta.....	55

4.4.1	Tensão de Trilhamento Elétrico do Acessório.....	55
4.4.2	Tensão Elétrica Suportável do Acessório sob Chuva.....	55
4.4.3	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico em Isoladores Poliméricos.....	56
4.4.4	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico a Seco em Espaçadores Poliméricos.....	57
4.5	Comentário Geral em Relação aos Testes.....	58
5	Ensaio para Estimação do Comportamento de Estruturas de Rede Compacta Frente a Tensões Impulsivas.....	59
5.1	Introdução.....	59
5.2	Proposição de Testes para Verificação da Suportabilidade a Sobretensões da Rede de Distribuição Compacta.....	59
5.3	Ensaio Preliminares nas Estruturas de Rede Compacta.....	65
5.4	Descrição do Ensaio para Obtenção da Tensão de 50% - U50%.....	66
5.5	Estruturas de Rede Compacta Testadas.....	68
5.6	Configuração dos Equipamentos para Realização dos Ensaio.....	70
5.7	Gerador de Impulsos e Divisor de Tensão Capacitivo.....	70
5.8	Retificador.....	72
5.9	Controlador e Analisador de Impulsos.....	73
5.10	Resultados Obtidos.....	74
5.11	Resultados da Estrutura CE1.....	76
5.12	Resultados da Estrutura CE2.....	78
5.13	Resultados da Estrutura CE3.....	80
5.14	Análises Conjuntas das Estruturas CE1, CE2 e CE3.....	81
5.15	Comentários Finais.....	86
6	Conclusões e Propostas de Continuidade.....	87
6.1	Conclusões.....	87
6.2	Propostas de Continuidade.....	88
7	Referências Bibliográficas.....	89

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Rede de distribuição convencional.
- Figura 1.2 – Rede de distribuição compacta.
- Figura 1.3 – Rede de distribuição desenvolvida nos EUA, Retirado de uma apresentação da Hendrix Cable, 2014.
- Figura 2.1 - Rede de Distribuição Aérea Compacta Estados Unidos. Retirado do catálogo Hendrix Co (2014).
- Figura 2.2 - Rede de Distribuição Compacta.
- Figura 2.3 - Cabo coberto 15 kV modelo americano. Retirado do catálogo da Hendrix Co (2014).
- Figura 2.4 - Cabo coberto 15 kV modelo desenvolvido no Brasil. Retirado do livro Cabos condutores, Mario Daniel (2002).
- Figura 2.5 - Cabo mensageiro da rede compacta.
- Figura 2.6 - Espaçadores losangulares utilizados nas redes compactas. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).
- Figura 2.7 - Espaçador monofásico da rede compacta. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).
- Figura 2.8 - Espaçador vertical da rede compacta. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).
- Figura 2.9 - Isolador de ancoragem. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).
- Figura 2.10 - Isolador de pino polimérico. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).
- Figura 2.11 - Anel elastomérico de amarração. Retirado Segatto, 2008.
- Figura 2.12 - Braço tipo "L" em condição de tangência. Retirado Segatto, 2008.
- Figura 2.13 - Braço tipo "C" em condição de ângulo. Retirado Segatto, 2008
- Figura 2.14 - Principais estruturas da rede compacta. Retirado da Norma de Distribuição CEMIG ND 2.9, 2012.
- Figura 2.15 - Trilhamento elétrico no condutor coberto.
- Figura 2.16 - Trilhamento elétrico nos espaçadores losangulares.
- Figura 3.1 - Perfil de desempenho da continuidade de fornecimento de energia elétrica nos últimos anos. Retirado apresentação ABRADDEE (2012).
- Figura 3.2 - Comparação entre concessionárias da frequência de ocorrências por consumidor em numero de interrupções por ano (FEC). Retirado apresentação ABRADDEE (2012).
- Figura 3.3 - Comparação entre concessionárias da duração de ocorrências por consumidor em numero de interrupções por ano (DEC). Retirado apresentação ABRADDEE (2012).
-

Figura 3.4 - Participação de cada tipo de sistema no DEC. Retirado apresentação CEMIG (2012)

Figura 3.5 - Valores pagos de multas pela concessionária por anos ao órgão regulador ANEEL, devido ao não cumprimento de metas de desempenho. Retirado apresentação ABRADDEE (2012).

Figura 3.6 - Comparação de desempenho entre redes convencionais e compactas.

Figura 3.7 - Comparação de desempenho entre redes convencionais e compactas, percentuais de uso de rede compacta.

Figura 3.8 - Comparação de desempenho entre redes convencionais e compactas, percentuais de uso de rede compacta.

Figura 3.9 – Rede compacta da Hendrix Cable em áreas nevadas e florestais. Retirado de apresentação Hendrix Cable (2014)

Figura 3.10 – Registro de ocorrências climáticas em redes compactas nos EUA. Retirado de apresentação Hendrix Cable (2014)

Figura 3.11 – Resultados das análises de falhas das redes compactas comparadas as redes convencionais, retirado de apresentação da Hendrix Cable. Adaptado de apresentação Hendrix Cable (2014)

Figura 3.12 – Composição dos custos de implantação e manutenção das instalações

Figura 4.1 - Diferença de comportamento de sistemas de cabos nus e cobertos, quando submetidos a arco elétrico advindo de sobretensões atmosféricas. Figura adaptada de He (2008).

Figura 4.2 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, primeiro trabalho conhecido da literatura, figura adaptada de Powell (1965).

Figura 4.3 - Configuração de montagem para ensaio de trilhamento elétrico. Retirada (ABNT NBR 10296 (1988).

Figura 4.4 - Configuração do circuito elétrico para aplicação de tensão – Ensaio de trilhamento elétrico, Adaptado de ABNT NBR 10296 (1988).

Figura 4.5 - Posição de aplicação do impulso atmosférico no isolador de pino polimérico.

Figura 4.6 - Montagem para aplicação de tensão de impulso atmosférico em espaçadores poliméricos – Ensaio suportabilidade a impulso. Retirado e adaptado de Especificação Técnica CEMIG- 669 (2002).

Figura 5.1–Estruturas da rede compacta monofásicas. Figura adaptada da ND 2.9 CEMIG (2012).

Figura 5.2 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de pino polimérico. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.3 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de ancoragem. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.4 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com espaçador losangular. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.5 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estruturas com isolador de ancoragem, com espaçador losangular e com isolador de pino polimérico. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.6 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de pino polimérico, sob chuva. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.7 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de ancoragem, sob chuva. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.8- Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com espaçador losangular. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.9 -Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estruturas com isolador de ancoragem, com espaçador losangular e com isolador de pino polimérico, sob chuva. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Figura 5.10 - Estruturas típicas de rede compacta que representam todos os tipos de arranjos

Figura 5.11- Circuito elétrico do gerador de pulsos. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.12- Figura representativa do gerador de pulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.13- Figura representativa do divisor de tensão capacitivo utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.14- Figura representativa retificador utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.15- Figura representativa controlador de pulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.16- Figura representativa analisador de impulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.17- Figura representativa do sistema de testes de pulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Figura 5.18- Identificação dos pontos em testes nas estruturas CE1, CE2 e CE. Adaptado da ND 2.9 (2012).

Figura 5.19- Representação do uso do cabo nu para testes, estrutura CE1.

Figura 5.20 - Estrutura CE1

Figura 5.21 - Estrutura CE2

Figura 5.22 – Detalhe das disrupções na estrutura CE2

Figura 5.23 - Estrutura CE3

Figura 5.24 – Detalhe da calha do suporte braço C da estrutura CE2

Figura 5.25 - Estrutura CM2

Figura 5.26 – Alterações na estrutura CE2 para melhoria de suportabilidade a sobretensões

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Nomenclatura de identificação das estruturas das redes compactas.

Tabela 3.1 - Causas de interrupção de nas redes de distribuição, Retirado de relatório CEMIG (2013).

Tabela 3.2 - Causas de interrupção de nas redes de distribuição. Retirado de SEGATTO (2008)

Tabela 4.1- Valores de aplicação de tensão alternada e continua, retirada da ABNT NBR 11873 (2011).

Tabela 5.1 – Quantitativo de estruturas CE1, CE2 e CE3.

Tabela 5.2 - Identificação dos pontos em testes nas estruturas CE1, CE2 e CE3

Tabela 5.3 – Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90) - Estrutura CE1.

Tabela 5.4 - Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90) - Estrutura CE2

Tabela 5.5 - Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90) - Estrutura CE3.

Tabela 5.6 - Valores médios em kV, comparativo entre estruturas CE1, CE2 e CE3

Tabela 5.7 - Valores mínimos em kV, comparativo entre estruturas CE1, CE2 e CE3

Tabela 5.8 - Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90), estrutura CM2

Tabela 5.9 - Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90), estrutura C2-m

Tabela 5.10 - Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90), estruturas CE2 e C2-m, comparação de ganhos.

1 Introdução

1.1 Relevância da Investigação

Nos últimos anos, em decorrência do desenvolvimento econômico do Brasil, houve a necessidade de expansão do fornecimento de energia elétrica no país, provocando um aumento significativo da instalação de redes de distribuição de energia elétrica.

Atualmente a aplicação do padrão convencional de rede aérea de distribuição urbana está em processo de estagnação no Brasil, principalmente por este tipo de rede apresentar um menor nível de confiabilidade do fornecimento de energia. Além disso, os custos de manutenção associados a este padrão de rede são bastante elevados, encarecendo o seu processo de expansão. As redes convencionais são constituídas de condutores nus instalados sob isoladores de porcelana e cruzetas de madeira. A Figura 1.1 ilustra uma rede de distribuição convencional tipicamente de 13,8 kV utilizada no Brasil.



Figura 1.1 – Rede de distribuição convencional urbana de 13,8 kV.

Neste contexto, as concessionárias de energia elétrica vêm buscando implementar padrões de rede que superem as dificuldades e limitações apresentados pelo padrão convencional. O padrão de rede atualmente em foco é denominado rede de distribuição compacta, que consiste no uso de cabos cobertos instalados em espaçadores poliméricos. Dentre as vantagens da utilização desse padrão estão a compactação do circuito, a redução das áreas de poda de árvores, a minimização das interrupções no fornecimento de energia, o bom

desempenho frente às solicitações temporárias e os custos de implantação mais atrativos em relação àqueles de outras redes de alta confiabilidade, como as redes subterrâneas. A Figura 1.2 ilustra aspectos de uma rede de distribuição compacta instalada em Minas Gerais.

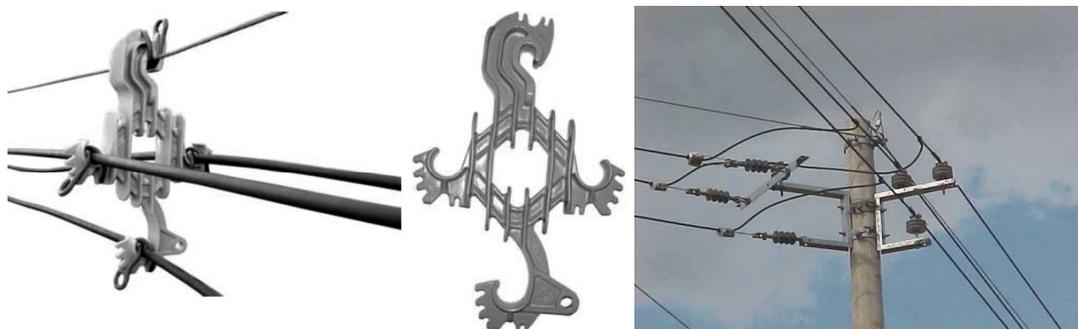


Figura 1.2 – Rede de distribuição compacta de 13,8 kV.

O desenvolvimento das redes de distribuição compactas se deu inicialmente em países asiáticos, em meados dos anos 30, com a prospecção do uso de cabos cobertos instalados em estruturas de rede convencionais (Shea, 1931). Posteriormente, a empresa Hendrix Cable aprimorou esse tipo de tecnologia nos Estados Unidos, desenvolvendo o sistema chamado “Spacer cable” que consistia em uma configuração compacta entre condutores através do uso de espaçadores losangulares, conforme indicado na Figura 1.3.



Figura 1.3 – Rede de distribuição desenvolvida nos EUA, Retirado de uma apresentação da Hendrix Cable, 2014.

A aplicação das redes de distribuição compactas no Brasil se intensificou nos últimos anos. De acordo com (ABRADEE, 2012), a estimativa de aplicação desta tecnologia nas concessionárias é de 10% em áreas urbanas. Atualmente na CEMIG esta topologia de rede se

estende por aproximadamente 10430 km, correspondendo a 28% do total de 36.300 km de redes de distribuição urbanas da concessionária.

Os acessórios que compõem as redes compactas são os espaçadores e os isoladores poliméricos, os cabos cobertos e os acessórios de amarração. A crescente utilização de materiais poliméricos isolantes em equipamentos e acessórios para o setor elétrico se justifica em virtude de um conjunto de propriedades que os polímeros apresentam, particularmente mecânicas, elétricas e químicas. Resistência à tração e ao impacto, rigidez dielétrica, permeação de água e estabilidade química estão entre as diversas propriedades responsáveis pela adequação dos materiais poliméricos à sua utilização no setor elétrico. Adicionalmente, os polímeros apresentam, em geral, facilidade de fabricação e de processamento, podendo ser produzidos com propriedades ajustadas a aplicações específicas.

Qualquer processo de substituição de tecnologia, particularmente aquele com caráter inovador, implica vantagens, que acabam por catalisar tal substituição. Mas, certamente apresentam também algumas desvantagens ou limitações que, se não forem integralmente compreendidas, podem comprometer todo o processo de implantação da nova tecnologia. No caso específico das redes de distribuição compactas, a realidade dessa acelerada migração do setor elétrico na direção dos materiais poliméricos vem acompanhada de duas questões absolutamente fundamentais, que são:

- A real adequação de vários materiais frente a solicitações elétricas, tais como o comportamento dos acessórios que constituem as redes compactas frente a sobretensões advindas de descargas atmosféricas;
- O desempenho elétrico do conjunto de estruturas que compõem a rede.

Pelo longo tempo de aplicação do padrão de rede convencional no território brasileiro, já existe um conhecimento consolidado na literatura referente aos parâmetros elétricos de desempenho das estruturas das redes de distribuição convencionais (ABNT NBR 15688, 2012).

No entanto, esse tipo de conhecimento não se aplica às redes de distribuição compactas. A falta desse conhecimento dificulta a avaliação de expectativas do desempenho

das redes compactas frente a surtos atmosféricos e, principalmente, impossibilita o desenvolvimento de aprimoramentos nos padrões das estruturas que compõem esse tipo de rede.

A obtenção de dados e informações a respeito das características elétricas das redes compactas requer o desenvolvimento de um conjunto de trabalhos que visem testar através de ensaios elétricos em laboratório os principais componentes desse tipo de rede frente a sobretensões impulsivas para determinação de parâmetros elétricos de interesse, como o nível básico de isolamento (NBI), para diversas condições de aplicação.

Atualmente, vem sendo desenvolvido um amplo projeto de pesquisa no LRC/UFMG para estudo do comportamento do padrão de rede de distribuição compacta frente às sobretensões associadas às descargas atmosféricas, buscando a caracterização da suportabilidade elétrica dos componentes da rede e da rede como um todo frente às sobretensões impulsivas. Dentre os desenvolvimentos desse projeto destacam-se a realização de ensaios impulsivos em laboratório de alta tensão do LRC/UFMG e o desenvolvimento de ao menos 3 dissertações de mestrado em pesquisas correlatas ao tema.

Especificamente, esta dissertação de mestrado trata inicialmente da organização do tema, destacando as características relevantes do padrão de rede de distribuição compacta, abordando os principais desenvolvimentos realizados no mundo e a experiência de implantação brasileira. Com base em dados reais de desempenho das redes de concessionárias, desenvolve-se uma análise de sensibilidade acerca do impacto da inserção das redes de distribuição compacta no desempenho do sistema elétrico. Além disso, neste trabalho, busca-se apresentar a proposição de um conjunto de ensaios para avaliação da suportabilidade elétrica de estruturas consideradas mais representativas do padrão brasileiro de rede compacta. Os ensaios inicialmente realizados considerando o uso de cabo nas estruturas indicam níveis de suportabilidade dielétrica que proporcionaram o desenvolvimento de uma proposta de modificação preliminar em algumas estruturas ensaiadas visando o aumento da suportabilidade elétrica do conjunto.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na organização do tema relativo às redes de distribuição compactas e a proposição e realização de ensaios preliminares em laboratório de alta tensão para estimar e identificar parâmetros elétricos de interesse para o desempenho das estruturas deste novo padrão de rede frente a sobretensões impulsivas.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada nesta pesquisa consiste no resgate do histórico do desenvolvimento das redes de distribuição compacta no Brasil e no mundo, a apuração de desempenho dessas redes com base em dados reais de concessionárias de energia elétrica e a realização de ensaios em laboratório de alta tensão para identificação de algumas características elétricas relevantes ao desempenho das redes compactas.

1.4 Organização do Texto

O texto desta dissertação está organizado em 6 capítulos, incluindo a presente Introdução.

O Capítulo 2 apresenta as principais experiências relativas ao uso do padrão de rede compacta, descrevendo detalhadamente suas principais características, com destaque para as principais estruturas e as vantagens e desvantagens verificadas na utilização desse padrão.

O Capítulo 3 trata da apuração de desempenho das redes compactas comparadas às redes convencionais e aponta a viabilidade econômica de sua implantação.

O Capítulo 4 trata de dois tópicos de suma importância para a avaliação do desempenho frente a sobretensões impulsivas das redes compactas. O primeiro deles se refere à contextualização das pesquisas realizadas no tema e o segundo consiste na apresentação dos ensaios elétricos comumente aplicados aos acessórios da rede compacta.

O Capítulo 5 apresenta a proposição de ensaios nas estruturas típicas das redes compactas e os resultados obtidos com a realização de testes em laboratório de alta tensão. A análise dos resultados permitiu a caracterização preliminar da suportabilidade do sistema frente a sobretensões impulsivas. Além disso, permitiu a elaboração de modificações em estrutura típica de rede para a melhoria do seu desempenho.

As conclusões e propostas de continuidade desse trabalho compõem o Capítulo 6. As referências bibliográficas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho encontram-se ao final do trabalho.

2 Redes de Distribuição Compactas

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar o histórico do desenvolvimento das redes compactas no Brasil e ao redor do mundo. São ainda apresentados os detalhes construtivos da atual rede compacta aplicada no Brasil.

2.2 História da Rede Aérea Compacta

O início do desenvolvimento das chamadas redes aéreas compactas se deu a partir da década de 1930 com a prospecção dos cabos cobertos para telefonia (Shea, 1931) e posteriormente o uso de cabos cobertos em estruturas convencionais em diversos países asiáticos em meados de 1960 (Wareing, 2005).

Vale destacar a experiência do Japão com esse tipo de rede, país no qual existem restrições legais ao uso de linhas aéreas nuas nas cidades. Este fator, associado à instabilidade do solo japonês, o qual limita a construção de redes subterrâneas, impulsionou o emprego intensivo de cabos cobertos para distribuição de energia. A instalação de cabos cobertos naquele país se baseia numa isolação para a terra, através do uso de isoladores tipo pilar, remoção da cobertura do cabo nos pontos de amarração, de modo a evitar o centelhamento, e uso de dispositivos de descarga com resistores não lineares, para impedir a fusão do condutor iniciadas por descargas atmosféricas (Lee, 1982).

A execução deste sistema requer acessórios especiais e relativamente sofisticados, como os descarregadores incorporados aos isoladores, sendo normalmente realizada em redes

com tensão primária (6,6 kV), e conseqüentemente, com um nível básico de isolamento (NBI) reduzido.

Uma inovadora modalidade de aplicação foi desenvolvida nos Estado Unidos a partir de 1950, onde os condutores são instalados sobre espaçadores, topologia conhecida como “spacer cable”. O principio básico desta rede norte americana consiste no controle de campo elétrico pelo uso de acessórios não metálicos e, em geral, feitos de um material com a mesma base polimérica que o cabo, ou seja, com mesma constante dielétrica.

As redes de distribuição compactas nos EUA foram desenvolvidas inicialmente pelo engenheiro Bill Hendrix da empresa Hendrix W&C, em 1951, para o nível de tensão de 5 kV. O sistema desenvolvido utilizava cabos cobertos sustentados por espaçadores. A criação deste tipo de sistema teve como principal premissa o controle do campo elétrico, já que o agrupamento dos condutores em um espaçador polimérico exigiria maiores cuidados com as condições de isolamento elétrico entre os condutores fases e o mensageiro. Desta forma, seria possível evitar rupturas no isolamento do conjunto. Além disso, o novo sistema teria compactação próxima à encontrada nas redes isoladas, resultando em redução da impedância característica do sistema, além de possibilitar a utilização de vários circuitos na mesma posteação, aumentando o nível de desempenho, qualidade e segurança do sistema de distribuição aéreo. Atualmente já são padronizadas as classes de tensão de 15 kV, 25 kV, 35 kV e 46 kV e 69 kV, esta última aplicada nos Estados Unidos (Hendrix, 2014).

A Figura 2.1 ilustra a rede compacta instalada nos Estados Unidos, início de todo desenvolvimento das redes aéreas compactas no mundo.



Figura 2.1 - Rede de Distribuição Aérea Compacta Estados Unidos. Retirado do catálogo Hendrix Co (2014).

Nas redes compactas, a tração é aplicada a um condutor mensageiro no qual estão pendurados os espaçadores, a cada 7 a 10 m, os cabos cobertos são fixados aos espaçadores e tracionados apenas o suficiente para esticá-los. Como o sistema está suspenso, teoricamente não permite o toque dos cabos no solo em caso de ruptura dos condutores, uma vez que a distância entre os espaçadores é inferior a altura do poste.

