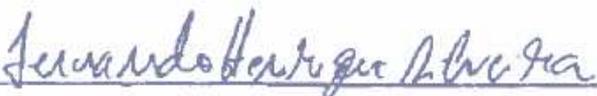


**INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO BLINDADAS (RDI) QUE UTILIZAM
EQUIPAMENTOS NÃO BLINDADOS**

WILLIAM ALVES DE SOUZA

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, ênfase em Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em 16 de julho de 2012



Fernando Henrique Silveira - Dr.

Supervisor



Silvério Visacro Filho - Dr.

Coordenador do CESEP

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	2
2. CONFIGURAÇÕES DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO	3
2.1 INTRODUÇÃO.....	3
2.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO CONVENCIONAL	4
2.3 REDE DE DISTRIBUIÇÃO COMPACTA.....	9
2.4 REDE DE DISTRIBUIÇÃO ISOLADA.....	14
3. ESTRUTURAS DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA ISOLADA	17
3.1 INTRODUÇÃO ÀS REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS ISOLADAS	17
3.2 ESTRUTURAS PASSANTES.....	19
3.3 ESTRUTURAS DE ANCORAGEM	20
3.4 ESTRUTURAS COM INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	21
4. ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS ISOLADAS (RDI) COM USO DE EQUIPAMENTOS NÃO BLINDADOS.....	22
4.1 INTRODUÇÃO ÀS ANÁLISES DE SOBRETENSÕES.....	22
4.2 CONCEITOS SOBRE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS CAUSADAS POR DESCARGAS PRÓXIMAS.	23
4.3 CONFIGURAÇÃO DA ESTRUTURA DE REDE ISOLADA COM INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTO NÃO BLINDADO.....	26
4.4 ANÁLISE DE SOBRETENSÕES NA ESTRUTURAS DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA ISOLADA.....	27
5. CONCLUSÕES	33
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

RESUMO

As necessidades atuais do sistema elétrico estão associadas a requisitos de maior confiabilidade, segurança e desempenho do sistema. Nesse contexto, a aplicação de redes de distribuição isoladas nas áreas densamente urbanizadas vem se tornando cada vez mais comum.

Nesta nova demanda, uma barreira tecnológica importante a ser transposta se refere à utilização de equipamentos não blindados no sistema de redes isoladas de media tensão, para permitir manobras e desenergização do sistema para intervenção em casos de manutenção. Deste modo é importante se avaliar as interferências eletromagnéticas por descargas atmosféricas em redes de distribuição blindadas que utilizam equipamentos não blindados, especificamente a chave seccionadora unipolar, levando em consideração essas sobretensões que podem provocar rupturas de isolamentos nos equipamentos e conseqüentemente desligamento acidental do sistema elétrico.

A metodologia do trabalho se baseou na revisão das configurações de interesse de redes de média tensão e o estudo dos resultados de tensões induzidas apresentados nos trabalhos [Silveira, 2006, Silveira, 2007 e Silveira 2010]. Com base nessa pesquisa, buscou-se traçar análises de sensibilidade com foco no problema investigado.

Conclusivamente os resultados permitem a sensibilização para tomada de medidas de proteção contra sobretensões nas estruturas não blindadas. Este trabalho associa os conceitos e resultados de pesquisas à aplicação em sistemas ainda pouco estudados.

ABSTRACT

The current needs of the electrical system requirements are associated with greater reliability, security and system performance. In this context, the application of isolated distribution networks in densely urbanized areas is becoming increasingly common.

In this new demand, an important barrier technology to be overcome concerning the use of unshielded system isolated in medium voltage to enable maneuvering and de-energizing system for intervention in case of maintenance. Thus it is important to evaluate the electromagnetic interference by lightning armored distribution networks that use unshielded equipment, specifically the disconnect switch single phase, taking into account these surges that can cause breaks in the insulation equipment and therefore accidental shutdown of the electrical system.

The methodology of work was based on review of the configurations of interest in medium voltage networks and the study of induced stress results presented in papers [Silveira 2006, Silveira, Silveira 2007 and 2010]. Based on this research, we attempted to trace sensitivity analyzes focused on the problem investigated.

Conclusively the results allow the awareness to take measures to protect against surges on unshielded structures. This paper links the concepts and research findings for application in systems still poorly studied.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Rede do tipo convencional

Figura 2.2 – Rede de distribuição convencional com equipamento de transformação

Figura 2.3 – Rede de distribuição convencional com equipamento de proteção

Figura 2.4 – Para raio polimérico

Figura 2.5 – Espaçador losangular

Figura 2.6 – Trecho de rede compacta, estrutura de ancoragem

Figura 2.7 – Fenômeno de deteriorização do condutor coberto

Figura 2.8 – Modelos de espaçadores utilizados em redes compactas

Figura 2.9 – Detalhes construtivos do condutor isolado de media tensão

Figura 2.10 – Detalhes do comportamento do campo elétrico nos condutores isolados

Figura 2.11 – Estrutura de rede de distribuição isolada com transformador

Figura 2.12 – Detalhes ancoragem da rede de distribuição isolada

Figura 3.1 – Detalhes construtivos de emenda de condutor isolado de media tensão

Figura 3.2 – Estrutura passante de rede de distribuição isolada.