2.3 A Experiência Brasileira com as Redes Aéreas Compactas

O Brasil, devido à grande influência dos fabricantes de equipamentos, a demanda por expansão do sistema elétrico e a necessidade de redução nos custos de implantação, adotou, como em vários outros países, ao redor do mundo, as redes de distribuição aéreas convencionais como padrão.

O desempenho não satisfatório das redes convencionais devido à elevada taxa de falha no fornecimento de energia, ao baixo nível de qualidade, ao elevado impacto ambiental e ao crescente custo operacional deste sistema motivou o desenvolvimento das redes aéreas compactas no Brasil, no passado conhecidas como redes protegidas, tecnologia mais moderna.

Em 1988, as concessionárias CEMIG, COPEL e Eletropaulo desenvolveram um trabalho conjunto de pesquisa para o uso de cabos cobertos em redes aéreas de 13,8 kV com

topologias convencionais (Rocha, 2002) . Inicialmente, a pesquisa considerou a utilização de cabos de alumínio cobertos com polietileno em substituição aos cabos de alumínio nus, mantendo-se a topologia convencional com uso de cruzetas e isoladores de porcelana. O objetivo principal do trabalho era testar em campo a eficiência dos cabos cobertos aos contatos eventuais com galhos de árvores, objetos na rede e ainda ambientes com poluição. A experiência mostrou que os cabos cobertos atendiam aos requisitos de aplicação em áreas urbanas.

Outro evento impulsionador para o desenvolvimento das redes compactas no Brasil ocorreu ao longo da década de 90, com o crescimento das pressões da sociedade e poder público contra a poda agressiva de árvores e a necessidade de maior confiabilidade, qualidade e segurança dos sistemas elétricos de distribuição. Neste cenário, as concessionárias brasileiras iniciaram uma pesquisa mais efetiva referente à implantação das redes aéreas compactas.

Toda experiência anterior de aplicação das redes compactas de classe de 15 kV era em países de clima frio e seco, o que não permitia afirmar que o desempenho dos materiais poliméricos seria satisfatório nas condições climáticas brasileiras. Sendo assim, seria necessário acompanhar o comportamento dos mesmos num clima tropical como o do Brasil. Vários testes foram realizados em laboratório e em campo com estes propósitos, quando se percebeu que a rede aérea compacta tinha limitações, sendo seu uso dependente de critérios bem definidos para o sucesso da nova tecnologia.

2.4 Características Gerais das Redes de Distribuição Compactas no Brasil

A rede de distribuição aérea compacta, também conhecida no Brasil como rede “Rede Protegida de Distribuição”, é formada por um conjunto de equipamentos composto por cabo de aço, condutores cobertos e espaçadores losangulares, confeccionados em materiais poliméricos e metálicos suportados por poste de madeira, concreto e fibra de vidro. Construtivamente, a sustentação da rede compacta é feita através do cabo de aço, sendo este denominado de cabo mensageiro. O cabo mensageiro é fixado aos postes por meio de suportes

metálicos e fixados por alças. Os espaçadores losangulares poliméricos, por sua vez, exercem a função de sustentação, compactação e separação elétrica dos condutores cobertos, que ficam dispostos em formato losangular. A Figura 2.2 apresenta de forma geral os componentes desse tipo de rede.



Figura 2.2 - Rede de Distribuição Compacta.

Geralmente, os locais apropriados para instalações da rede de distribuição aérea compacta são aqueles com elevado índice de interferências externas, que propiciem toques eventuais de objetos, e nas regiões não densamente arborizadas. Apesar dos toques eventuais da arborização serem permitidos, o convívio permanente traz danos ao condutor, através do fenômeno de trilhamento elétrico (Kuffel, 2000).

2.5 Características Detalhadas dos Componentes da Rede Compacta.

A atual topologia da rede compacta é formada basicamente pelos condutores cobertos, espaçadores poliméricos, isoladores poliméricos, cabo de aço e ferragens diversas. A seguir, são apresentadas descrições detalhadas de cada um dos elementos dessas redes.

Cabo Coberto: dotado de cobertura em material polimérico, geralmente XLPE (Polietileno Extrudado e Reticulado). Tem a finalidade de eliminar a corrente de fuga em caso

de contato em partes aterradas. Este cabo possibilita a diminuição do espaçamento entre fases. Vale ressaltar que, apesar de possuir cobertura de material dielétrico, os cabos cobertos não são isolados, pois não possuem blindagens aterradas em sua cobertura, sendo assim apresentam campo elétrico superficial não nulo. Os condutores utilizados nos Estados Unidos possuem camadas adicionais em comparação aos cabos produzidos no Brasil. A Figura 2.3 apresenta o cabo coberto da classe 15 kV modelo americano com camadas distintas da cobertura.

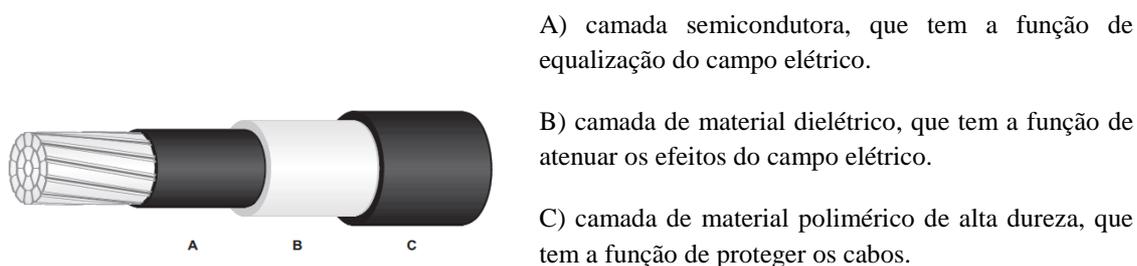


Figura 2.3 - Cabo coberto 15 kV modelo americano. Retirado do catálogo da Hendrix Co (2014).

O desenvolvimento da tecnologia de rede compacta no Brasil se fez viável ao se utilizar um condutor mais simples com única camada e material que atendessem aos requisitos elétricos e mecânicos, proteção contra intempéries e trilhamento elétrico. A Figura 2.4 ilustra o condutor coberto de desenvolvimento brasileiro. Além de ter a capacidade de permitir contatos eventuais com arborização, este condutor pode ser carregado com maior potência, pois sua capacidade térmica é de 90° C, diferente dos condutores tradicionais que trabalham com 70° C de carregamento térmico.



Figura 2.4 - Cabo coberto 15 kV modelo desenvolvido no Brasil. Retirado do livro Cabos condutores, Mario Daniel (2002).

Cabo Mensageiro: Elemento responsável pela sustentação dos espaçadores, separadores e cabos cobertos. Utiliza-se como mensageiro o cabo de aço zincado. Também

pode ser utilizado como condutor neutro da rede compacta. Em algumas aplicações o cabo de aço mensageiro pode ter em seu interior fibras óticas para comunicação de dados. A Figura 2.5 detalha a aplicação do cabo de aço mensageiro. As bitolas mais usadas deste cabo são 9,5 mm² e 6,4 mm².

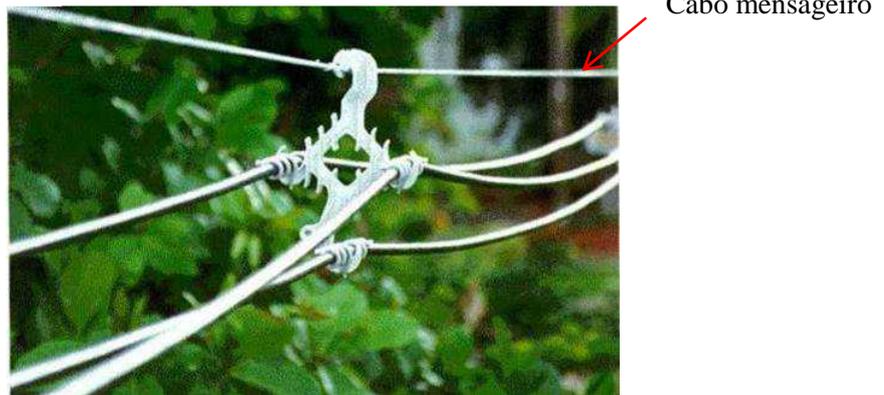


Figura 2.5 - Cabo mensageiro da rede compacta.

Espaçadores Losangulares: Acessório que condiciona a compactação dos condutores e tem a função de sustentação dos cabos cobertos ao longo do vão e separação elétrica dos condutores. Tem formato losangular e é constituído de material polimérico, na maioria dos casos HDPE (polietileno de alta densidade). O espaçador losangular permite o isolamento do sistema e diminui a possibilidade do condutor rompido atingir o solo. Existem dois tipos de espaçadores : espaçadores com garras (os condutores são presos ao espaçador através das garras, pertencentes ao espaçador) e espaçadores com anéis (os condutores são presos ao espaçador por anéis de silicone), ambos usados nas redes compactas no Brasil, como ilustra na Figura 2.6:

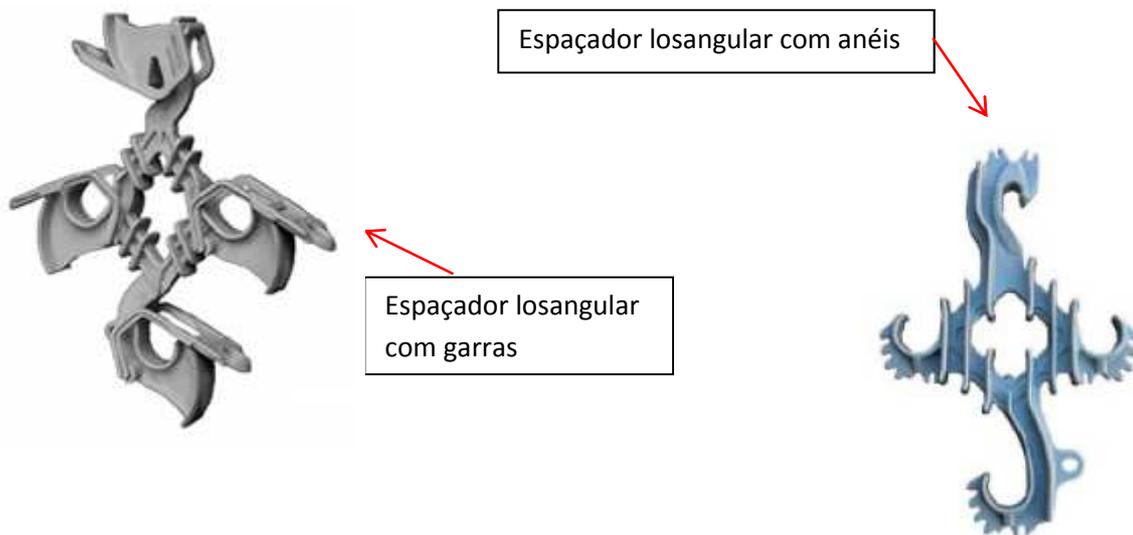


Figura 2.6 - Espaçadores losangulares utilizados nas redes compactas. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).

Espaçador Monofásico: Os espaçadores monofásicos são constituídos de material polimérico semelhante aos espaçadores losangulares, tem a função de sustentação e separação dos condutores cobertos e relação ao mensageiro nas redes compactas monofásicas. A Figura 2.7 ilustra o espaçador monofásico instalado em uma rede.



Figura 2.7 - Espaçador monofásico da rede compacta. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).

Separador Vertical: Os separadores verticais são acessórios de material polimérico de mesma composição dos espaçadores. Tem o formato retilíneo e sua função é de sustentação e separação dos cabos cobertos verticalmente na rede em situações de cruzamento, como mostrado na Figura 2.8.

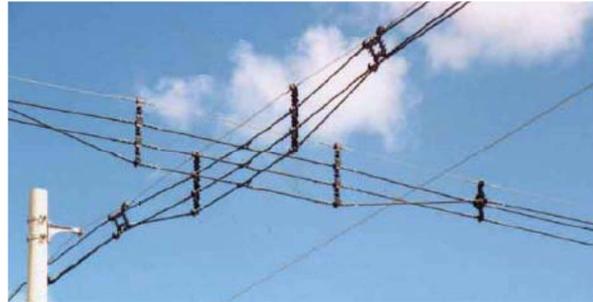


Figura 2.8 - Espaçador vertical da rede compacta. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).

Isolador de Ancoragem: Os isoladores de ancoragem, também conhecidos como isoladores bastão, são utilizados em pontos tais como final de rede, encabeçamento, derivação e/ou ângulos. Este equipamento é constituído de pelo menos dois materiais isolantes, sendo um na parte interna e outro na parte externa. Além disso, o isolador de ancoragem é equipado com engates metálicos para sustentação. A Figura 2.9 apresenta este acessório.



Figura 2.9 - Isolador de ancoragem. Retirado do catalogo da PLP do Brasil, (2014).

Isolador de Pino Polimérico: Componente responsável pela isolação dos condutores fase em relação as partes aterradas. Este equipamento é constituído de material polimérico, em sua maioria polietileno de alta densidade HDPE. Seu corpo é dotado de um orifício rosqueado ou composto de um pino em sua base. A composição do isolador é de um único corpo isolante polimérico, como ilustrado na Figura 2.10:



Figura 2.10 - Isolador de pino polimérico. Retirado do catálogo da PLP do Brasil, (2014).

Anel Elastomérico de Amarração: Acessório de material polimérico (silicone), que tem a finalidade de fixar os condutores fase nos isolador de pino, espaçadores losangulares e espaçadores verticais de fase. A Figura 2.11 mostra os anéis elastoméricos instalado em um espaçador losangular.

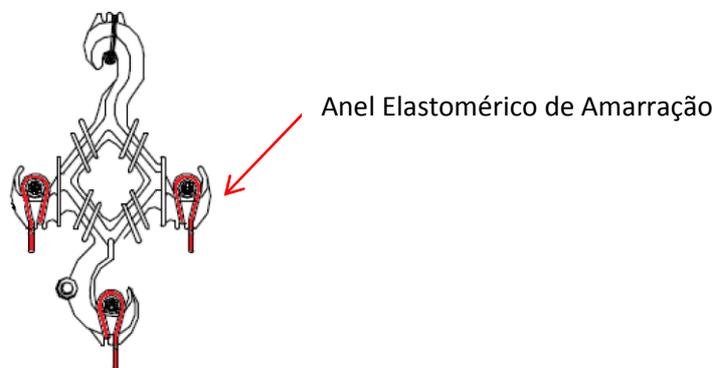


Figura 2.11 - Anel elastomérico de amarração. Retirado de Segatto, 2008.

Braço Tipo L: Trata-se da ferragem mais utilizada na rede compacta. Seu formato em “L” permite a fixação em postes de concreto, aço, madeira ou poliméricos. Tem a finalidade de sustentar o cabo mensageiro da rede compacta e por consequência o conjunto de cabos fase e espaçadores. A instalação deste acessório pode ser em condições de tangência ou em ângulos de deflexão pequenos, menor que 10° . O braço tipo L não possibilita a instalação de equipamentos. O braço tipo L em posteação de madeira é apresentado na Figura 2.12.

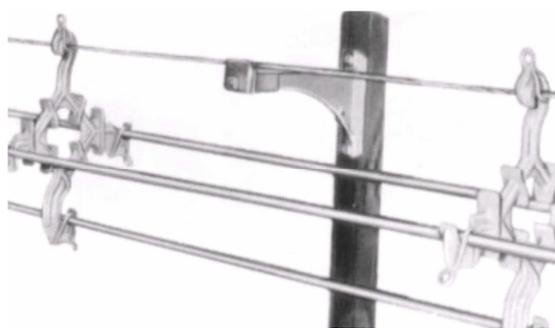


Figura 2.12 - Braço tipo "L" em condição de tangência. Retirado de Segatto, 2008.

Braço Tipo C: Trata-se de uma ferragem, em formato “C”, similar ao braço tipo L, podendo ser fixado ao poste. Tem a função de sustentar as fases em condições de ângulos maiores, acima de 10° e em final de rede. Este acessório, diferentemente do anterior, pode ser usado para instalação de equipamentos à rede compacta, como chaves seccionadoras e chaves fusíveis. A Figura 2.13 apresenta a instalação do braço tipo C em uma condição de ângulo maior que 10° .

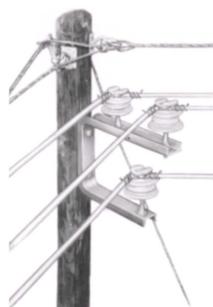


Figura 2.13 - Braço tipo "C" em condição de ângulo. Retirado de Segatto, 2008.

2.6 Detalhamento Construtivo das Estruturas das Redes Compactas

As estruturas básicas das redes compactas são recomendadas para aplicações distintas tais como rede passante com ângulo menor que 6° , rede passante com ângulos maiores que 6° , rede passante com ancoragem, final de rede, conforme norma brasileira de instalações básicas de redes compactas ABNT NBR 15992 (2012). Esta norma define, dentre outros requisitos, as nomenclaturas indicadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.3 – Nomenclatura de identificação das estruturas das redes compactas, ABNT NBR 15992

(2012)

Nomeclatura	Descrição
C	Rede Compacta
E	Sobre Espaçadores
Índice	Aplicação
1	Rede passante com ângulo menor que 6°
2	Rede passante com ângulos maiores que 6°
3	Final de rede
4	Rede passante com ancoragem.

Desta forma a nomenclatura CE1 significa “rede compacta sob espaçadores, rede passante com ângulo menor que 6°”.

A Figura 2.14 apresenta as principais estruturas de redes compactas utilizadas na CEMIG , detalhes de montagem são apresentados a seguir:

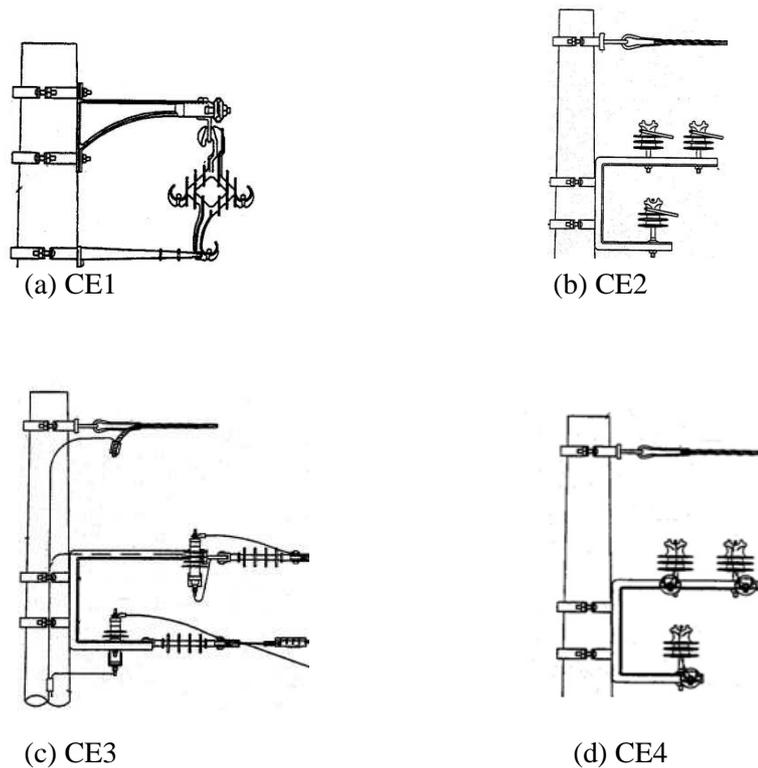


Figura 2.14 - Principais estruturas da rede compacta. Retirado da Norma de Distribuição CEMIG ND 2.9, (2012).

(a) CE-1: Vãos em tangência ou c/ângulo de deflexão externo e interno máximo de 6° ou situação de deflexão. Um braço tipo L sustenta diretamente o mensageiro, que por sua vez sustenta o espaçador.

(b) CE-2: Vãos com ângulos de deflexão internos e externos compreendidos entre 0° e 60°. Neste caso são instalados isoladores do tipo pino em um braço suporte tipo C, com os cabos sendo amarrados lateralmente aos mesmos.

(c) CE-3: Vão em fim de rede. Os cabos são conectados em isoladores de ancoragem poliméricos, que são presos no poste por braços tipo C. O mensageiro é afixado 0,5 m acima do conjunto através de um olhal. Por ser um fim de rede, já é prevista a instalação de para-raios em cada uma das fases.

(d) CE-4: Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fases e arrancamento.

Outras combinações são previstas, conjugando estruturas e instalando equipamentos.

2.7 Vantagens e Desvantagens Inerentes às Redes de Distribuição Compactas

A aplicação das redes de distribuição compactas apresenta uma série de vantagens, como, (CEMIG – ED 3.4, 1988):

- Melhor desempenho do sistema elétrico, refletindo em maior confiabilidade do fornecimento de energia.
- Redução considerável no impacto ambiental, ao permitir o melhor convívio da rede com a arborização.

- Menor ocupação do solo, reduzindo a faixa de servidão da rede de distribuição.
- Melhor nível de regulação, uma vez que os condutores estão mais próximos e a impedância característica do sistema é menor, comparada as redes convencionais.
- Instalação facilitada devido ao reduzido número de componentes.
- Menor custo de operação e manutenção; a rede compacta não requer manutenções de curto prazo, sua operação é simples como na rede convencional.
- Menor número de reclamações por parte dos clientes devido ao baixo número de ocorrências por falhas acidentais.
- Melhor nível de segurança proporcionado aos usuários e população, já que o cabo coberto sob espaçadores, em caso de rompimento, não toca ao solo, devido a rede ser suspensa pelo espaçador.

Contudo, vale ressaltar que as redes compactas têm características próprias que levam a problemas. Estes problemas podem comprometer seu desempenho, causando atuação do sistema de proteção e reduzindo os requisitos mínimos de suportabilidade e continuidade de operação.

A rede compacta, sob as condições normais de operação, condiciona seus componentes (cabos e acessórios) a múltiplos estresses. As condições de desgastes nas redes compactas são mais críticas devido ao intenso uso dos materiais poliméricos, que tem comportamento mais frágil ao ambiente em comparação aos materiais convencionais. Por isso é importante citar os principais estresses deste sistema, como:

- Estresse Mecânico:

Os estresses de natureza mecânica são advindos de vibração, tração e torção dos cabos da rede, provocados por ventos e forças mecânicas nas estruturas.

- Estresse Elétrico:

O principal estresse da rede compacta é o elétrico, que é causado pela concentração do campo elétrico em alguns pontos da rede. Neste caso a deterioração do condutor pode provocar sua ruptura.

- Estresse Térmico:

As variações de temperatura provocam os estresses térmicos. Além disso, em regime normal a temperatura de operação da rede também varia dependendo da carga.

- Estresse Ambiental:

As condições ambientais relacionadas com o clima de cada região, tais como: umidade e intensidade de radiação ultravioleta e ainda o nível de poluição do ar com partículas condutivas e salinidade podem provocar a contaminação superficial e promover o depósitos de material na superfície dos cabos cobertos e acessórios. Esta situação provoca a degradação dos materiais poliméricos, CEMIG – ED 3.4 (1988).

A ação independente ou combinada dos estresses é a mais responsável pela degradação e o envelhecimento dos materiais utilizados em redes compactas. Estas condições podem levar a perda de requisitos mecânicos e elétricos mínimos para a continuidade do funcionamento e operação do sistema. As consequências das perdas destes requisitos consistem no aparecimento de fraturas, redução de elasticidade da cobertura de cabos e seus acessórios.

As falhas provocadas pelo estresse elétrico são evidenciadas principalmente pelos efeitos de trilhamento elétrico que produz a carbonização e conseqüentemente a erosão dos materiais poliméricos. O trilhamento elétrico é um processo de envelhecimento superficial do dielétrico, através da ação de campo elétrico, que produz caminhos de corrente elétrica de fuga da ordem de dezenas de microampères, de acordo com Segatto (2008). A Figura 2.15 ilustra o trilhamento sobre o condutor coberto nas proximidades das amarrações.



Figura 2.15 - Trilhamento elétrico no condutor coberto.

As condições que envolvem múltiplos estresses podem reduzir a resistência superficial dos materiais poliméricos, tornando mais evidente a ocorrência de trilhamento elétrico e a consequente degradação muito rápida dos componentes da rede. Além disso, a ocorrência localizada e concentrada do trilhamento elétrico resulta na erosão da camada polimérica do material. Esta situação tem a maior tendência de ocorrer em locais de apoio dos cabos fase nos isoladores e espaçadores, próximos as amarrações e partes aterradas. Um exemplo de trilhamento elétrico pode ser visto na superfície dos espaçadores losangulares e principalmente em regiões onde o acessório tem o formato mais irregular em sua superfície. A Figura 2.16 destaca em vermelho as trilhas criadas pelo processo de trilhamento elétrico.

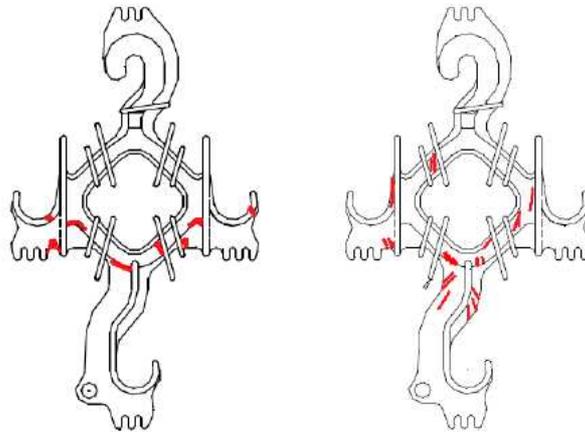


Figura 2.16 - Trilhamento elétrico nos espaçadores losangulares.

Esta condição pode levar a rede compacta à falhas de funcionamento, perdas de materiais e consequente redução do nível de desempenho do sistema.

3 **Análise de Ocorrências e Viabilidade Econômica das Redes de Distribuição Compactas**

3.1 Introdução

O modelo regulatório do sistema elétrico de distribuição de energia elétrica no Brasil é baseado no incentivo à redução de custos dos ativos e à melhor performance de desempenho das redes. Para atendimento a estas demandas, as concessionárias têm aplicado redes com menor custo e alto desempenho. Este capítulo tem como objetivo apurar o desempenho das redes compactas em relação àquele das redes convencionais, bem como apresentar dados relativos à viabilidade econômica de sua utilização.

3.2 Aspectos Gerais da Análise de Ocorrências no Sistema Elétrico

Os sistemas elétricos de distribuição devem ser concebidos, implantados e mantidos visando garantir uma operação segura, eficiente, confiável e de qualidade a seu mercado. Tipicamente, as obras demandadas para o alcance de tais objetivos estão relacionadas a expansão da rede, melhoria da qualidade do sistema e renovação dos ativos de distribuição.

A alocação de investimentos relacionada à expansão da rede visa atender o aumento da carga instalada e o consumo de energia, eventos também identificados por crescimento horizontal e vertical do mercado, respectivamente (Sales Brito, 2007). Trata-se da aquisição e implantação de ativos, tais como: construção ou recondutoramento de circuitos alimentadores, instalação/remoção de equipamentos de transformação ou de manobra e instalação de equipamentos e instrumentos de medição.

Os recursos destinados à melhoria da qualidade do sistema têm por objetivo a manutenção ou o resgate dos níveis adequados para o fornecimento da energia elétrica de modo a atender a critérios operacionais de confiabilidade, assim como a metas regulatórias (DEC) - duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, (FEC) - frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, e níveis de tensão em regime permanente.

A instalação de equipamentos para regulação de tensão, compensação reativa ou remanejamento de carga, a troca de condutores e a implantação de novas tecnologias (telecontrole e automação) exemplificam ativos alocados com tais finalidades.

Por fim, existem ainda as situações de desgaste natural de bens e instalações das redes de distribuição, decorrentes de uso ou disponibilidade, a obsolescência ocasionada pela inovação tecnológica ou a necessidade de sua substituição em face de acidente ou danos operativos. Todas elas retratam situações relacionadas à aplicação de investimentos destinados à sua renovação.

A duração (DEC) e a frequência (FEC) das interrupções no fornecimento de energia ao lado da relação custo/benefício, preservação ambiental e segurança para o público, são parâmetros gerenciais que as empresas do setor elétrico devem ter sempre como metas a serem alcançadas.

O DEC das distribuidoras brasileiras, historicamente, tem se mantido em um patamar acima de 15 horas, conforme indica estudo da ABRADDEE - Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica (2012), apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Perfil de desempenho da continuidade de fornecimento de energia elétrica nos últimos anos. Retirado apresentação ABRADDEE (2012).

Este estudo ainda aponta a dispersão destes indicadores entre as empresas do setor de distribuição, conforme indicado nas Figuras 3.2 e 3.3.

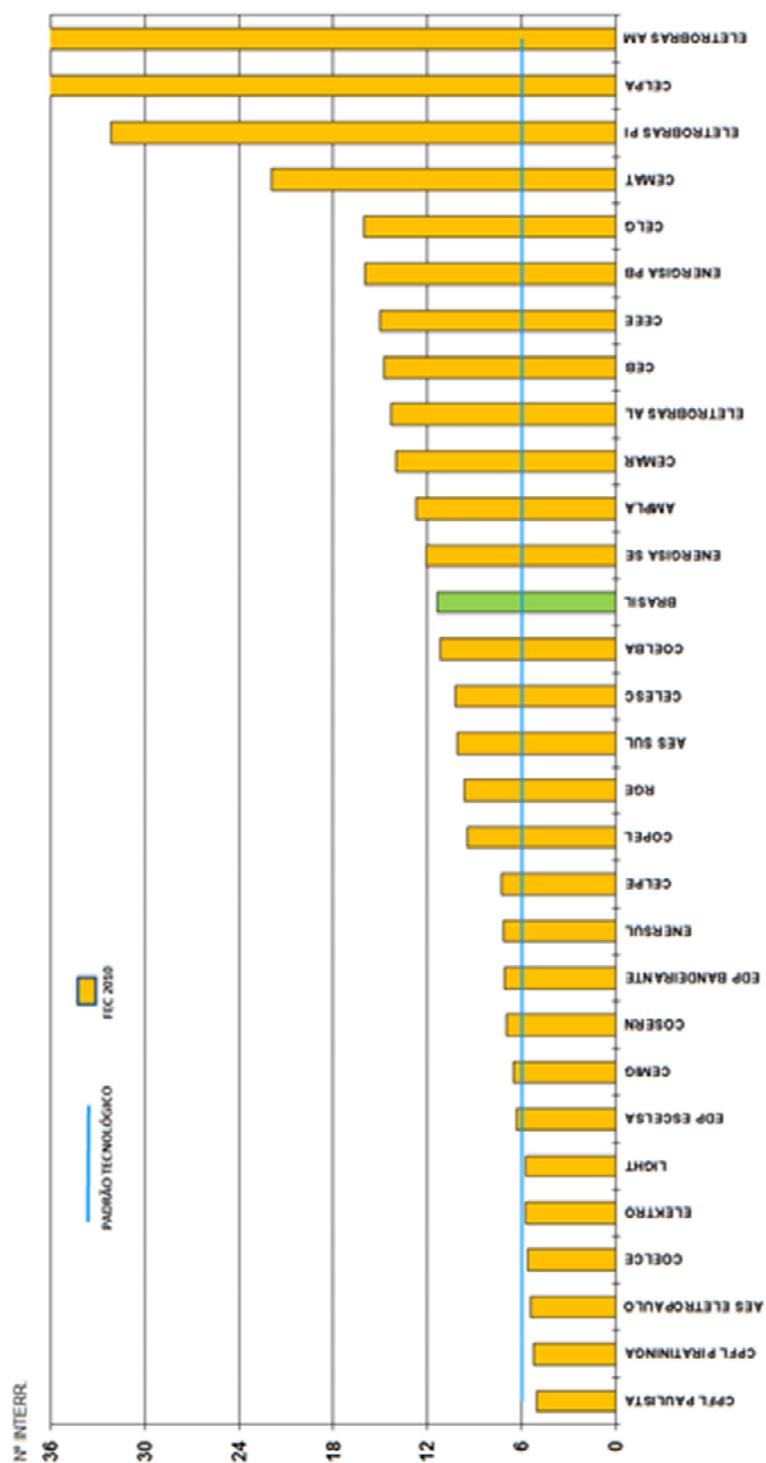


Figura 3.2 - Comparação entre concessionárias da frequência de ocorrências por consumidor em número de interrupções por ano (FEC). Retirado apresentação ABRADÉE (2012).

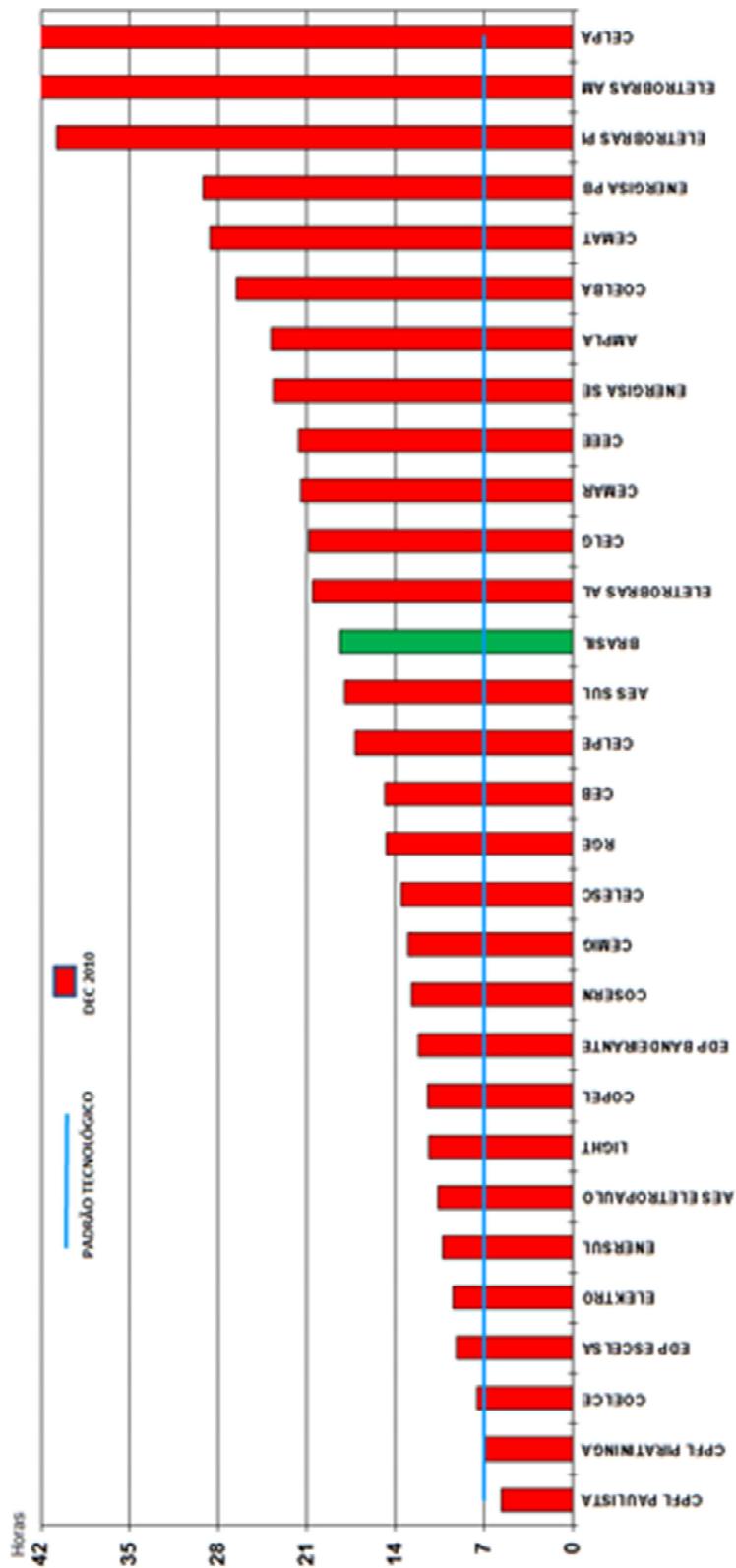


Figura 3.3 - Comparação entre concessionárias da duração de ocorrências por consumidor em numero de interrupções por ano (DEC). Retirado apresentação ABRADDEE (2012).

Outro aspecto importante no entendimento dos indicadores de desempenho consiste na distribuição das falhas no sistema elétrico em quatro grupos sendo: RB - Rede Básica, AT – Alta Tensão, MT – Média Tensão e BT – Baixa Tensão. Verifica-se que a maior contribuição das interrupções dentre todos os sistemas vem da média tensão, que compreende as redes de distribuição. A Figura 3.4 apresenta esta distribuição do DEC na CEMIG (2012).

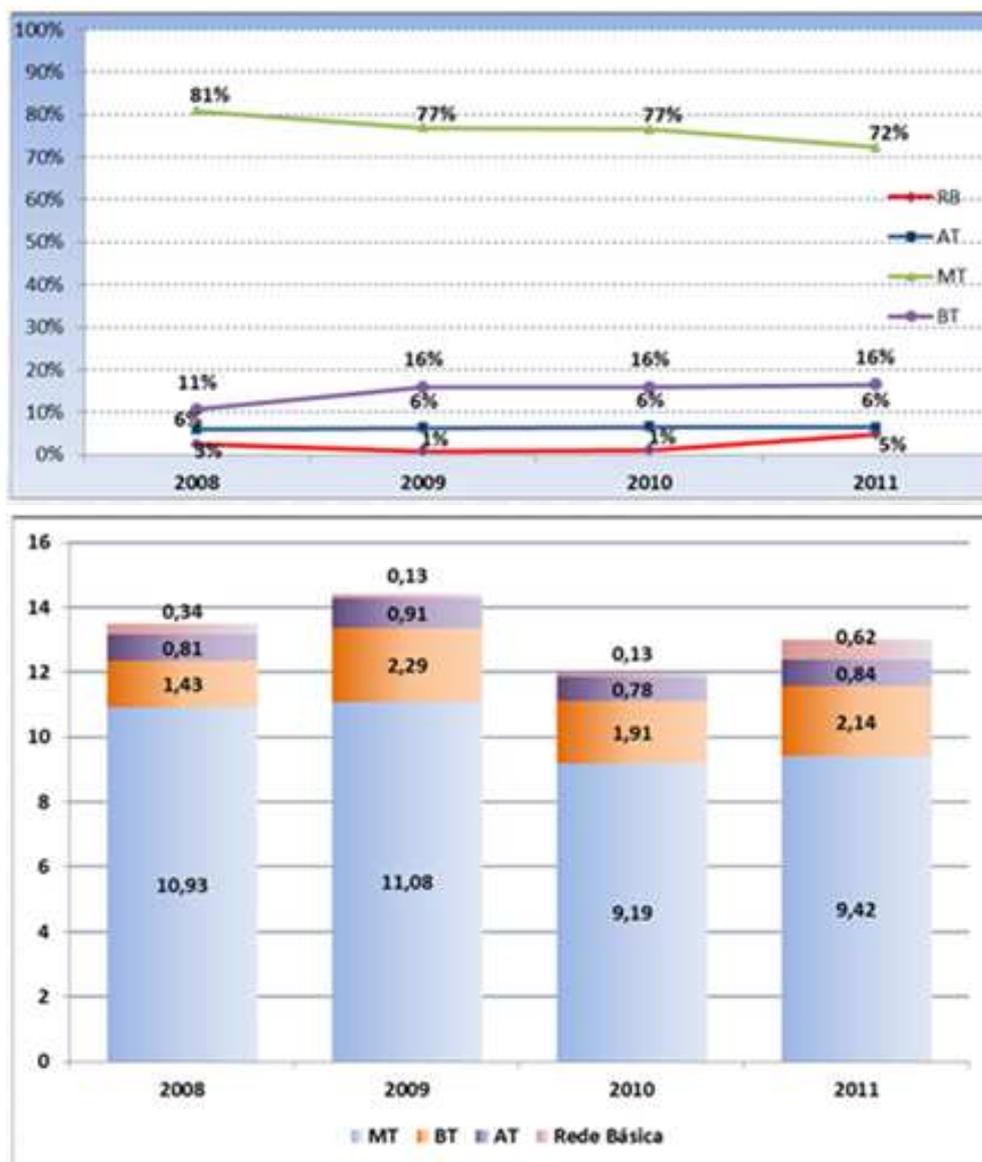


Figura 3.4 - Participação de cada tipo de sistema no DEC. Retirado apresentação CEMIG (2012).

Em decorrência destas ineficiências, provocadas pelo baixo desempenho, as empresas concessionárias de energia elétrica têm sido penalizadas com multas e compensações advindas da regulação do setor que hoje tem como responsável a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tais multas, pagas à agência reguladora e compensações direcionadas aos consumidores, (em milhões de reais), são indicadas na Figura 3.5, que apresenta valores aplicados entre os anos de 2008 e 2010:

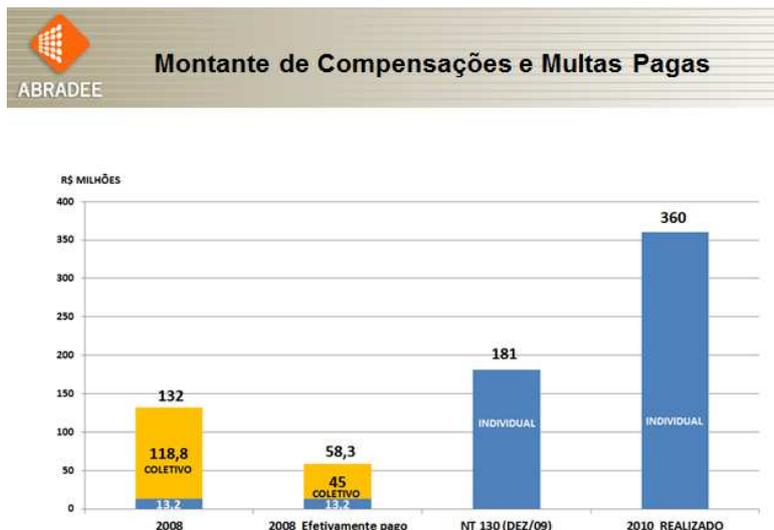


Figura 3.5 - Valores pagos de multas pelas concessionárias por anos ao órgão regulador ANEEL, devido ao não cumprimento de metas de desempenho. Retirado apresentação ABRADDEE (2012).

Ainda neste contexto, as multas e compensações podem ser estratificadas em individuais e coletivas, sendo as individuais pagas diretamente ao consumidor e as coletivas pagas ao poder concedente, objetivando ressarcir os danos provocados pelo não atendimento ao fornecimento. Nota-se em última análise o crescimento destes valores pagos aos consumidores, indicando uma piora no desempenho deste serviço.

Segundo dados da CEMIG (1998), sabe-se também que do total de interrupções, aproximadamente 30% devem-se às interrupções programadas para manutenção das redes, incluindo-se as podas de árvores, a substituição de materiais com desempenho insatisfatórios, as ligações de novos consumidores dentre outros. O restante pode ser debitado de interrupções acidentais provocadas principalmente pelos seguintes agentes:

- Meio ambiente (50%), representadas pelas descargas atmosféricas, objetos na rede e contato com árvores;
- Falhas em materiais e equipamentos (20%), sendo que apenas os isoladores, para-raios, conexões e chaves fusíveis contribuem com 14% (ED-3.40, CEMIG, 1998). Como a participação das redes primárias urbanas nos índices de continuidade de fornecimento é da ordem de 80%, (ED-3.40, CEMIG, 1998), os estudos das concessionárias têm-se concentrado nas redes urbanas de média tensão que possuem dois padrões preponderantes: redes convencionais e redes compactas.