Figura 3.3 – Estrutura de ancoragem de rede de distribuição isolada

Figura 3.4 – Estrutura com instalação de equipamento de rede de distribuição isolada

Figura 4.1 – Ilustração do fenômeno de tensão induzida em rede de distribuição

Figura 4.2 – Demonstração tridimensional dos campos eletromagnéticos

Figura 4.3 – Ilustração dos efeitos dos campos eletromagnéticos por advindos de uma descarga atmosférica.

Figura 4.4 – Chave seccionadora unipolar de media tensão

Figura 4.5 – Detalhamento da estrutura não blindada

Figura 4.6 – Rede de baixa tensão, configuração simulada.

Figura 4.7 – Comportamento dos valores de tensão induzida na presença do condutor neutro.

Figura 4.8 – Análise dos valores de tensão induzida diante pontos de aterramento.

Figura 4.9 – Comportamento dos valores de tensão induzida perante valores de resistência de aterramento.

Figura 4.10 – Redes de baixa tensão convencionais e multiplexada.

Figura 4.11 – Valores de tensões induzida nas redes convencionais e isoladas multiplexadas

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estruturas de rede de distribuição convencional

Tabela 2.2 – Estruturas de rede de compacta

Tabela 2.3 – Estruturas de rede de compacta, estruturas de ancoragem, equipamentos

Tabela 3.1 – Estruturas de rede de isolada

Tabela 4.1 – Equações de Maxwell

Tabela 4.2 – Comportamento dos valores de tensão induzidas com variação das resistências do solo e comprimento dos vãos.

Tabela 4.3 – Valores de Corrente de primeira descarga típicas medidas no Morro do Cacimbo, comparado aos possíveis níveis de tensões induzidas .

1 Introdução

1.1 Relevância e Contexto da Investigação

As concessionárias de energia elétrica sempre dispensaram especial atenção à verificação da suportabilidade dos materiais isolantes frente às solicitações elétricas a que estão sujeitos em suas aplicações normais. Com o objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema elétrico, o conceito de rede isolada vem sendo aplicado nas denominadas redes subterrâneas e com pouco volume de uso nas redes isoladas aéreas (RDI). No entanto, diante do alto custo das redes subterrâneas e a evolução dos materiais e equipamentos, o setor elétrico vem estudando a viabilidade de utilizar uma rede isolada aérea de distribuição, que atenda os critérios de segurança, resulte em menor agressão ao meio ambiente e em custos de aplicação e manutenção menores, além de tornar o sistema elétrico mais confiável.

Diante a nova demanda estão sendo desenvolvidos novos padrões de rede de distribuição aérea isolada que atendam os requisitos citados acima. Esta nova tecnologia vem sendo estudada e algumas barreiras tecnológicas ainda precisam ser transpostas, tais como a utilização de equipamentos de manobra e proteção não blindados para redes aéreas de modo permitir o desligamento e a desenergização do sistema para intervenção nas estruturas para manutenção e expansão.

Perante o desafio tecnológico dos equipamentos de manobra e proteção, foram desenvolvidas novas estruturas com adaptação de equipamentos não blindados às estruturas da Rede de distribuição aéreas isoladas, no entanto estes equipamentos não blindados deverão ser avaliados diante a interferências eletromagnéticas, provocadas na maioria das vezes por descargas atmosféricas, o qual será objeto desta monografia.

Este trabalho irá investigar preliminarmente o uso de chave tipo seccionadora unipolar, onde a rede de distribuição aérea isolada está blindada pelos condutores e terminações isoladas e em algum pontos serão instalados equipamentos não blindados.

1.2 Objetivo e Metodologia de Desenvolvimento

O objetivo desta monografia é apresentar padrões de redes de distribuição aéreas, suas características construtivas de cada modalidade, as aplicações mais comuns no setor elétrico, as estruturas básicas das RDI (Rede de Distribuição aéreas Isolada) e os desafios tecnológicos às novas exigências de aplicação deste novo modelo de rede de distribuição. Constituirá também este trabalho abordagem às questões com enfoque nos aspectos mais diretamente vinculados às tensões induzidas nos equipamentos não blindados das RDI em decorrência da incidência de descargas nas proximidades da rede.

1.3 Organização do Texto

Nesta monografia, procurou-se abordar assuntos técnicos de bastante importância prática por se tratar do cotidiano das concessionárias de energia elétrica. Este trabalho possibilitará sanar dúvidas às aplicações de novas tecnologias em redes de distribuição aéreas isoladas. Desta forma, buscou-se a apresentação de um texto conciso, dedicado objetivamente aos desenvolvimentos e resultados da investigação específica em foco.