Os contatos acidentais nos condutores nus das redes convencionais provocam curto circuito e acarretam o desligamento da rede pelo sistema de proteção. Elevadas taxas de falhas são causadas pelos desligamentos a partir do contato temporário com a arborização, principalmente em tempestades e ventos fortes.

Dentre as ações para promoção das melhorias de desempenho, nota-se que o setor elétrico nacional tem passado por diversas transformações tecnológicas nos últimos anos. A exemplo disso pode-se citar a inserção de novas topologias nas subestações, em novos equipamentos nas linhas de distribuição, bem como novas configurações de redes de distribuição.

Uma das alternativas em implantação desde a década de 90 consiste na utilização das redes compactas. Os resultados obtidos nas primeiras experiências brasileiras foram promissores, revelando que as redes compactas constituem uma solução técnica e economicamente viável para aumentar a confiabilidade e a segurança do sistema de distribuição.

3.3 Análise de Falhas nas Redes de Distribuição Convencionais e Compactas

Considerando a evolução tecnológica do sistema de distribuição, a cada ano as redes de distribuição aéreas convencionais vêm sendo substituídas por redes de distribuição compactas, que têm por característica apresentar melhor desempenho. No entanto, as

concessionárias brasileiras têm implantado as redes compactas conjuntamente com os sistemas de redes convencionais, não sendo possível a análise pura do desempenho desta nova tecnologia. Apesar desta condição mista das redes compactas e convencionais, é possível avaliar o impacto causado no desempenho do sistema como um todo em decorrência da implantação das redes compactas. Um estudo dessa natureza é apresentado a seguir, considerando registros no centro de operações da CEMIG (2013) na região central no estado de Minas Gerais.

A amostra desta análise considera 435 alimentadores, circuitos de média tensão em 13,8 kV que saem da subestação e alimentam os transformadores de distribuição da rede. A extensão total da amostra é de 7.700 km, abrangendo as cidades de Belo Horizonte, Contagem, Betim e Sete Lagoas, dentre outras. Tal análise se baseia na apuração de falhas ocorridas anualmente nas redes de distribuição no período de 2010, 2011 e 2012 (3 anos). As falhas apuradas são por km de rede, considerando desde a saída do pórtico da subestação até os fins de rede, onde naturalmente são instalados transformadores de distribuição. As redes de baixa tensão não são consideradas neste estudo.

A Figura 3.6 apresenta a comparação de desempenho considerando a média de falhas apresentada por 5 (cinco) alimentadores puramente constituídos por rede compacta e 5 (cinco) alimentadores puramente constituídos por rede convencional, considerado em uma base de comparação de 30 km de extensão total no período proposto de 3(três) anos.

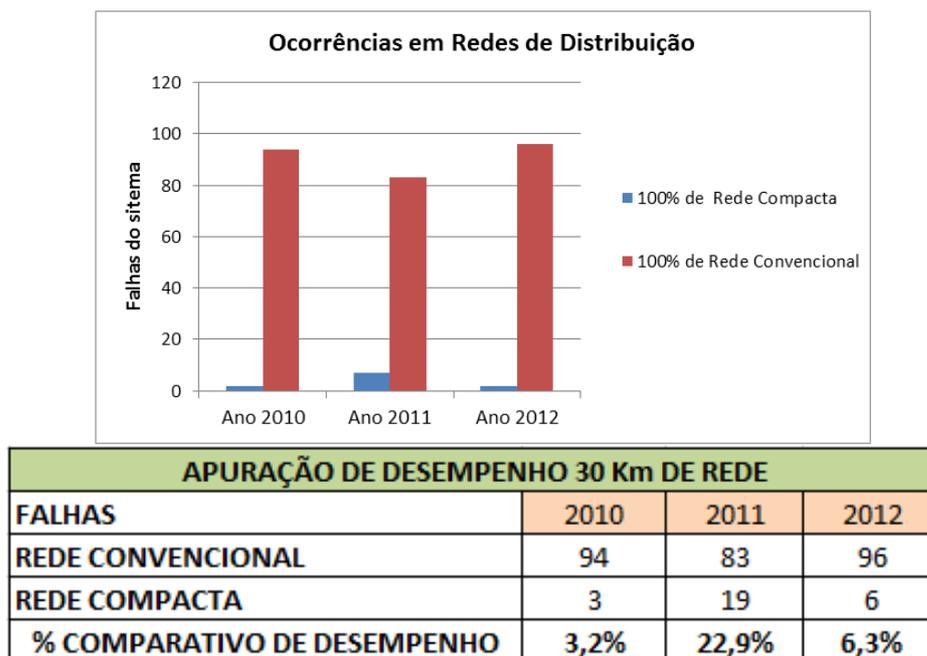


Figura 3.6 - Comparação de desempenho entre redes convencionais e compactas.

Como se pode observar, as redes de distribuição aéreas compactas apresentam desempenho muito superior às redes convencionais no que se refere à quantidade de falhas ocorridas nos sistema. Nota-se que as redes compactas apresentam taxas de falha entre 23% e 3,2% em relação ao total de falhas em redes convencionais, considerando a amostra em análise.

Outra análise importante consiste em comparar o desempenho do conjunto de alimentadores considerando as devidas parcelas de aplicação das redes compactas em relação às redes convencionais. Para tal compensação estabeleceu-se uma extensão base de rede de 100 km e foram calculados os respectivos percentuais de falta. Foram analisadas 3 situações de composição para os agrupamentos de rede: 0 a 30% de rede compacta, 30 a 60% de rede compacta e 60 a 90% de rede compacta.

As falhas ocorridas a cada 100 km são apresentadas na Figura 3.7.

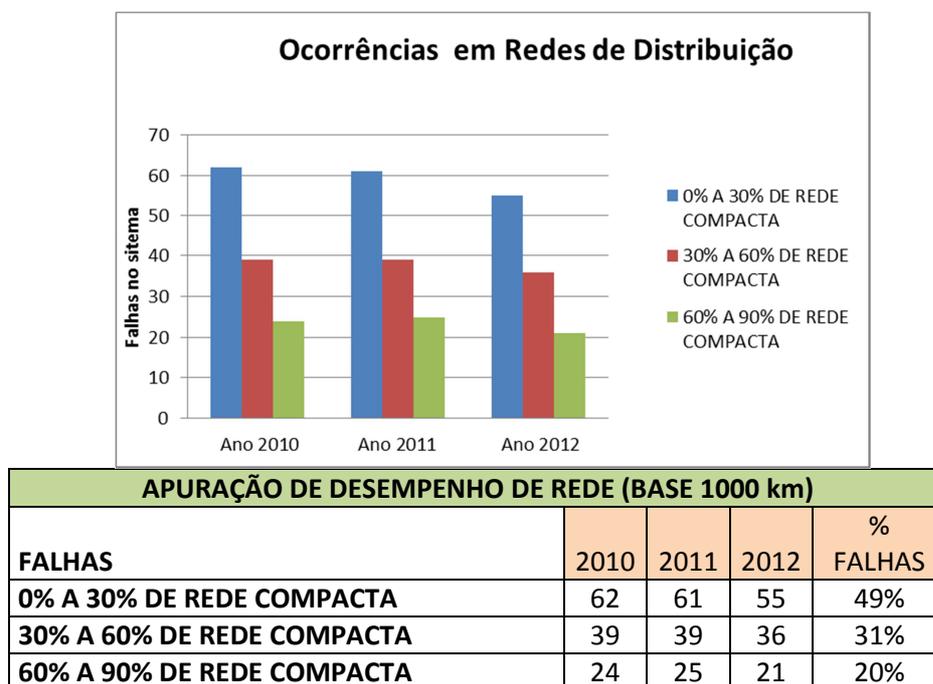


Figura 3.7 - Comparação de desempenho entre redes convencionais e compactas levando em consideração diferentes percentuais de uso de rede compacta.

Em geral os sistemas utilizam tecnologias mistas, parte do alimentador em rede convencional e a outra parte em rede compacta. Na interligação entre as duas topologias de rede é feita a instalação de para-raios para minimizar sobretensões na junção de dois sistemas com impedâncias diferentes.

Observando os dados apresentados na Figura 3.7, observa-se o impacto positivo das redes compactas no desempenho global do sistema. Em alimentadores com mais de 90% de rede compacta, apenas 20% das falhas totais são observadas. Alimentadores com constituição entre 30% e 60% de rede compacta respondem por 30% das falhas.

Nota-se que quando a concessionária investe na implantação da rede compacta, o retorno em melhoria é imediato, já que a taxa de falhas diminui e, conseqüentemente, o desempenho do conjunto melhora.

Na análise a seguir apura-se o resultado de desempenho referente a uma extensão total de 7.700 km de rede, considerando o banco de dados sob uma base de 100 km de rede e

diferentes composições percentuais de rede compacta. A Figura 3.8 apresenta os resultados obtidos.

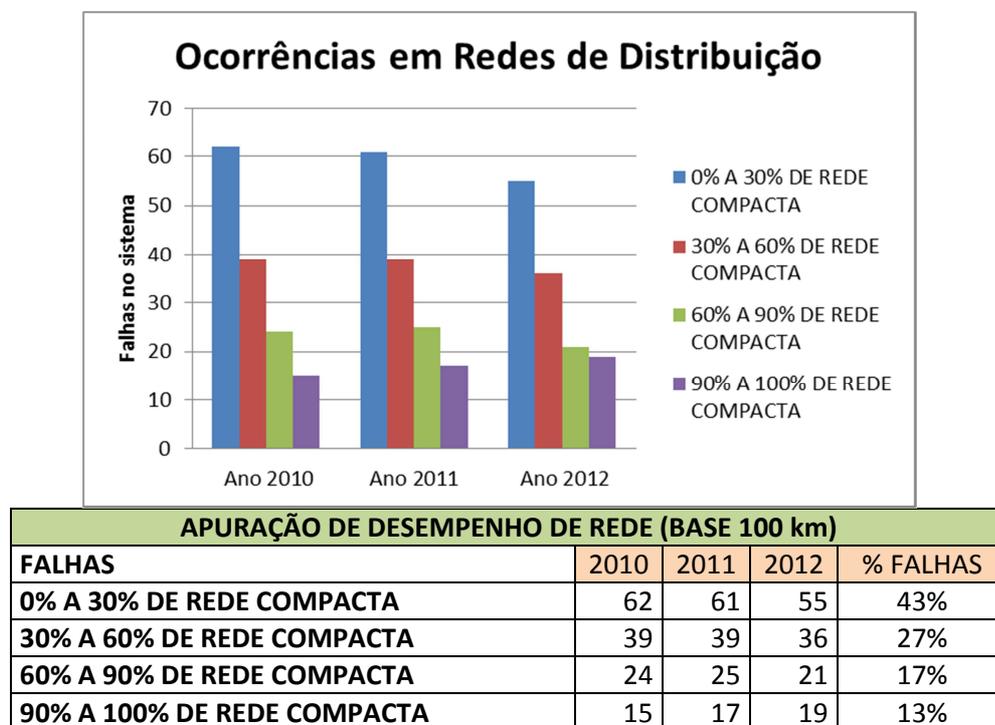


Figura 3.8 - Comparação de desempenho entre redes convencionais e compactas levando em consideração diferentes percentuais de uso de rede compacta.

Diante do incremento na implantação das redes compactas e da apuração dos dados de falhas apresentados na Figura 3.8, verifica-se uma redução nas ocorrências de interrupções das redes de 30%, reduzindo-se o percentual de falha de 43% (0 a 30% de rede compacta) para 13% (90% a 100% de rede compacta). Esta crescente diminuição ocorre na medida em que implantam-se novas redes compactas em substituição as redes convencionais.

Exemplificando os dados, pode-se observar que no sistema puramente convencional ocorrem em torno de 95 falhas anuais. Já no caso de alimentadores com 30% de rede compacta as falhas ocorridas são em torno de 55.

Nota-se também que existe um limite técnico de melhoria, onde mesmo com a inserção total da rede compacta não se consegue melhorar o desempenho com atual tecnologia do padrão. Este ponto é conhecido como “limite técnico do padrão”, (ABRADEE, 2012).

Outros aspectos devem ser observados para que se possa concluir a respeito do desempenho desse tipo de rede, principalmente com o estudo para identificação de suas prováveis causas de falhas. A próxima seção trata desse tema.

3.4 Identificação das Principais Causas de Interrupções em Redes de Distribuição

As concessionárias de energia elétrica têm registrado e monitorado as falhas que ocorrem em suas redes, uma vez que o órgão regulador do setor, a ANEEL, obriga as concessionárias a cumprirem índices estabelecidos de interrupções através dos indicadores de desempenho para obterem melhores resultados de qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

A seguir são apresentadas as causas de interrupção no fornecimento de energia na CEMIG (2013) no período de 3 anos, compreendendo os anos 2010, 2011, 2012. A análise desses dados deve levar em consideração que a classificação das falhas é feita pelo electricista no atendimento das ocorrências e nem sempre os motivos do evento são facilmente determinados. Sendo assim, tais informações devem ser avaliadas com certa cautela, mesmo considerando o grande volume de dados apurados nestes atendimentos. A Tabela 3.1 apresenta tais dados.

Tabela 3.1 - Causas de interrupção de nas redes de distribuição. Retirado de relatório CEMIG (2013).

Principais causas de Falhas	Distribuição das Falhas
Descargas Atmosféricas	28,8%
Falhas Equipamentos	16,5%
Árvores	14,5%
Falhas humanas	12,2%
Causas Desconhecidas	11,6%
Animal	7,0%
Abalroamento	5,0%
Pipa	3,5%
Outros	1,4%
Total	100,00%

Diante destas informações fica claro que as falhas nas redes de distribuição possuem causas diversas e tem como maior motivador as descargas atmosféricas, sendo importante a prospecção de trabalhos neste assunto para solução destes problemas.

Outro dado importante foi registrado em um trabalho da concessionária Escelsa, do Espírito Santo, no ano de 2006, no qual foi comparado o desempenho de uma rede convencional entre os anos de 2001 a 2003 com seu desempenho após reconstrução da mesma rede com o padrão de rede compacta. Neste trabalho ainda foram separadas as interrupções nas redes compactas de convencionais por causas conforme registro na Tabela 3.4, (Segatto, 2008).

Tabela 3.4 - Causas de interrupção de nas redes de distribuição. Retirado de SEGATTO (2008)

Causa	Rede Convencional					Rede Protegida				
	2001	2002	2003	Total	Média anual	2005	2006	Total	Média anual	Redução de ocorrências
Pipa	7	8	19	34	11,33	2		2	1	91,2%
Deterioração de Material	2			2	0,67	1	1	2	1	-50,0%
Falha Humana	2			2	0,67			0	0	100,0%
Objeto na Rede	1			1	0,33			0	0	100,0%
Árvore	1			1	0,33			0	0	100,0%
Causa Ignorada	1	4	2	7	2,33			0	0	100,0%
Abalroamento		1	1	2	0,67			0	0	100,0%
Temporal		1	4	5	1,67	2	2	4	2	-20,0%
Animal			1	1	0,33			0	0	100,0%
TOTAL	14	14	27	55	18,33	5	3	8	4	78,2%

Fonte: Concessionária Escelsa - Energias do Brasil, 2006.

Como demonstrado na Tabela 3.4, a rede de distribuição compacta na Escelsa apresentou um desempenho muito superior à rede convencional. A média anual de falhas antes da implantação das redes compactas era de 18,33. Com a nova rede passou a ser de apenas 4, uma redução de ocorrências de 78,2%. Este ganho de eficiência justifica o uso das redes compactas por parte das concessionárias.

Outro ponto importante consiste na indicação dos fatores de falhas associados às causas de interrupções nas redes. Nota-se neste caso que na rede compacta ocorrem poucas falhas de causas temporárias, como toque de arvores e pipas, que na maioria dos casos não geram defeitos permanentes.

Ainda em relação ao desempenho das redes compactas, vale destacar a experiência americana, mais especificamente da empresa Hendrix Cable que, atualmente, detém 90% do mercado de materiais para redes compactas. Com uma experiência de 63 anos a Hendrix Cable vem aplicando as redes compactas nos EUA em locais de alto nível de exigência técnica, tais como áreas nevadas, área de florestas e desertos, dentre outros apresentados na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Rede compacta da Hendrix Cable em áreas nevadas e florestais. Retirado de apresentação Hendrix Cable (2014)

Como referências de desempenho das redes compactas nos EUA, são apresentadas áreas onde problemas climáticos, chuvas, nevascas e as redes compactas continuaram em funcionamento normal. A Figura 3.10 apresenta registro de algumas ocorrências como exemplo.



Figura 3.10 – Registro de ocorrências climáticas em redes compactas nos EUA. Retirado de apresentação Hendrix Cable (2014)

Outras análises importantes que podem ser retiradas do emprego das redes compactas nos EUA correspondem às apurações das faltas. Estas são classificadas por causas e comparadas entre redes compactas e convencionais. A Figura 3.11 mostra os resultados destas análises que são similares aos resultados encontrados nos Brasil. Isso permite afirmar que as redes compactas apresentam comportamento superior em relação às redes convencionais em termos de desempenho e redução de custos de manutenção.

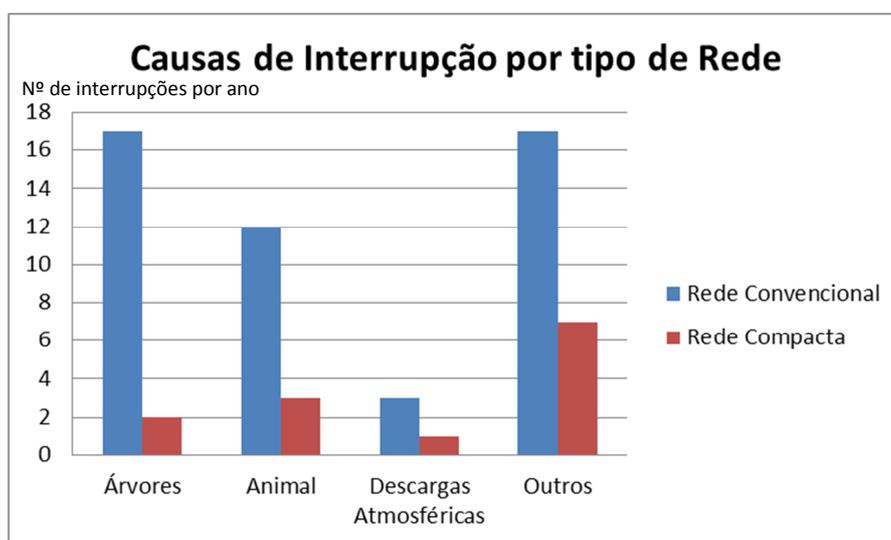


Figura 3.11 – Resultados das análises de falhas das redes compactas comparadas as redes convencionais, retirado de apresentação da Hendrix Cable. Adaptado de apresentação Hendrix Cable (2014)

Nota-se que o maior número de falhas nas redes convencionais refere-se aos contatos intermitentes com árvores e animais. No entanto, estas causas não são relevantes quando se refere às redes compactas. Conforme o estudo americano, as falhas em redes convencionais são em torno de 40 ocorrências por ano. Já nas redes compactas este número não passa de 13 falhas anuais. Diante desta condição a implantação das redes compactas possibilitou uma redução em torno de 75% das interrupções no sistema. Com base nesses resultados, é possível inferir que nas redes compactas as falhas por intervenções não permanentes são muito baixas, devido à causa apontada, sendo este um fator fundamental para melhoria do desempenho das redes de distribuição.

No entanto, é importante destacar que não apenas a melhora de desempenho proporcionada pelas redes compactas deve ser avaliada, mas também a viabilidade econômica de implantação desse tipo de rede, determinando-se os seus custos associados.

3.5 Viabilidade Econômica das Redes Compactas

A análise da viabilidade econômica das redes compactas é importante para entender o crescimento da aplicação desta modalidade de rede no Brasil.

De acordo com o ED – 3.40 (CEMIG,1998) entende-se por viabilidade econômica o estudo da característica de um empreendimento ou atividade, que busca traduzir o fato de que os custos e esforços gastos em sua implantação e funcionamento são compensados, vantajosamente, pelas receitas e benefícios auferidos no decorrer de um prazo conveniente aos seus promotores.

A análise apresentada a seguir considera a determinação de valores que possibilitem a comparação, em uma mesma base, entre os custos totais relativos à implantação, manutenção e desempenho das redes compactas em relação às redes convencionais.

Para melhor entendimento e caracterização da viabilidade econômica das redes de distribuição, os custos associados são divididos em 2 parcelas:

- Custos relativos às características próprias de cada modalidade de rede, relativos ao tipo de rede que será implantado.
- Custos que impactam a sociedade, relativos aos desligamentos acidentais sobre as atividades produtivas e sociais.

Os custos totais, que representam os custos sob o enfoque exclusivo das concessionárias são determinados admitindo-se a incidência periódica dos seguintes eventos geradores de custo ao longo da vida útil esperada para as redes:

- Necessidade de investimento inicial diferenciado;
- Aplicação de manutenção periódica corretiva e preventiva;
- Existência de lucros cessantes, face à ausência de faturamento durante as ocorrências de desligamento na rede;

Com relação ao horizonte de estudo, é considerado o período de 25 anos, tempo adotado pelo órgão regulador ANEEL para determinar a depreciação total do ativo, para todas as modalidades de rede, sendo este período conhecido como a vida útil de uma rede de distribuição com posteação de concreto ou madeira.

Os custos globais das redes correspondem aos custos totais agregados aos custos sociais e podem ser identificados como sendo o valor pago tanto pela sociedade para a

utilização da energia, quanto pelas concessionárias através do custo do capital investido e seus custos operacionais. A composição dos custos de implantação e manutenção esta destacada no fluxograma da Figura 3.12.

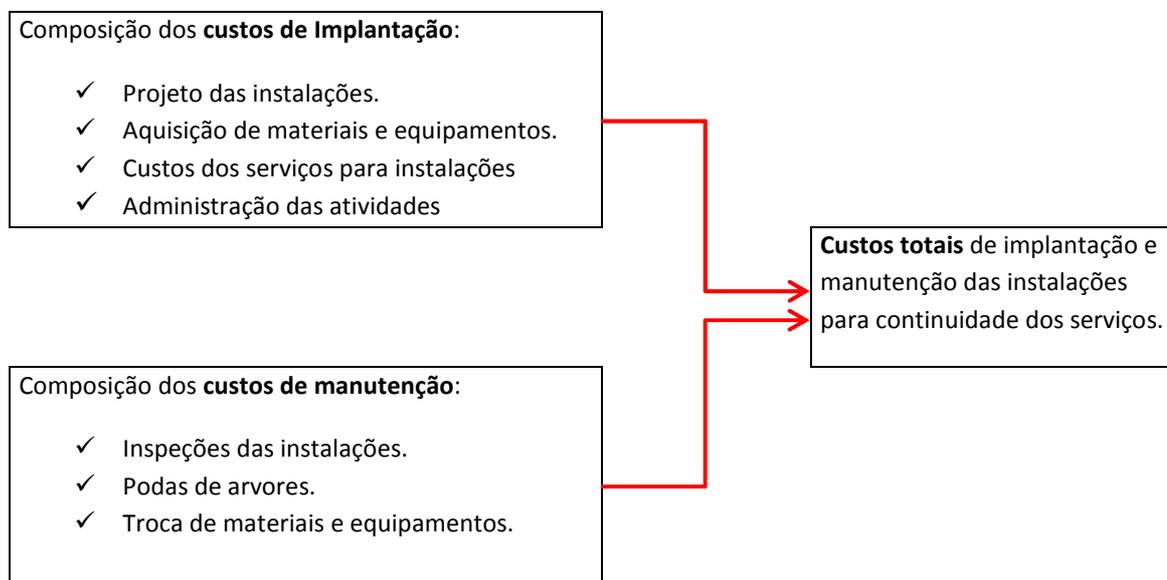


Figura 2.12 – Composição dos custos de implantação e manutenção das instalações

Os valores dos custos citados acima não são disponibilizados devido ao sigilo de informações das concessionárias. Neste caso foram utilizados valores referencias da CEMIG, sendo representados percentualmente.

Comparando os investimentos necessários para as duas modalidades de rede, verifica-se que a rede compacta, em relação à rede convencional requer valores superiores a 7% para obras de extensão e reforma. Entretanto, esta diferença é compensada pelos custos operacionais requeridos para as redes convencionais, que conforme citado anteriormente neste capítulo, são muito maiores em comparação aos custos das redes compactas, (neste caso representam 60% comparados às redes compactas).

Vale lembrar, neste capítulo indica-se que o uso da rede compacta, leva a uma redução de aproximadamente 90% nas ocorrências de faltas. Logo, os índices de qualidade e confiabilidade de serviço apresentam bons resultados e conseqüentemente verifica-se uma queda no custo de energia não distribuída quando da aplicação das redes compactas. Este

resultado consolida a rede compacta como uma opção de muito interessante de aplicação pelas concessionárias, opção esta que vem crescendo a cada ano.

4 Identificação do Comportamento de Cabos Cobertos e Redes Compactas Frente a Sobreensões Impulsivas: Pesquisas e Ensaios em Laboratório

4.1 Introdução

Conforme destacado nos capítulos anteriores desta dissertação, a rede de distribuição compacta apresenta um conjunto de peculiaridades que a diferem das denominadas redes convencionais. Dentre essas peculiaridades, destacam-se o uso de cabos cobertos, espaçadores e isoladores de material polimérico.

Sob o ponto de vista de desempenho frente a surtos impulsivos, não existem referências claras na literatura a respeito do nível básico de isolamento (NBI) e tensão de 50%

(*CFO – Critical Flashover overvoltage*) da rede compacta e de seus componentes individualmente. O desconhecimento de tais características dificulta a real estimativa do comportamento elétrico deste tipo de rede, bem como a proposição de melhorias para obtenção de um melhor desempenho do sistema. Este contexto sugere o desenvolvimento de pesquisa aplicada para definição do nível de isolamento frente a impulsos das principais estruturas da rede compacta, bem como da rede como um todo.

Além disso, é importante destacar que ensaios dedicados que considerem as peculiaridades desse sistema não são definidos nas normas nacionais e internacionais, além de a literatura não apresentar trabalhos que definam a metodologia adequada para aplicação destes ensaios.

Ademais, algumas referências indicam que a propagação de surtos em cabos com cobertura dielétrica é bastante diferente em relação ao comportamento em cabos nus, o que pode afetar o conceito clássico de NBI.

Neste cenário, torna-se importante a verificação do comportamento desse tipo de rede frente a impulsos atmosféricos, observando suas peculiaridades.

Este capítulo apresenta um conjunto de informações relativas a trabalhos apresentados na literatura para verificação do comportamento de condutores cobertos frente a impulsos e do desempenho da rede compacta em termos de sua suportabilidade elétrica. Além disso, são indicados os ensaios padronizados a que os componentes da rede são submetidos, buscando-se identificar elementos que possam indicar aspectos que traduzam a suportabilidade elétrica da rede frente a surtos atmosféricos.

4.2 Trabalhos da Literatura Referentes ao Comportamento Impulsivo de Cabos Cobertos e Rede Compacta

Dentre os trabalhos apresentados na literatura referentes ao comportamento dos cabos cobertos quando submetidos a sobretensões atmosféricas, destacam-se os trabalhos de Wareing (2005) e Jiliang He (2008). Wareing (2005) apresenta um extenso relatório dedicado à implantação do cabo coberto nas redes de distribuição em média tensão em vários países, dentre eles o Brasil. Neste trabalho, Wareing identificou os ganhos de uso dos cabos cobertos, como também os problemas desta aplicação em redes convencionais.

He (2008) apresenta um interessante trabalho dedicado ao estudo do comportamento de cabos com cobertura dielétrica frente a sobretensões. Neste trabalho, é chamada atenção para o diferente mecanismo de surgimento, evolução e extinção do arco elétrico dos cabos nus em comparação aos cabos cobertos.

De acordo com He (2008), no caso de uma linha com cabos nus atingida por uma descarga atmosférica, pode-se definir, de forma simplificada, o surgimento de uma onda de surto de tensão de valor máximo igual à metade da corrente de descarga vezes o valor da impedância de surto da linha. Esta onda se propaga na linha até que haja a disrupção num ponto do sistema de menor nível de isolamento, provavelmente um isolador conectado a um ponto aterrado. Após o surgimento o arco se propaga ao longo da linha, dissipando energia por efeito de disrupções, distribuindo a energia do arco ao longo do condutor nu até sua extinção.

No entanto, este comportamento não ocorre em cabos com cobertura dielétrica (He, 2008). Por se tratar de um condutor envolto por uma camada isolante, não existe a movimentação do arco elétrico ao longo do cabo, ocorrendo a concentração da energia em um único ponto. Este efeito pode levar à perfuração da camada isolante e a posterior ruptura do cabo. A Figura 4.1, adaptada do trabalho de He, indica as diferenças entre o comportamento de um arco elétrico se desenvolvendo em um cabo nu comparado ao cabo coberto.

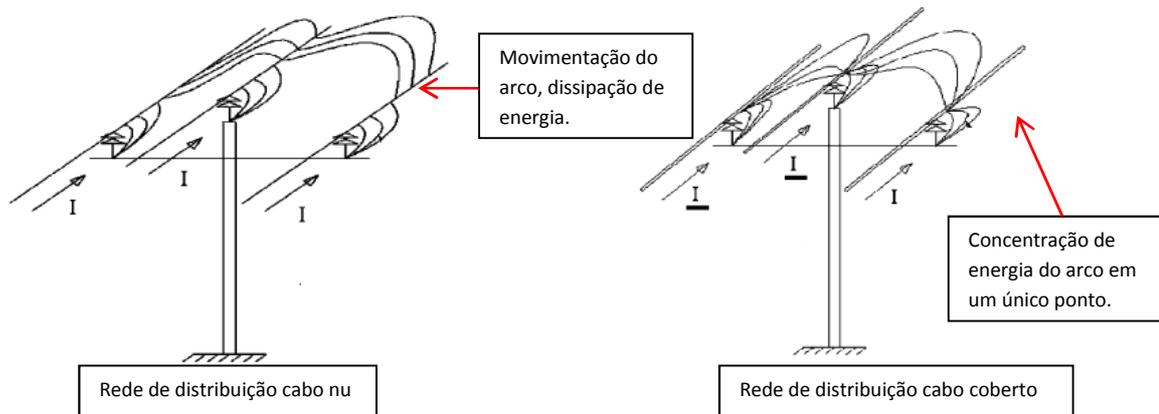


Figura 4.1 - Diferença de comportamento de sistemas de cabos nus e cobertos, quando submetidos a arco elétrico. Figura adaptada de He (2008).

No contexto das pesquisas relativas especificamente às redes de padrão compacto, alguns desenvolvimentos foram feitos para se buscar uma estimativa dos valores de suportabilidade dessas redes a impulsos atmosféricos. Um exemplo refere-se ao trabalho desenvolvido por Powell (1965).

Neste trabalho, dedicado à análise de desempenho de redes compactas de uma concessionária dos Estados Unidos, foram consideradas redes com tensão de serviço de 4 e 13 kV, com uso de espaçadores de porcelana e acrílico e cabos de 600 V e 5 kV não blindados.

Os cabos foram submetidos a ensaios de rigidez dielétrica sob tensão de impulso atmosférico com polaridade positiva, obtendo-se em vários casos perfurações na cobertura sem que fosse verificada a completa retirada da isolação. Os valores de tensão que causaram perfuração se situam na faixa de 140 kV e 180 kV. O procedimento de realização deste teste foi a aplicação de um impulso entre o mensageiro, instalado na parte superior do espaçador, e os berços do espaçador fase A e C que estão aterradas, como demonstrado na Figura 4.2.

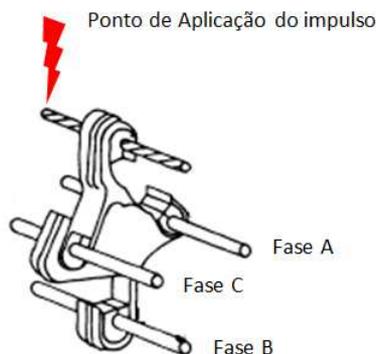


Figura 4.2 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões , figura adaptada de Powell (1965).

Dando continuidade a este estudo, Gill (1967) publicou uma extensão do trabalho de Powell com diversos avanços, dentre eles a confirmação da ótima experiência de implementação das ações corretivas indicadas em estudos anteriores e a maior dedicação a testes em redes compactas de 13 kV.

A investigação de Gill buscou avaliar o efeito de três parâmetros na rigidez dielétrica sob tensão de impulso atmosférico das redes compactas, sendo eles:

- Espessura da cobertura dos condutores fase;
- Material da cobertura;
- Espaçamento entre a fase e mensageiro nu.

Os ensaios utilizaram ondas de polaridade negativa, que de acordo com verificações prévias, se mostrou mais severa que a positiva, fato não observado por Powell. Houve também uma variação de testes com os espaçadores de materiais diferentes, utilizando impulso aplicado sob chuva.

O trabalho de Gill apresentou, pela primeira vez, resultados de testes em condutores com cobertura de polietileno, geralmente aplicados hoje nas redes compactas. Este novo material mostrou possuir maior rigidez dielétrica em relação aos testados por Powell (borracha butílica e neoprene).

As principais conclusões do trabalho de Gill foram:

- Quanto maior for o espaçamento entre o mensageiro e a fase maior será rigidez dielétrica do sistema.

- Para pequenos espaçamentos entre condutor fase e mensageiro, a cobertura do cabo tem grande influência na rigidez a sobretensão de impulso do conjunto.

- À medida que a distância entre mensageiro e condutores fase aumenta, todos os tipos de cobertura tendem para o mesmo valor de suportabilidade a sobretensões. Estimou-se que 432 mm seja o espaçamento no qual todos os condutores apresentem a mesma suportabilidade, inclusive os cabos nus.

Ainda neste trabalho, Gill identifica através de cálculos que um incremento de 25 mm no espaçamento entre o condutor mensageiro e as fases produz um aumento de 20 kV na rigidez a sobretensão de impulso do espaçador. Esta maior distância promove ganhos efetivos na suportabilidade.

Outro trabalho que contribuiu para identificar a suportabilidade a sobretensão dos condutores cobertos foi o artigo apresentado por Lee (1982), que descreve o fenômeno de ruptura dos condutores cobertos, tratado no trabalho como “*arc burndown*”, em redes de 12 kV com cabos cobertos instalados sobre isoladores de pino.

A motivação para realização deste estudo foi a constatação de que 50% dos casos de ruptura de condutores cobertos se deviam à ação de descargas atmosféricas. Segundo Lee, o processo de ruptura compreende as seguintes etapas:

- Perfuração pontual da cobertura do cabo coberto;
- Ocorrência de descargas disruptivas sustentadas entre o ponto da cobertura perfurado e o cabo mensageiro nu;
- Concentração de arco elétrico num único ponto do condutor coberto;
- Sobreaquecimento e a fusão do condutor coberto, que com a tração de instalação provocam a ruptura e queda do mesmo.

Outra contribuição do trabalho de Lee foi a confirmação de que os principais mecanismos que provocam a perfuração da cobertura do cabo são as sobretensões atmosféricas, descargas nos pontos de amarração do cabo ao isolador e trilhamento elétrico, processo comum ao uso do condutor coberto.

4.3 Ensaios Elétricos em Acessórios de Rede Compacta

4.3.1 Introdução

Especificamente nas redes de distribuição brasileiras, os componentes das redes compactas precisam atender certos requisitos de qualidade referentes à natureza mecânica, estrutura química e suportabilidade elétrica, mas nem sempre relativos à suportabilidade frente a impulsos. A literatura apresenta um conjunto de testes para a verificação de tais requisitos.

Os ensaios são geralmente divididos em dois grupos, um referente ao cabo e outro dedicado aos acessórios da rede. A seguir são apresentados os ensaios específicos que constam na literatura e seus procedimentos de realização, buscando-se avaliar se é possível inferir, com base nesses testes, dados relativos ao comportamento da rede frente a surtos atmosféricos.

4.3.2 Ensaios Elétricos Aplicados aos Cabos Cobertos da Rede Compacta

Considerando o condutor coberto como elemento principal da modalidade de rede compacta, pode-se inferir que os testes elétricos aplicados a este material são de fundamental importância para o entendimento da suportabilidade a sobretensões do sistema. Os ensaios descritos a seguir são baseados em conteúdos apresentados em normas nacionais como ABNT NBR 11873 (2011) e CEMIG-379 (2014):

- Tensão de trilhamento elétrico do condutor
- Tensão elétrica suportável do condutor sob água
- Tensão elétrica aplicada na superfície da cobertura

4.3.3 Tensão de Trilhamento Elétrico do Condutor

Os ensaios elétricos aplicados aos cabos cobertos são realizados para se determinar o comportamento do cabo frente a intempéries. Os procedimentos citados a seguir são apresentados na especificação técnica CEMIG – 379 (2014) e são adaptações das normas nacionais ABNT NBR 11873 (2011) e ABNT NBR 10296 (1988).

O teste de resistência da cobertura ao trilhamento elétrico é realizado em duas condições, com o cabo novo e com o cabo envelhecido artificialmente. O procedimento de aplicação do teste é o mesmo para as duas condições de cabos. No entanto, os requisitos de resultado são distintos devido ao cabo envelhecido não responder ao mesmo nível de suportabilidade das amostras de cabo novo.

O ensaio deve ser executado observando-se as seguintes condições:

- a) O ensaio é realizado em temperatura ambiente de 23°C.
- b) O ensaio deve ser realizado em amostras de corpo de prova de 15 cm de comprimento.
- c) Os corpos de prova devem ser lixados com lixa de carbetto de silício (SiC), granulação 400, sendo importante a remoção de todo o brilho da superfície do cabo, bem como dos eventuais resíduos metálicos.
- d) No teste de trilhamento elétrico é usada uma solução contaminante para simular as condições de ambiente de chuva. A composição desta solução é 0,1% em massa de NH₄Cl (Cloro de Amônio), 0,02% em massa de isoctil fenoxi polietoxietano misturada em água destilada ou deionizada. Esta solução terá uma resistência de 3,95 ohms a 23°C. Esta solução contaminante é aplicada com dosador automático em fluxo contínuo de 0,11 ml/minuto a amostra.
- e) Neste ensaio é usado um contador de tempo para apurar os resultados.
- f) O corpo de prova é montado em uma superfície plana, inclinada a um ângulo de 45°C, conforme mostrado na Figura 4.3.

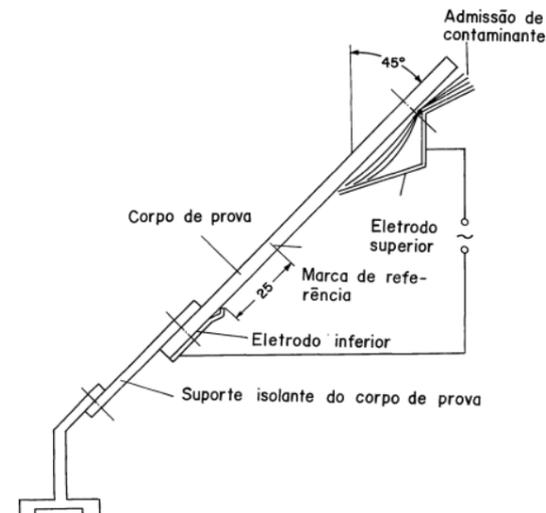
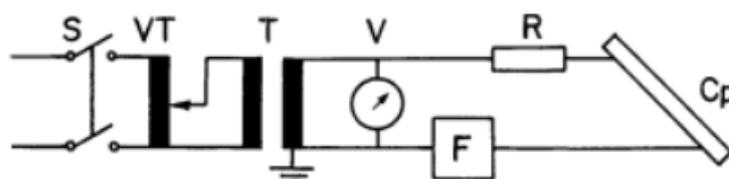


Figura 4.3 - Configuração de montagem para ensaio de trilhamento elétrico. Retirada (ABNT NBR 10296 (1988)).

g) Iniciada a aplicação da solução contaminante e confirmada a fluidez do líquido conforme indicado acima, aplica-se tensão alternada de valores 2,5 kV e 2,75 kV, dependendo da condição do condutor. Se o condutor for novo aplica-se 2,75 kV. Caso seja envelhecido 2,5 kV, durante 1 hora.

O circuito da fonte alternada para o ensaio é configurado com tensão estabilizada de +- 5%, variável até 6 kV, com corrente superior a 0,1 A, conforme apresentado na Figura 4.4:



S= Contator de alimentação; Vt= Variador de Tensão; V= Voltímetro;

Cp= Corpo de prova; T= Transformador de alta tensão; F= Proteção (fusível ou relé);

R= Resistor em serie 100 kΩ.

Figura 4.4 - Configuração do circuito elétrico para aplicação de tensão – Ensaio de trilhamento elétrico, Adaptado de ABNT NBR 10296 (1988).

As condições de reprovação das coberturas do condutor coberto são:

- a) Caso ocorra a interrupção do circuito de teste de algum dos corpos de prova, por atuação automática de seu disjuntor;
- b) Se o material da cobertura sofrer erosão de algum dos corpos de prova;
- c) Caso haja acendimento de chama no material de algum corpo de prova.

Neste ensaio são avaliadas as condições dielétricas da cobertura sob a aplicação de tensão em longo período e nota-se que os requisitos verificados se referem a valores modestos de tensão, não permitindo avaliar o papel da camada dielétrica do condutor sob o ponto de vista de proteção contra sobretensões impulsivas.

4.3.4 Tensão Elétrica Suportável do Condutor sob Água

Este ensaio tem como referência a norma ABNT NBR 11873 (2011) e refere-se à aplicação de uma tensão elétrica alternada com frequência entre 48 e 62 Hz entre o condutor e a água. Neste caso, uma bobina do cabo é colocada dentro de um tanque com água. Este ensaio pode ser realizado em duas condições. A primeira consiste na aplicação de um valor equivalente de 6 kV alternado por milímetro da espessura da cobertura durante 5 minutos. A segunda opção refere-se à aplicação de tensão elétrica contínua constante com valor de 14,4 kV por milímetro de espessura da cobertura durante 5 minutos. A Tabela 4.1 os valores de tensão a serem aplicados para cada classe de tensão dos condutores.

Tabela 4.1- Valores de aplicação de tensão alternada e contínua, retirada da ABNT NBR 11873 (2011).

Classe de Tensão (KV)	Espessura da cobertura (mm)	Valor de tensão alternada (kV)	Valor de tensão contínua (kV)
15	3	18	43,2
25	4	24	57,6
35	7,6	45,6	109,4

Diante as condições de exigibilidade deste ensaio fica clara a dependência da espessura da cobertura para avaliação da suportabilidade à sobretensões. Sendo assim torna-se interessante e inevitável a comparação das suportabilidade dos condutores de classes de tensão diferentes. Observa-se ainda que os valores de tensão exigidos neste ensaio para os condutores cobertos são modestos, não sendo possível afirmar que a cobertura proporciona uma condição de isolamento elétrica de alto nível de proteção.

4.3.5 Tensão Elétrica Aplicada na Superfície da Cobertura

O ensaio de aplicação de tensão na superfície da cobertura é executado em corpo de prova de 300 mm, imerso em água durante 30 minutos. Em seguida, o corpo de prova é retirado da água e enxugado, sendo então enrolados fios de cobre de diâmetro aproximado de 1 mm em torno do corpo de prova em dois pontos equidistantes das extremidades e separados entre si por uma distância de 150 mm, que serão usados como eletrodos para aplicação da tensão elétrica.

Para que o cabo seja aprovado no teste, é necessário que a aplicação de tensões eficazes de 15 kV (cabos classe 15 kV), 25 kV (cabos classe 25 kV) e 35 kV (cabos classe 35kV), com frequência entre 48 Hz e 62 Hz durante 1 min, não resulte em arco elétrico, queima do material da cobertura ou emissão de fumaça.

Observa-se que a demanda por requisitos de suportabilidade se restringe a condições de uso apenas em regime permanente, não se avaliando a condição de regime transitório. Os ensaios avaliados se dedicam unicamente ao uso de um condutor com cobertura sem rígidos requisitos de isolamento.

Conclusivamente, pode-se considerar que os testes aplicados ao cabo coberto não testam a capacidade de isolamento do condutor exposto a sobretensões de natureza impulsiva.

4.4 Ensaio Elétricos Aplicados aos Acessórios da Rede Compacta

Os ensaios elétricos aplicados aos acessórios da rede compacta são similares aos testes para a avaliação do cabo coberto. No entanto, espaçadores e isoladores são também submetidos a ensaios de impulso atmosférico. Os ensaios aplicados aos acessórios são:

- Tensão de trilhamento elétrico do acessório;
- Tensão elétrica suportável do acessório sob chuva;
- Tensão suportável de impulso atmosférico, a seco e ao ar do isolador polimérico;
- Tensão suportável de impulso atmosférico, a seco e ao ar em espaçadores poliméricos.

4.4.1 Tensão de Trilhamento Elétrico do Acessório

O teste de trilhamento elétrico dos acessórios tem as mesmas referências normativas dos procedimentos para os cabos, com o objetivo de avaliar os mesmos requisitos dos condutores cobertos. A diferença consiste no fluxo de líquido contaminante na amostra à taxa de 0,13 ml/min, uma vez que o corpo dos acessórios (espaçadores, isoladores, etc.) possuem maior dimensão, necessitando, assim, de um maior e mais frequente fluxo do líquido contaminante.

Os requisitos dos testes são os mesmos em condutores, ou seja, aplicação de tensão de 2,5 kV em acessório novo e 2,75 kV em acessórios envelhecidos. A aprovação ocorre caso o corpo de prova não sofra dano.

4.4.2 Tensão Elétrica Suportável do Acessório sob Chuva

Os procedimentos e critérios de aprovação dos acessórios ao ensaio de tensão elétrica sob chuva são os mesmos aplicados aos cabos, salientando que este ensaio é requisito para avaliação dos materiais em regime permanente, levando em consideração que os valores de tensão aplicados são modestos.

4.4.3 Tensão Suportável de Impulso Atmosférico em Isoladores Poliméricos

O ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico aplicado aos isoladores poliméricos é referenciado nas normas ABNT NBR 6936 (1992) e ABNT NBR IEC 60060-1 (2013). Tal ensaio avalia o comportamento dos isoladores quanto à suportabilidade de surto de tensão em regime transitório, condição que consiste no foco desse trabalho.

Os testes aplicados nos isoladores são de impulso a seco e impulso no ar. O procedimento do primeiro teste consiste na aplicação de uma tensão 1,2/50 μ s de polaridades positiva e negativa. Neste teste são aplicados 15 impulsos com valor de pico de 110 kV (1,2/50 μ s). Esta quantidade de pulso tem referência normativa da norma ABNT NBR IEC 60060-1 (2013). O valor de tensão a ser aplicado é definido pelas normas de acessório de rede compacta ABNT NBR 16094 (2012) e ABNT NBR 16095 (2012).

Para o ensaio de impulso atmosférico, o isolador polimérico é montado em um pino e instalado em uma base metálica aterrada. Os impulsos de tensão são aplicados no topo e na lateral do isolador, conforme ilustrado na Figura 4.5.

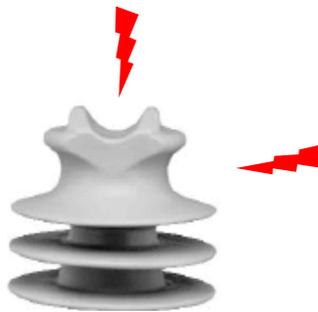


Figura 4.5 - Posição de aplicação do impulso atmosférico no isolador de pino polimérico.

O critério de aprovação deste ensaio é a admissão de 2 descargas de contorno com recuperação da isolação, sem danos ao isolador polimérico.

O ensaio de tensão de impulso atmosférico no ar tem o mesmo procedimento de montagem. A diferença consiste na aplicação de uma tensão de frente íngreme (1,2/50 μ s) de

amplitude 2,1 vezes o valor de tensão dos ensaios de impulso a seco, ou seja, 231 kV. O critério de aprovação para este ensaio é a não perfuração do isolador polimérico.

Diante desses procedimentos de ensaios nota-se que os isoladores poliméricos são submetidos aos mesmos níveis de esforço elétrico dos isoladores tradicionais de porcelana e vidro, conforme ABNT NBR IEC 60060-1 (2013).

4.4.4 Tensão Suportável de Impulso Atmosférico a Seco em Espaçadores Poliméricos

O ensaio de suportabilidade ao impulso atmosférico nos espaçadores tem a mesma referência normativa de procedimento dos isoladores poliméricos, ou seja, ABNT NBR IEC 60060-1 (2013). Os níveis de tensão, formas de onda, número de pulsos e critérios de aprovação são os mesmos aplicados aos testes dos isoladores. As montagens para aplicação dos testes nos espaçadores estão ilustradas na Figura 4.6.

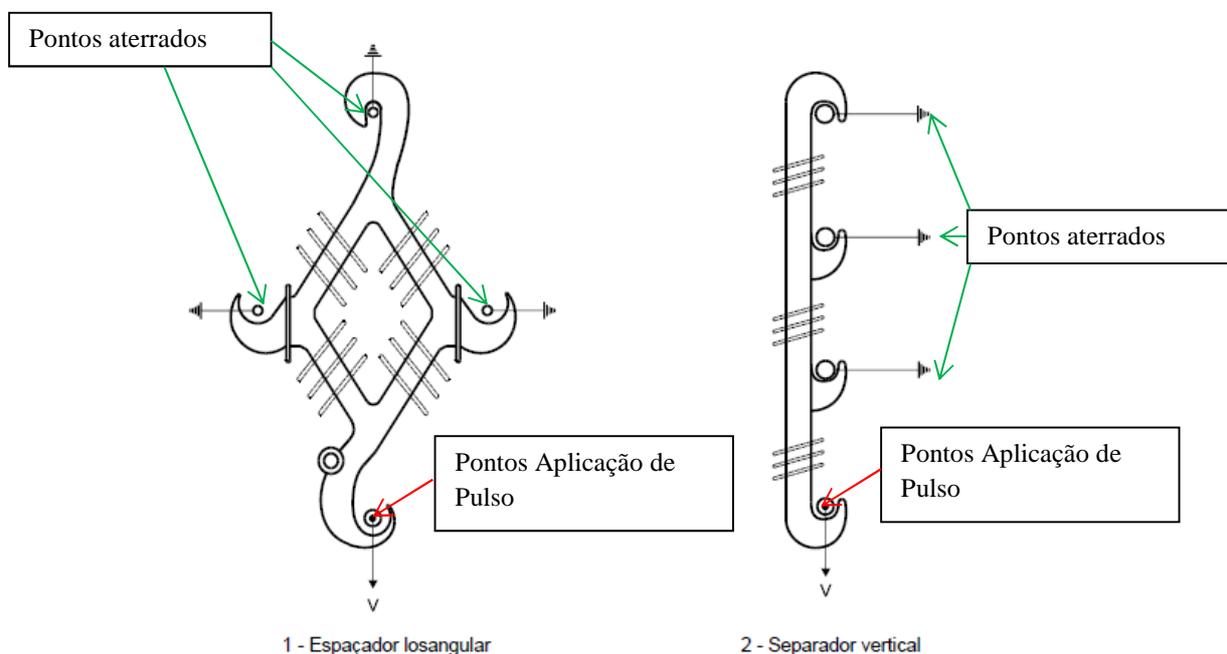


Figura 4.6 - Montagem para aplicação de tensão de impulso atmosférico em espaçadores poliméricos – Ensaio suportabilidade a impulso. Retirado e adaptado de Especificação Técnica CEMIG- 669 (2002).

Este ensaio exige dos espaçadores os mesmos níveis de suportabilidade dos isoladores. Os requisitos normativos empregados neste teste não definem o limite da capacidade de suportabilidade a sobreensões dos espaçadores e isoladores, apenas indicam que os materiais suportam os valores padrões indicados em normas.

4.5 Comentário Geral em Relação aos Testes

A partir da discussão apresentada neste capítulo, pode-se observar que ensaios de suportabilidade a impulso são aplicados apenas nos isoladores poliméricos e nos espaçadores.

É interessante notar que o cabo não é exigido segundo este requisito. No entanto, é fundamental que a suportabilidade do sistema como um todo seja verificada, além de se avaliar as contribuições individuais de cada componente para esta suportabilidade.

No próximo capítulo são definidas as estruturas que representam de forma geral as principais configurações da rede de distribuição compacta e são apresentados resultados de testes referentes à busca de definição da suportabilidade de tais estruturas frente a sobreensões impulsivas.

5 Ensaaios para Estimação do Comportamento de Estruturas de Rede Compacta Frente a Tensões Impulsivas

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os detalhes relativos aos ensaios realizados para aferição do nível de suportabilidade das principais estruturas de rede de distribuição compacta.

5.2 Proposição de Testes para Verificação da Suportabilidade a Sobretensões da Rede de Distribuição Compacta

Diante o exposto anteriormente, observa-se que existe uma necessidade de se testar em laboratório arranjos que definem as configurações mais representativas das redes compactas, de modo a indicar a suportabilidade da rede frente a sobretensões impulsivas, alimentando a proposição de melhorias na rede em pontos que apresentem menor CFO (*CFO – critical flashover overvoltage*).

Neste contexto a princípio verifica-se que os testes devem ser baseados na aplicação de tensões de impulso de polaridade positiva e negativa, em conformidade com a ABNT NBR

IEC 60060-1 (2013), (Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio).

Cabe registrar que até o momento da finalização desta dissertação de mestrado não foram encontrados trabalhos relativos ao desempenho de redes compactas que considerassem as condições de cabo a meio de vão com presença de espaçador, e instalados sobre isoladores de pino e em fins de rede com aplicação de isoladores de ancoragem. Diante disso, realizou-se a pesquisa para levantamento das estruturas básicas existentes nas normas de algumas concessionárias e o padrão nacional.

Na norma de instalações básicas da CEMIG ND 2.9 (2012) “Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Compactas” padroniza 47 estruturas, sendo 15 monofásicas e 32 trifásicas. A normatização de montagens da Copel NTC 885 (2013) “Montagem de Redes de Distribuição Compacta Protegida”, apresenta 38 estruturas de rede compacta, todas trifásicas. A norma nacional de instalações básicas de redes compactas ABNT NBR 15992 (2012) “Redes de Distribuição Aérea de Energia Elétrica com Cabos Cobertos Fixados em Espaçadores para Tensões até 36,2 kV” regulariza 67 tipos de estruturas, todas trifásicas.

Perante este grande número de variações de montagens, a proposta deste trabalho é definir três tipos de estruturas trifásicas, que representem a maior parte das condições de instalação. Estas três situações são: (1) cabo coberto sob isolador de pino polimérico, (2) cabo coberto sob espaçador, (3) cabo coberto ancorado no isolador de ancoragem, conforme indicado na Figura 5.1.

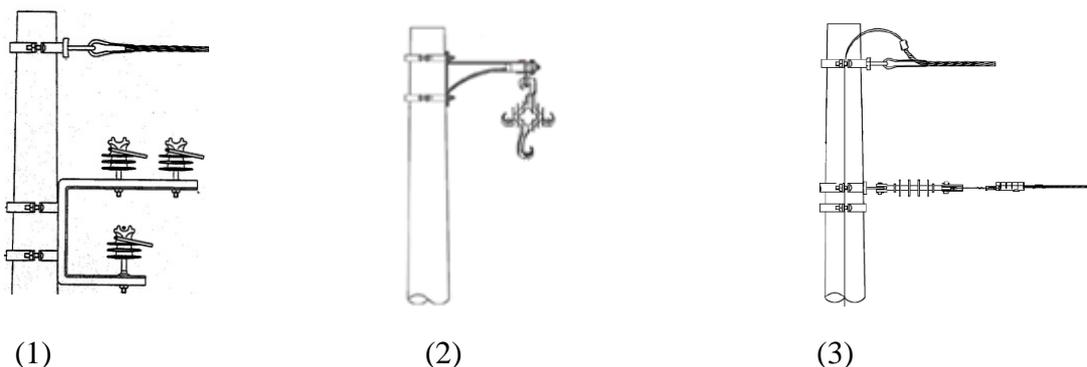


Figura 5.1–Estruturas da rede compacta. Figura adaptada da ND 2.9 CEMIG (2012).

A proposta inicial de testes a serem aplicados às estruturas de rede compacta para responderem às condições de uso no Brasil passam a ser o conjunto de ensaios de tensão suportável de impulso positivo e negativo, em três tipos de montagens, condições a seco e sob chuva indicadas a seguir:

a) Teste de tensão de impulso entre o cabo coberto usado no Brasil base aterrada do isolador de pino polimérico, ambiente seco (Figura 5.2).

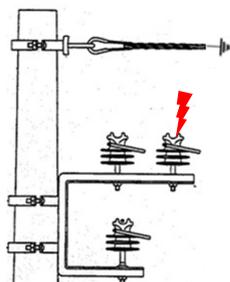


Figura 5.2 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de pino polimérico. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

b) Teste de tensão de impulso entre o cabo coberto e isolador de ancoragem em estrutura fim de rede, ambiente seco (Figura 5.3).

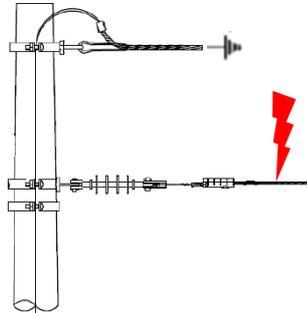


Figura 5.3 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de ancoragem. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

- c) Teste de tensão de impulso em espaçadores de material HDPE, usado no Brasil, entre o mensageiro e cabos fase, ambiente seco (Figura 5.4).

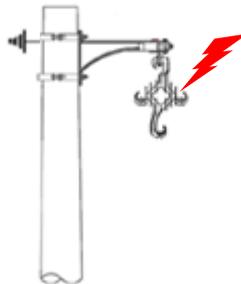


Figura 5.4 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com espaçador losangular. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

- d) Teste de tensão de impulso, aplicado conjuntamente em estruturas com uso de isoladores de pino, isoladores de ancoragem e espaçadores, ambiente seco (Figura 5.5).

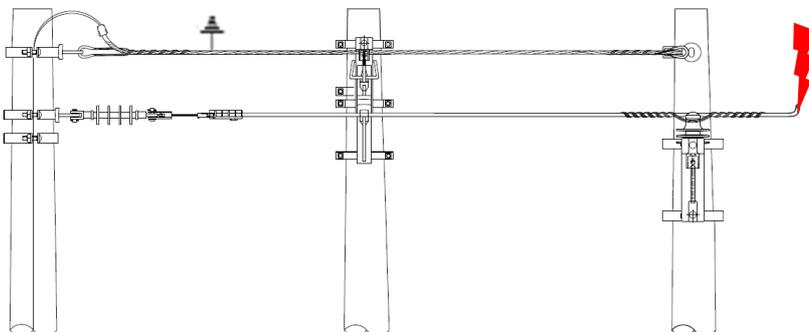


Figura 5.5 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estruturas com isolador de ancoragem, com espaçador losangular e com isolador de pino polimérico. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

e) Teste de tensão de impulso entre o cabo coberto usado no Brasil e o isolador de pino polimérico, sob chuva (Figura 5.6).

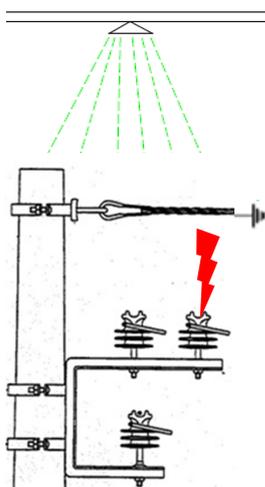


Figura 5.6 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de pino polimérico, sob chuva. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

f) Teste de tensão de impulso entre o cabo coberto e isolador de ancoragem em estrutura fim de rede, sob chuva (Figura 5.7).

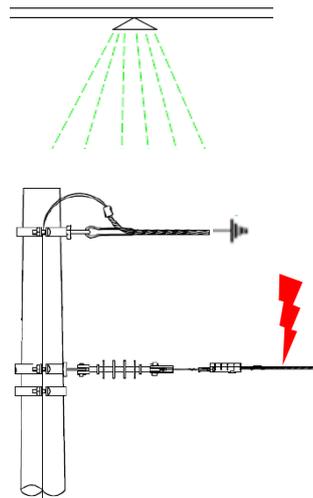


Figura 5.7 - Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com isolador de ancoragem, sob chuva. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

- g) Teste de tensão de impulso em espaçadores de material HDPE, usado no Brasil, entre o mensageiro e cabos fase, sob chuva (Figura 5.8).

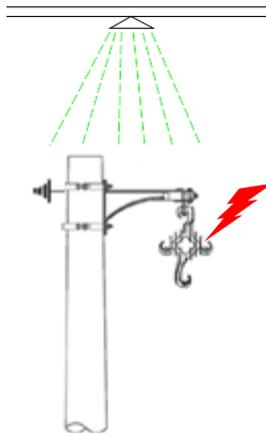


Figura 5.8- Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estrutura com espaçador losangular. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

- h) Teste de tensão de impulso, aplicado conjuntamente em estruturas com uso de isoladores de pino, isoladores de ancoragem e espaçadores, sob chuva (Figura 5.9).

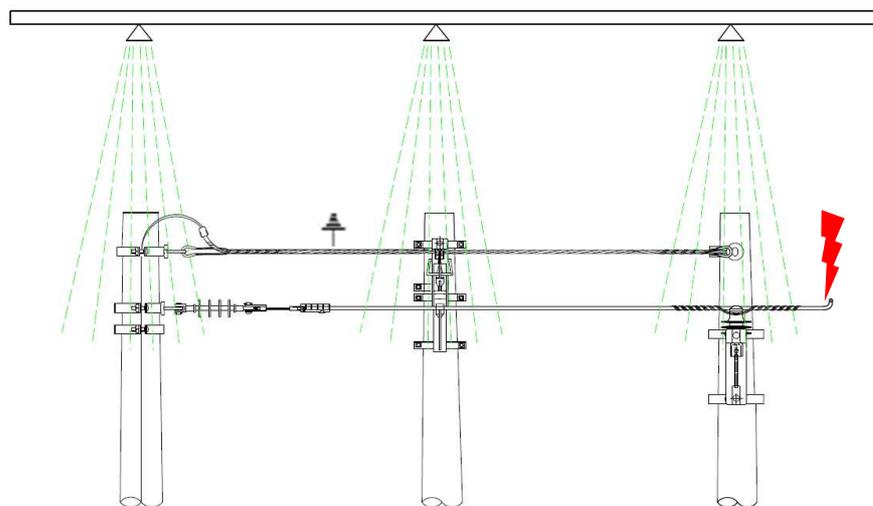


Figura 5.9 -Aplicação de impulso para verificação da suportabilidade a sobretensões, verificação em estruturas com isolador de ancoragem, com espaçador losangular e com isolador de pino polimérico, sob chuva. Figura adaptada da ND 2.9, CEMIG (2012).

Com a apuração dos resultados destes testes será possível identificar a “faixa” de suportabilidade da rede compacta frente a tensões provocadas por descargas atmosféricas. A conotação de faixa de suportabilidade se dá devido aos vários arranjos que são montados com os vários equipamentos da rede. Sendo assim espera-se que os valores apurados variem, cabendo à definição de limites superiores e inferiores de suportabilidade a sobretensões.

A montagem das estruturas propostas está em conformidade à norma nacional ABNT NBR 15992 (2012).

5.3 Ensaios Preliminares nas Estruturas de Rede Compacta

A realização de testes em laboratório é um passo fundamental para a verificação da suportabilidade elétrica das estruturas das redes compactas, principalmente pelo pequeno número de pesquisas relativas ao tema.

Neste contexto, são apresentados resultados de ensaios para a estimação da tensão de 50% (CFO – critical flashover overvoltage) de estruturas típicas de rede de distribuição compacta, considerando a utilização de cabos nus nas estruturas. Tal medida pode ser considerada representativa da condição na qual a cobertura isolante do cabo tenha sofrido

desgaste. Este tipo de análise representa uma condição conservadora para o sistema, pois despreza os efeitos relativos ao acúmulo de cargas na cobertura dielétrica do cabo, capaz de modificar o comportamento do arco elétrico no condutor e a possibilidade de ocorrência de descargas superficiais após a realização de cada ensaio (Nakamura, 1986). Este tipo de proposição vem de encontro à necessidade primeira de se ter um melhor controle das variáveis na aplicação dos testes, de modo a evitar a interpretação incorreta do fenômeno em estudo.

5.4 Descrição do Ensaio para Obtenção da Tensão de 50% - U50%

A tensão de 50% (U50%), também conhecida como CFO (*Critical Flashover overvoltage*) é definida como a amplitude da tensão de uma dada forma de onda que, sob condições específicas, provoca ruptura através do meio em teste, em 50% das aplicações de tensão (IEEE, 1997). De acordo com a norma brasileira ABNT IEC NBR 60600 (2013), este valor de tensão é estabelecido com base na aplicação mínima de 20 ondas impulsivas padronizadas 1,2/50 μ s, sob condições ambientais de referência.

Considerando uma distribuição normal de probabilidade, pode-se também obter a tensão suportável estatística (U10), também chamada Nível Básico de Isolamento (NBI) e a tensão de descarga disruptiva assegurada (U90), sendo U10 e U90 as tensões com as probabilidades de ruptura de 10% e 90%, respectivamente.

A aplicação das ondas impulsivas de formato dupla exponencial (1,2/50 μ s), conhecidas como “ondas padronizadas de impulso atmosférico” busca reproduzir os efeitos de sobretensões advindos das descargas atmosféricas nas redes (Kuffel, 2000). No entanto, vale ressaltar que as características reais das descargas atmosféricas possuem natureza aleatórias, o que permite afirmar que as ondas de corrente de descarga e, conseqüentemente, as ondas de tensão resultante por descarga direta ou indireta possam diferir bastante do formato de onda dupla exponencial. No entanto, uma das formas de representação do fenômeno natural em laboratório consiste na aplicação de ondas impulsivas para a avaliação da suportabilidade de materiais, equipamentos e sistemas.

A norma ABNT IEC NBR 60600 (2013) estabelece como condições ambientais referenciais para os ensaios a seco os seguintes parâmetros:

- Temperatura = 20° C;
- Pressão atmosférica $p = 1013 \text{ hPa}$ (1013 mbar)
- Umidade absoluta $h = 11 \text{ g/m}^3$

O procedimento de realização dos ensaios tem uma sequência que se inicia com a montagem das estruturas sendo finalizado com o cálculo do CFO. A seguir são apresentados os principais passos:

1. Montagem das estruturas: CE1, CE2 e CE3 de rede compacta.
2. Interligação do gerador à estrutura, através de cordoalhas.
3. Ajuste do gerador para os estágios de incremento de tensão: para os testes realizados foram utilizados três estágios com incremento de 100 kV cada.
4. Ajuste do gerador de impulsos com a forma de onda aplicada: nestes testes foram aplicadas ondas 1,2/50 μs , padronizadas.
5. Definição dos incrementos de tensão para obtenção da primeira disrupção: neste caso estabeleceu-se o valor de 10 kV. Após a ocorrência da 1ª disrupção, reduz-se em 3% o valor de tensão. Caso não haja disrupção, procede-se ao aumento em 3% do valor de pico da tensão até que ocorra disrupção. Esta sequência se repete no mínimo 20 vezes, conforme estabelecido na norma.
6. Após esta sequência de testes apura-se o valor de CFO ou U50%, que é a média dos valores de impulsos aplicados em 50% dos testes que geraram disrupção.

Para a definição dos parâmetros de CFO, NBI e tensão de ruptura assegurada é necessário fazer as correções das condições ambientais. Quando as condições encontradas em laboratório forem diferentes das estabelecidas como referência em norma, posteriormente à correção, efetua-se o cálculo da média dos valores apurados de tensão em 50% das disrupções, conforme norma ABNT IEC NBR 60600 (2013).

5.5 Estruturas de Rede Compacta Testadas

As redes aéreas de distribuição compactas instaladas pela CEMIG no estado de Minas Gerais representam aproximadamente 23% do total das redes de distribuição em áreas urbanas, representando em uma extensão de 8.600 km. Considerando um vão médio entre postes de 30 m, estima-se aproximadamente a existência de 280.000 estruturas dos mais variados tipos de topologias de redes compactas.

Além disso, é importante destacar que, entre os padrões das concessionárias e o padrão nacional, ABNT NBR 15688 (2012), identifica-se em média aproximadamente sessenta tipos de estruturas de rede compacta no Brasil. Como forma de exemplificar os tipos de estruturas a seguir seguem as topologias de aplicação:

- ✓ Estruturas básicas de ancoragem, passagem e passagem em ângulo.
- ✓ Estruturas conjugadas para derivações.
- ✓ Estruturas para instalações de equipamentos
- ✓ Estruturas de transições para outros tipos de rede.

Deve-se ainda considerar estruturas para redes trifásicas e monofásicas para todos os tipos de configurações citados anteriormente.

Especificamente em relação à CEMIG, a Norma de Distribuição ND 2.9 (2012) padroniza 57 configurações distintas de estruturas. Para evitar a realização de um número extenso de ensaios, três estruturas são identificadas como representativas da maior parte dos possíveis arranjos de estruturas de redes compactas, sendo elas as estruturas CE1, CE2 e CE3. A Figura 5.10 ilustra tais estruturas.

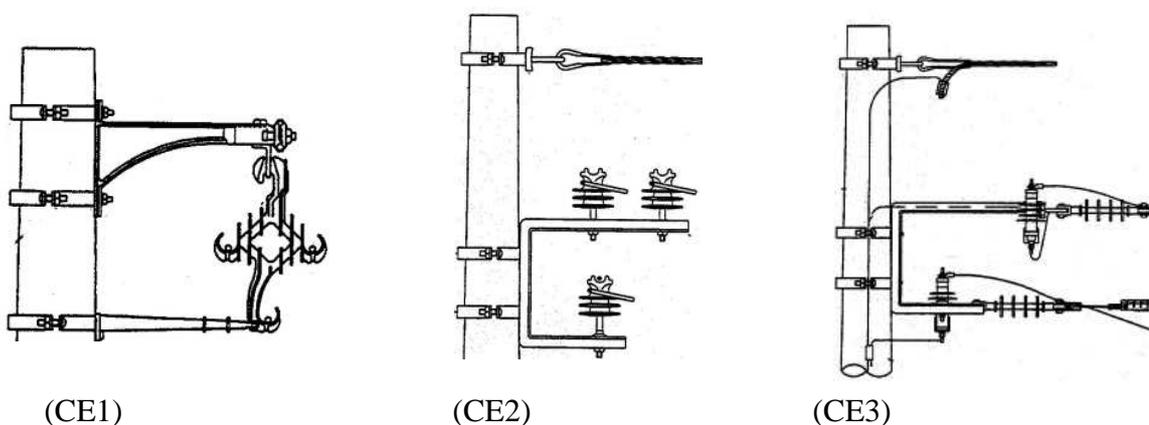


Figura 5.10 - Estruturas típicas de rede compacta que representam todos os tipos de arranjos.

A justificativa de que as estruturas CE1, CE2 e CE3 podem ser consideradas representativas de outros tipos de configurações se deve ao fato de a estrutura CE1 utilizar o espaçador losangular, enquanto as estruturas CE2 e CE3 utilizam os isoladores de pino polimérico e de ancoragem, respectivamente. Assim, todas os tipos de montagem de estruturas de rede compacta são derivados destes três tipos de estruturas. Complementando, verifica-se também que 88% das estruturas instaladas na CEMIG (2014) são do tipo CE1, CE2 e CE3, de um total aproximado de 442.533 estruturas, conforme indicado na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Quantitativo de estruturas CE1, CE2 e CE3 na CEMIG.

Quantidade Estruturas CE1	Quantidade Estruturas CE2	Quantidade Estruturas CE3	Outros tipos	Total Geral
167.887	140.267	86.965	47.414	442.533
41%	33%	14%	12%	100%

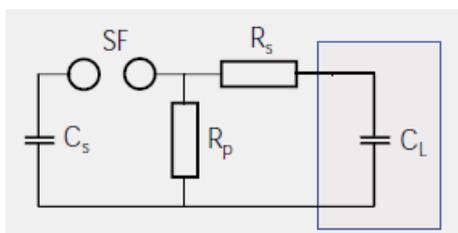
Os dados da Tabela 5.1 indicam que o quantitativo das três estruturas (CE1, CE2 e CE3) instaladas na CEMIG permite considerar e garantir a confiabilidade da representatividade dessas estruturas nas redes compactas. Desta forma, verifica-se que a maior parte das instalações corresponde às estruturas CE1 e CE2 que somadas totalizam aproximadamente 74% das estruturas totais instaladas de redes compactas na concessionária.

5.6 Configuração dos Equipamentos para Realização dos Ensaio

Os ensaios com tensão impulsiva foram realizados no laboratório de alta tensão do LRC/UFMG. Este laboratório é equipado com um gerador de impulsos de até 600 kV, um retificador, um divisor de tensão capacitivo, um controlador e um analisador de impulsos, todos da marca Haefely.

5.7 Gerador de Impulsos e Divisor de Tensão Capacitivo

O gerador de impulsos é o principal componente do sistema de teste de impulso. O modelo utilizado tem capacidade máxima de aplicar 600 kV de tensão em 6 estágios de 100 kV cada. A Figura 5.11 representa o circuito elétrico do gerador e permite o melhor entendimento de sua funcionalidade.



Cs = Capacitor de pulso
Sf = Centelhador
Rs = Resistor série
Rp = Resistor paralelo
Cl= Elemento em teste

Figura 5.11- Circuito elétrico do gerador de pulsos. Retirado do catálogo Haefely (2014).

O gerador de impulsos funciona a partir do carregamento do capacitor Cs através da tensão advinda do retificador. Após o carregamento do capacitor, o centelhador Sf é acionado, aplicando a tensão impulsiva no elemento de teste. Os resistores Rs e Rp são responsáveis pela configuração da forma de onda, no caso da pesquisa 1,2/50 μ s. O gerador para esta configuração de onda utiliza dois resistores para frente de onda e um para cauda. Os resistores

de frente de onda são: um interno de 12Ω e um externo de fita de 500Ω por estágio, já para cauda da onda é utilizado um resistor de 68Ω também por estágio.

A Figura 5.12 representa o modelo utilizado.

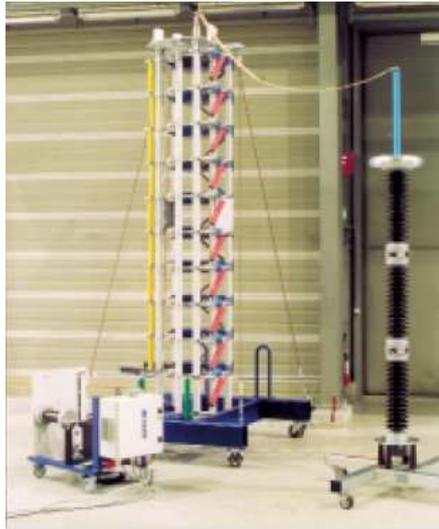


Figura 5.12- Figura representativa do gerador de impulsos utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Outro importante componente utilizado no sistema é o divisor de tensão capacitivo, responsável pela coleta de sinais para medição do impulso aplicado no objeto ou sistema em teste. Estes sinais que indicam valores integrais de pico, valores de cauda da onda aplicada e os instantes de chaveamento do pulso chegam ao controlador e analisador de pulsos. A Figura 5.13 apresenta o modelo utilizado nos testes.

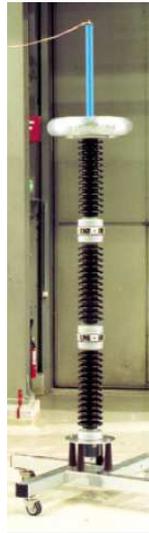


Figura 5.13- Figura representativa do divisor de tensão capacitivo utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

5.8 Retificador

O retificador de tensão é o componente responsável pelo carregamento dos capacitores do gerador de pulso. Sua alimentação é em tensão alternada. Geralmente, o retificador é instalado próximo ao gerador de pulsos. Sua ligação ao gerador é feita através de tubos de alumínio. A Figura 5.14 representa o retificador.



Figura 5.14- Figura representativa retificador utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

5.9 Controlador e Analisador de Impulsos

O controlador de pulso é o equipamento responsável pela configuração das tensões impulsivas a serem aplicadas nos testes. Nele são definidos os dados de valor de tensão, forma de onda e quantidade de pulsos a serem aplicados. Além disso, são disponíveis dispositivos de segurança para operação do sistema, dentre outros controles necessários à aplicação dos testes de pulso. Através de um sistema automatizado o controlador envia sinais a várias partes do sistema em teste. A Figura 5.15 ilustra o controlador de pulsos.



Figura 5.15- Figura representativa controlador de pulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

O analisador de impulsos (Figura 5.16) é encarregado de registrar todos os impulsos aplicados ao elemento de teste, permitindo também a visualização de detalhes importante como, por exemplo, o instante de interrupção na onda em um teste. Sua ligação ao sistema de controle é feita através de conexão ótica, o que permite o isolamento eletromagnético do sistema de controle e análise.



Figura 5.16- Figura representativa analisador de impulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

Na sequência, de forma representativa, são indicadas as partes do conjunto de equipamentos utilizados para realização dos ensaios, com objetivo de identificar os valores de CFO das estruturas de redes compacta. A Figura 5.17 apresenta o arranjo de montagem para teste.

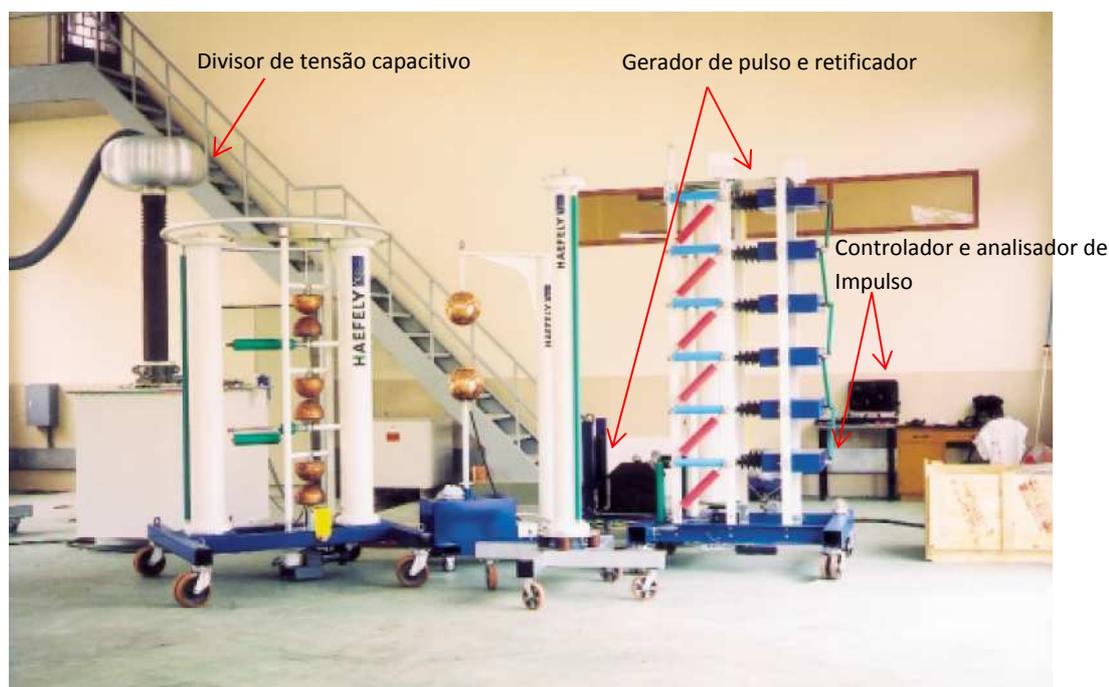


Figura 5.17- Figura representativa do sistema de testes de pulso utilizado na pesquisa. Retirado do catálogo Haefely (2014).

5.10 Resultados Obtidos

A realização dos testes, bem como a apuração dos resultados e os cálculos da tensão U_{50} , U_{10} e U_{90} , foram desenvolvidas seguindo a padronização de procedimentos indicados nas normas, de modo a garantir uma maior confiabilidade dos dados apurados. Primeiramente, foi feita a definição dos pontos de teste nas estruturas a serem ensaiadas (CE1, CE2 e CE3), conforme indicado na Figura 5.18 e Tabela 5.2.

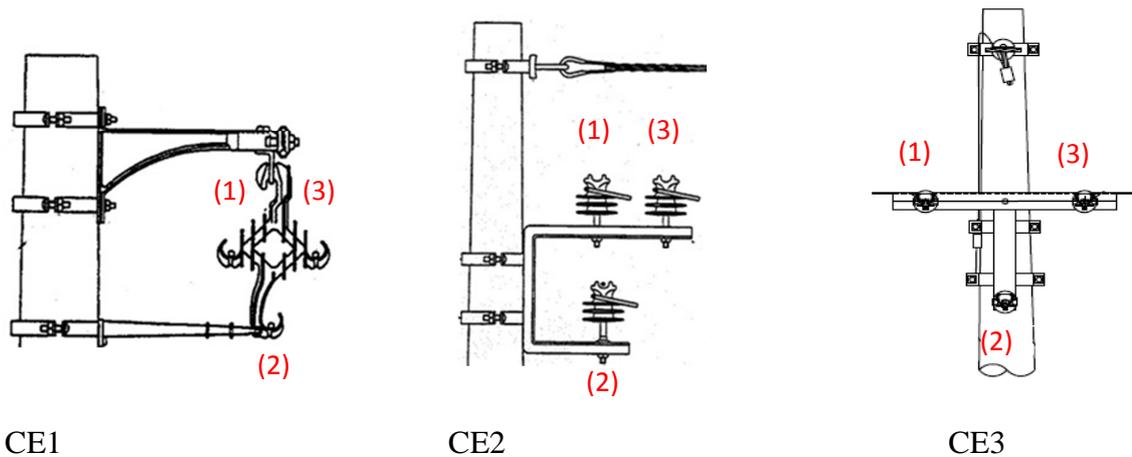


Figura 5.18- Identificação dos pontos em testes nas estruturas CE1, CE2 e CE. Adaptado da ND 2.9 (2012).

A Tabela 5.2 apresenta a identificação dos pontos por estrutura ensaiada.

Tabela 5.2 - Identificação dos pontos em testes nas estruturas CE1, CE2 e CE3.

Posições	CE1	CE2	CE3
1	Superior Interna (SI)	Superior Interna (SI)	Superior Interna (SI)
2	Inferior (I)	Inferior (I)	Inferior (I)
3	Superior Externa (SE)	Superior Externa (SE)	Superior Externa (SE)

Na sequência, os testes das estruturas já citadas foram feitos em cabo nu a fim de se evitar, nesta etapa, a influência da cobertura do cabo nos resultados. A Figura 5.19 ilustra a utilização do cabo nu nos testes.



Figura 5.19- Representação do uso do cabo nu para testes, estrutura CE1.

Posteriormente, todas as cintas de aço das estruturas testadas foram aterradas e os postes utilizados foram de concreto com altura de 2,50 m, conforme indicado na Figura 5.19.

Finalizando esta etapa, foram aplicados impulsos de tensão com onda padronizada $1,2/50\mu\text{s}$, de acordo com os procedimentos de ensaios da norma ABNT IEC NBR 60600 (2013).

Diante destas condições, foram realizados os testes e os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5, referentes respectivamente às estruturas CE1, CE2 e CE3 indicadas na sequência. Os valores em kV são indicados:

U_{50} – Este valor significa que em 50% dos testes na estrutura não houve disrupção.

U_{10} - Este valor significa que em 10% dos testes não houve disrupção.

U_{90} - Este valor significa que em 90% dos testes não houve disrupção.

5.11 Resultados da Estrutura CE1

A estrutura CE1, que é montada com um espaçador losangular fixado ao poste com suporte de aço, conforme indicado na Figura 5.20, é a mais utilizada na rede compacta.



Figura 5.20 - Estrutura CE1

Os resultados referentes a U_{50} , U_{10} e U_{90} obtidos na estrutura CE1, com uso de cabo nu, são apresentados na Tabela 5.3. Destes resultados nota-se uma grande variação dos valores de suportabilidade a sobretensões.

Tabela 5.3 – Tensões de 50% (U_{50}), 10% (U_{10}) e 90% (U_{90}) - Estrutura CE1.

Posições	CE1 - U_{50} (k V)	CE1 - U_{10} (k V)	CE1 - U_{90} (k V)
Superior Externa (SE)	140,9	137,8	143,9
Superior Interna (SI)	129,1	125,2	132,9
Inferior (I)	219,7	216,2	223,3

Na análise dos resultados dos testes da estrutura CE1, os seguintes pontos podem ser destacados:

- Os níveis de tensão obtidos dependem do posicionamento do condutor em relação aos pontos aterrados da estrutura ensaiada. Considerando os valores de U_{10} , U_{50} e U_{90} , verifica-se uma diferença em torno 9% dos níveis de suportabilidade entre as posições superior externa (SE) e superior interna (SI) da estrutura CE1. Tal condição se justifica pela menor distância dos pontos energizados às partes aterradas. A posição superior interna (SI) se situa a uma

distância de aproximadamente 16 cm das partes aterradas, já a posição superior externa esta a 18 cm das partes aterradas da estrutura.

- Ainda tratando da questão de posicionamento dos condutores fase em teste, observa-se que os níveis de tensão referentes às posições superior interna (SI) e superior externa (SE) são aproximadamente 35 a 40% inferiores aos níveis de tensão referentes à posição inferior (I). Este resultado se justifica pela maior distância do condutor na posição inferior do espaçador em relação às partes aterradas da estrutura.

5.12 Resultados da Estrutura CE2

A estrutura CE2 utiliza isoladores de pino instalados em um suporte de aço, conhecido como “braço C”, apresentando duas fases superiores e uma fase inferior, conforme apresentado na Figura 5.21.



Figura 5.21 - Estrutura CE2

A Tabela 5.4 apresenta os níveis de tensão de U_{50} , U_{10} e U_{90} referentes à estrutura CE2. Observa-se que as posições possuem níveis de suportabilidade semelhantes. Tal comportamento pode ser justificado pelo fato da distância entre a parte aterrada e os condutores posicionados sobre os isoladores ser aproximadamente a mesma nos três casos.

Tabela 5.4 - Tensões de 50% (U50), 10%(U10) e 90%(U90) - Estrutura CE2.

Posições	CE2 - U ₅₀ (k V)	CE2 - U ₁₀ (k V)	CE2 - U ₉₀ (k V)
Superior Externa (SE)	108,9	105,5	112,4
Superior Interna (SI)	107,8	105,1	110,5
Inferior (I)	107,0	104,5	109,5

Ainda sobre os resultados da estrutura CE2 pode-se destacar:

- A posição do isolador não é um aspecto divergente na definição dos níveis de suportabilidade a sobretensões. Este ponto torna a estrutura CE2 uma estrutura mais bem equilibrada do ponto de vista dos resultados de suportabilidade.
- Vale ressaltar que as disrupções ocorreram de forma diferente entre os isoladores superiores e o isolador inferior. No caso dos isoladores superiores, as disrupções ocorreram do topo do isolador para a base, enquanto que no caso do isolador inferior a disrupção ocorreu para parte superior do “braço C”, conforme indicado na Figura 5.22.

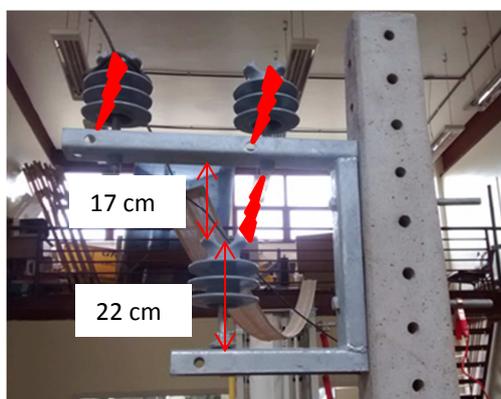


Figura 5.22 – Detalhe das disrupções na estrutura CE2

Sobre este detalhe, pode-se verificar que a distância entre o topo do isolador inferior e a ferragem superior é menor do que a distância em relação à base. As medidas encontradas são de 17 cm do topo do isolador inferior à ferragem superior e de 22 cm do topo do isolador à base. Tal fato pode ser um indicativo de que se a distância a partir do topo do isolador

fosse maior em relação à ferragem superior, os valores de suportabilidade a sobretensões poderiam ser mais elevados, conforme indicação na Figura 5.22.

5.13 Resultados da Estrutura CE3

A Figura 5.23 ilustra a estrutura CE3, que é basicamente formada por três isoladores de ancoragem fixos em uma ferragem composta por um “braço C” e uma cantoneira reta.



Figura 5.23 - Estrutura CE3

A Tabela 5.5 apresenta os níveis de tensão de U_{50} , U_{10} e U_{90} referentes à estrutura CE3.

Tabela 5.5 - Tensões de 50% (U_{50}), 10% (U_{10}) e 90% (U_{90}) - Estrutura CE3.

Posições	CE3 - U_{50} (k V)	CE3 - U_{10} (k V)	CE3 - U_{90} (k V)
Superior Esquerda (SE)	157,1	152,1	162,1
Superior Direita (SI)	154,2	150,2	158,3
Inferior (I)	144,1	138,9	149,4

De forma geral os resultados obtidos demonstram que a estrutura apresenta valores de suportabilidade diferenciados nas posições superiores e inferior, indicando que a topologia da estrutura possui menor suportabilidade à sobretensões na posição inferior.

Na análise dos resultados da estrutura CE3 pode-se observar em destaque:

- Existe uma influência representativa dos resultados de suportabilidade a sobretensões dos condutores instalados nas posições superiores em comparação aos resultados da posição inferior, sendo esta diferença aproximadamente 9% menor para posição inferior.
- Os resultados entre os isoladores de ancoragem superiores na posição direita e esquerda são bastante aproximados o que indica o equilíbrio entre estas posições.

5.14 Análises Conjuntas das Estruturas CE1, CE2 e CE3

De forma geral, conforme indicado nas análises anteriores, a comparação entre os valores de CFO (U_{50}) e NBI (U_{10}) das estruturas CE1, CE2 e CE3 indica uma diferença de aproximadamente 4%, sendo menor o valor de NBI. Este dado permite entender que em determinados estudos de desempenho de redes de distribuição, pode-se utilizar um ou outro índice de suportabilidade a sobretensões (CFO ou NBI).

Além disso, a comparação dos resultados de CFO U_{50} e tensão de ruptura assegurada U_{90} das estruturas CE1, CE2 e CE3, indicou que, em média, os valores de U_{90} são 7% maiores do que os valores de CFO.

A Tabela 5.6 indica os valores médios de suportabilidade das estruturas CE1, CE2 e CE3. Já a Tabela 5.6 indica os valores mínimos (e portanto, críticos) de tensão de 50% para cada uma das estruturas ensaiadas.

Tabela 5.6 - Valores médios em kV, comparativo entre estruturas CE1, CE2 e CE3

Valores Médios	CE1	CE2	CE3
U₁₀ (kV)	159,7	105,0	147,1
U₅₀(kV)	163,2	107,9	151,8
U₉₀ (kV)	166,7	110,8	156,6

Tabela 5.7 - Valores mínimos em kV, comparativo entre estruturas CE1, CE2 e CE3

Valores Médios	CE1	CE2	CE3
U₁₀ (kV)	125,2	104,5	138,9
U₅₀(kV)	129,1	107,0	144,1
U₉₀ (kV)	132,9	109,5	149,4

Para que sejam propostas melhorias nas estruturas objetivando a obtenção de maiores níveis de suportabilidade a sobretensões, deve-se identificar a estrutura com os menores valores apurados nos testes. Com base nos resultados das Tabelas 5.6 e 5.7 observa-se a estrutura CE2 como sendo a estrutura crítica para o sistema. A comparação com os níveis de suportabilidade das estruturas CE1 e CE3 indica que, em média, a tensão de 50% da estrutura CE2 é aproximadamente 33% e 28% menor, respectivamente.

Neste contexto de estudo, verificou-se na estrutura CE2 a existência de possíveis fatores que possam justificar os valores inferiores de suportabilidade aferidos:

- As disrupções na posição inferior (I) ocorrem para parte superior do suporte braço C, já indicado na Figura 5.24.
- A possível interferência na suportabilidade do formato em calha do braço C, onde são instalados os isoladores de pino superiores, o que é indicado na Figura 5.24.



Figura 5.24 – Detalhe da calha do suporte braço C da estrutura CE2

A Figura 5.24 possibilita verificar ainda que, na instalação dos isoladores de pino superiores no braço C, ocorre uma possível redução de distância elétrica dos isoladores às partes aterradas. Diante deste fato, entendeu-se que seria necessário testar o efeito da calha do braço C nos resultados. Inicialmente foram realizados ensaios com a estrutura monofásica CM2, utilizada em redes monofásicas, apresentada na Figura 5.25. Observa-se que nesta estrutura o isolador de pino é instalado sobre o braço L que não possui calha como o braço C.



Figura 5.25 - Estrutura CM2

Os resultados apurados na estrutura CM2 estão indicados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Tensões U₅₀, U₁₀ e U₉₀, estrutura CM2

Posições	CEM2 - U ₅₀ (k V)	CEM2 - U ₁₀ (k V)	CEM2 - U ₉₀ (k V)
Superior	129,9	126,3	133,5

Os valores de suportabilidade a sobretensões da estrutura CM2 superaram em aproximadamente 22% os níveis de tensão referentes aos isoladores superiores da estrutura CE2.

Estes resultados indicaram a necessidade de se testar a estrutura CE2 com as alterações físicas destacadas na Figura 5.26, para confirmação da hipótese de melhoria de desempenho apresentada anteriormente.

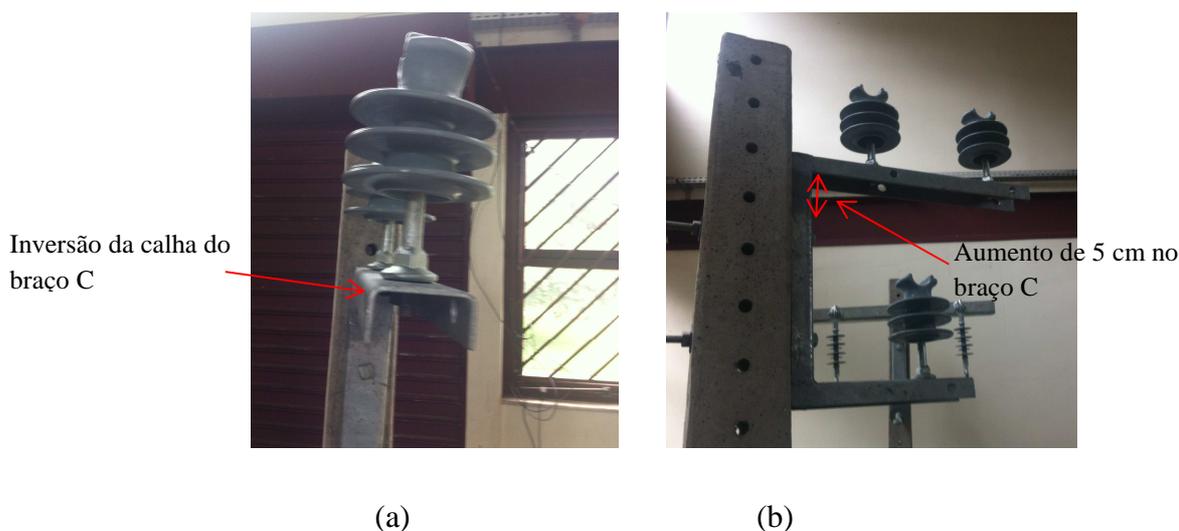


Figura 5.26 – Alterações na estrutura CE2 para melhoria de suportabilidade a sobretensões

As alterações feitas na CE2 foram:

- A inversão da calha do braço C na parte superior do suporte indicado na Figura 5.26 (a), conforme indicativo de melhoria apurado na estrutura CM2.
- Aumento de 5 cm na distância do isolador inferior, para evitar a disrupção para a parte superior do braço C e possivelmente aumentar o nível de suportabilidade a sobretensões nesta posição, indicado na Figura 5.26 (b).

Diante destas alterações, a estrutura foi denominada CE2-m (Estrutura CE2 modificada).

Após estas modificações foram feitos testes de suportabilidade na estrutura CE2-m e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Tensões de 50% (U₅₀), 10%(U₁₀) e 90%(U₉₀), estrutura C2-m

Posições	CE2-m U ₅₀ (k V)	CE2-m U ₁₀ (k V)	CE2-m U ₉₀ (k V)
Superior Esquerda (SE)	126,0	122,7	129,3
Superior Direita (SI)	125,8	122,3	129,3
Inferior (I)	135,8	131,4	138,6

A Tabela 5.10 apresenta a comparação entre as suportabilidades aferidas para as estruturas CE2 e CE2-m.

Tabela 5.10 - Tensões U₅₀, U₁₀ e U₉₀, estruturas CE2 e C2-m, comparação de ganhos.

Posições	U ₅₀ (k V)			U ₁₀ (k V)			U ₉₀ (k V)		
	CE2	CE2-m	Ganho (%)	CE2	CE2-m	Ganho (%)	CE2	CE2-m	Ganho (%)
(SE)	108,9	126,0	16%	105,5	122,7	16%	112,4	129,3	15%
(SI)	107,8	125,8	17%	105,1	122,3	16%	110,5	129,3	17%
(I)	107,0	135,8	27%	104,5	131,4	26%	109,5	138,6	27%

Conforme se pode observar, os resultados de suportabilidade a sobretensões na estrutura CE2 modificada (CE2-m) se mostraram superiores aos obtidos para a CE2 padrão. A melhoria chegou a 20%, comparando valores médios de CFO da estrutura CE2, de 107,9 kV, com valores médios da estrutura CE2-m, de 129,3 kV. Outra comparação de ganho se refere ao aumento nos valores mínimos de suportabilidade de 104,5 kV para 122,3 kV, acréscimo de aproximadamente 16% na estrutura CE2-m em relação a CE2 original. Ainda foi possível verificar que as disrupções no isolador inferior ocorreram para a base do suporte braço C neste novo tipo de estrutura.

Com estas constatações, conclui-se que a realização de pequenas alterações nas estruturas pode elevar os níveis de suportabilidade a sobretensões da rede, promovendo um melhor desempenho do sistema.

5.15 Comentários Finais

Com base nos resultados dos testes realizados, verificou-se que as estruturas CE1, CE2, CE3 e CE2-m ensaiadas com condutores nus possuem valores médios de CFO (U_{50}) entre aproximadamente 108 kV e 163 kV, NBI (U_{10}) entre 105 kV e 159,7 kV, e tensão de descarga disruptiva assegurada (U_{90}) entre 110,8 kV a 166,7 kV. Além disso, vale destacar que a experiência de alterações na configuração física da estrutura CE2 apresentou ganhos bastante representativos em termos dos níveis de suportabilidade a sobretensões impulsivas.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 Conclusões

Esta dissertação de mestrado apresentou uma contribuição ao estudo do desempenho de redes de distribuição compactas frente a sobretensões impulsivas, tipicamente aquelas associadas às descargas atmosféricas. Tal contribuição se justifica por dois fatores básicos. O primeiro deles está relacionado à forte expansão que este tipo de rede vem tendo no Brasil nos últimos anos, principalmente devido ao seu melhor desempenho no fornecimento de energia em relação às redes de distribuição convencionais. O segundo fator está associado a falta de trabalhos na literatura técnica dedicados à definição de parâmetros elétricos de desempenho das estruturas das redes de distribuição compactas frente a solicitações impulsivas.

No presente trabalho foi apresentado o histórico das aplicações da rede compacta no Brasil e no mundo, com destaque para o desenvolvimento da análise de desempenho deste tipo de rede com base em dados apurados de concessionárias brasileiras e americanas. Os resultados obtidos indicaram o desempenho muito superior desse tipo de rede em comparação ao desempenho das redes convencionais.

Também foram pesquisados estudos relativos ao comportamento dos cabos cobertos frente a sobretensões impulsivas. Os poucos estudos apresentados na literatura indicam a diferença de comportamento do arco elétrico neste tipo de cabo em relação ao cabo nu. Tal diferença pode justificar o registro de ocorrências de ruptura de condutores cobertos nas redes compactas sem uma causa definida.

Na sequência, foram propostos ensaios a serem aplicados às estruturas típicas de redes de distribuição compacta no padrão brasileiro, tendo como base as estruturas CE1, CE2 e CE3 da CEMIG (ND 2.9, 2012) e a norma ABNT NBR 15992 (2012).

Os resultados dos testes mostraram que as estruturas ensaiadas possuem valor médio de tensão de 50% U_{50} entre aproximadamente 108 kV e 163 kV, sendo o valor mínimo de 125,2, 104,5, 138,9 kV para as estruturas CE1, CE2 e CE3, respectivamente. Tais valores dão uma ideia quantitativa do comportamento de tais estruturas frente à sobretensões impulsivas na situação crítica de condutores nus, que pode representar, por exemplo, o comportamento do sistema na condição de desgaste da cobertura de material isolante.

Os resultados proporcionaram o estudo e o desenvolvimento de uma proposta de modificação na estrutura CE2 para que fosse obtida melhora de sua tensão de 50%. O simples aumento de 5 cm na distância entre o isolador inferior e o suporte superior do braço C e a inversão da calha superior do braço C proporcionaram uma melhoria no CFO na ordem de 20%. Tal desenvolvimento é um indicativo de que uma investigação detalhada das características das estruturas pode promover ganhos ainda mais relevantes.

6.2 Propostas de Continuidade

Como proposta de continuidade aos desenvolvimentos desta dissertação, sugere-se a realização de pesquisa para:

- Definição do impacto que o acúmulo de cargas nos cabos cobertos frente a tensões impulsivas pode causar nos parâmetros elétricos de desempenho das estruturas de rede compacta;
- Apuração dos níveis de suportabilidade a sobretensões impulsivas das estruturas de rede compacta (CE1, CE2 e CE3) utilizando o cabo coberto.
- Proposição de melhorias em estruturas de redes compactas padronizadas no Brasil, do ponto de vista de suportabilidade a sobretensões impulsivas.
- Estimativa dos possíveis valores críticos de tensões induzidas nas redes de distribuição compactas, advindas de correntes típicas de descargas atmosféricas, e comparação com os valores de tensão de 50% (U_{50}) das estruturas de redes compactas para definição da relevância desse fenômeno para o desempenho da rede.

7 Referências Bibliográficas

ABNT NBR 10296-1988, “Material Isolante Elétrico – Avaliação de sua Resistência ao Trilhamento Elétrico a Erosão sob Severas Condições Ambientais – Método de Ensaio”, 1988.

ABNT NBR 11873-2011, “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”, 2011.

ABNT NBR 15688-2012, “Redes de Distribuição Aérea de Energia Elétrica com Condutores Nus”, 2012.

ABNT NBR 15992-2012, “Redes de Distribuição Aérea de Energia Elétrica com Cabos Cobertos em Espaçadores para Tensões até 36,2 kV”, 2012.

ABNT NBR 16094-2012, “Acessórios Poliméricos para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica - Especificação”, 2012.

ABNT NBR 16095-2012, “Acessórios Poliméricos para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica – Padronização”, 2012.

ABNT NBR 6936-1992, “Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão”, 1992.

ABNT NBR IEC 60060-1-2013, “Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão”, 2013.

ABRADEE, “Relatório de Desempenho do Sistema Elétrico Brasileiro”, 2012.

CEMIG – ED 3.40 “Viabilidade Econômica das Redes de Distribuição Protegidas”
Dezembro, 1988.

- CEMIG – ND 2.9 “**Instalações Básicas das Redes de Distribuição Compactas**” Dezembro 2012.
- CEMIG, “**Relatório Apuração do Quantitativo de Estruturas das Redes Compactas**”, Novembro, 2014.
- CEMIG, “**Relatório de Monitoramento do desempenho das redes compactas**”, 2013.
- CEMIG, “**Relatório de Monitoramento dos Indicadores de Desempenho DEC e FEC no Sistema Elétrico**”, 2012.
- CEMIG, ET 379 “**Especificação Técnica de Cabos Cobertos de 15, 25 e 35 kV**”, 2014.
- CEMIG, ET 669 “**Especificação Técnica de Acessórios para Redes Compactas**”, 2002.
- COPEL – NTC 855 “**Montagem de Redes de Distribuição Compacta Protegida**” Fevereiro, 2010.
- GILL, J. G., STYS, R. D., SEELY, R. U., “**Impulse Characteristics of Aerial Spacer Cable**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-86, no. 3 Março, 1967.
- HAEFELY HIGH VOLTAGE TEST, “**Catalogo de Equipamentos para Testes**”, Novembro, 2014.
- HE, J., GU, S., CHEN, S., ZENG, R., CHEN W. “**Discussion on Measures Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines**” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 2, Abril, 2008.
- HENDRIX CO, “**Apresentação da Tecnologia Aplicada na Spacer Cable, feita em Mildford EUA, Hendrix**”, Março, 2014.
- HENDRIX CO, “**Catalogo de Produtos para Redes Compactas**” Março, 2014.
- JUNIOR, M. D. R. T., “**Livro: Cabos de Energia**”, edição 1, 2004, Editora Artliber
- KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., KUFFEL, J., “**High Voltage Engineering – Fundamentals**, 2000, Editora Elsevier Science.
- LEE, R. E., FRITZ, D. E., STILLER, P. H., SHANKLE, D. F., “**Prevention of covered conductor burndown on distribution circuits - arcing protection devices**”, IEEE Trans. Power App. and Systems, Vol. PAS-101, no. 8, Agosto, 1982.
- NAKAMURA, K., MCKENNY, P.J., ADAMS, M.S.A.A. G., FERNANDES, RUSHDEN, R. F., “**Impulse Breakdown Characteristics of 13.2 kv Coveredconductor Insulator/Tie**

Configurations” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, Outubro, 1986.

PLP BRASIL, “**Catalogo de Produtos para Redes Compactas**”, 2014.

POWELL, R. W., THWAITES, H. L., STYS, R. D., “**Estimating Lightning Performance of Spacer-Cable Systems**”, IEEE Winter Power Meeting, New York, N. Y.,; 31-Fevereiro, 1965.

POWELL, R. W., THWAITES, STYS, H. L., R. D., “**Estimating Lightning Performance of Spacer-Cable Systems**” Powell, et al.-Lightning Performance of Spacer-Cable System Abril, 1965.

ROCHA, R. C. C., BERRÊDO, R. C., BERNIS, R. A. O., GOMES, E. M., NISHIMURA, F., CICARELLI, L. D., AND SOARES, M. R., “**New Technologies, Standards, and Maintenance Methods in Spacer Cable Systems**”, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 17, no. 2, p. 562-568, Abril, 2002.

SALES, M. L. B., CASTRO, P. M., “Viabilidade econômica de redes de distribuição protegidas “**Revista – Sociedade Brasileira de Arborização**”, volume 2, número 1, 8 páginas, Março, 2007.

SEGATTO A. G., “**Estudo e Projeto de Rede Elétrica Compacta Protegida**”, Monografia de conclusão de curso da UFES Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

SHEA, J.R., “**Developments in the Manufacture of Lead Covered Paper Insulated Telephone Cable**” Published in abridged in Mech. Engg, Abril, 1931.

WAREING, J. B., “**Covered Conductor Systems for Distribution**” Report No: 5925 Project No: 70580 Dezembro, 2005.