Nesta perspectiva, o texto desta monografia foi distribuído em 6 capítulos, incluindo a presente Introdução.

No Capítulo 2 é realizada uma caracterização sucinta das redes de distribuição de média tensão típicas no Brasil, destacando as configurações básicas existentes.

O Capítulo 3 apresenta de forma mais detalhada as configurações das redes de distribuição aéreas isoladas, destacando as estruturas e os equipamentos de manobra e proteção, assim como a importância relativa de sua aplicação no sistema elétrico.

O Capítulo 4 apresenta as análises e os resultados das diversas avaliações realizadas. Através de análises de sensibilidade, relacionando os níveis das sobretensões resultantes das tensões induzidas e comentários sobre propagação dos surtos atmosféricos nos elementos constituintes das redes de média tensão.

No Capítulo 5 são elaboradas as conclusões finais desta monografia, decorrentes das avaliações realizadas.

O Capítulo 6 apresenta as Referências Bibliográficas utilizadas..

2 CONFIGURAÇÕES DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as principais configurações de rede de média tensão utilizadas largamente no setor elétrico, objetivando melhor compreensão do tema da monografia.

As denominadas redes de média tensão compreendem os trechos entre a subestação de distribuição e o transformador de distribuição. A instalação das redes de média tensão adotam, na maioria dos casos, uma configuração radial, havendo porém a possibilidade de transferência de cargas de um alimentador para outro, através do uso de chaves seccionadoras em pontos estratégicos do sistema. Este procedimento é adotado no caso de falhas que comprometam o fornecimento de energia em alguma região, ou no caso da necessidade de manutenção preventiva do sistema em consideração. Entretanto, não é usual a operação de um alimentador em anel, existindo apenas a possibilidade de remanejamento de fornecimento de energia entre alimentadores próximos.

A rede de média tensão da CEMIG possui tensão nominal de 13.8kV/7.97kV ($\square 10\%$), fase-fase e fase neutro, respectivamente, em grande parte do estado, existindo um pequeno trecho em Juiz de Fora que utiliza tensão nominal de 22.0 kV/12.7 kV ($\square 10\%$).

O sistema possui neutro contínuo, multi-aterrado e interligado à malha de terra das subestações. Todo equipamento deve ter sua carcaça aterrada e conectada ao neutro.

Há três configurações básicas de redes de média tensão, a saber:

- **Redes Convencionais:** Utilização de condutores nus, dispostos horizontalmente em cruzetas na distribuição trifásica, e verticalmente junto aos postes em redes monofásicas;
- **Redes Protegidas:** Cabos com cobertura de baixo isolamento, sem utilização de cruzetas. Nesta configuração um cabo de aço mensageiro sustenta um espaçador de formato de losango, que por sua vez sustenta os demais cabos da rede;
- **Redes Isoladas:** Cabos isolados, entrelaçados em torno de um cabo de aço mensageiro.

Em todas as configurações o neutro acompanha a rede, sendo contínuo, multi-aterrado e conectado à malha de terra da subestação.

De um total de 30.148 km do sistema CEMIG de rede primária urbana instalada, aproximadamente 90% corresponde a redes convencionais e 10% a redes protegidas. A participação das redes isoladas aéreas é muito pequena, sendo sua instalação realizada em condições muito específicas, dentre as quais podem-se citar a demanda por uma maior confiabilidade do fornecimento de energia pelos consumidores, ou a não permissão, por exemplo, da realização de poda nas árvores vizinhas à rede.

Em redes rurais, a quase totalidade das instalações é do tipo convencional. O padrão mínimo atual para a instalação de novas redes urbanas corresponde à configuração protegida, enquanto as redes rurais permanecem utilizando o padrão de rede convencional.

2.2 Rede de Distribuição Convencional

As redes de distribuição convencionais possuem o menor grau de confiabilidade, pois não há nenhuma proteção contra toques aos condutores, já que todos os condutores são nus. Em caso de toques de uma árvore por exemplo, o nível da corrente de curto circuito é alto, fazendo com que a proteção opere. Além disso, acidentes podem ocorrer neste tipo de rede, pois no caso de contato ocorrerá um choque com uma diferença de potencial de 13,8 kV em caso de fase-fase ou 7,97 kV fase-terra (mais comum). A Figura 2.1 apresenta uma rede do tipo convencional típica da CEMIG.



Figura 2.1 – Rede do tipo convencional

O modelo mais básico de redes de distribuição convencional é a forma de um “N”, cujos materiais básicos são os postes, cruzetas e isoladores, utilizados tanto para ancoragem como para

passagem. Estas condições serão apresentadas detalhadamente nas estruturas específicas desta modalidade de rede, como exemplo ilustrado na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Rede de distribuição convencional com equipamento de transformação

Os equipamentos de proteção para curto-circuito e sobrecorrente são as chaves fusíveis com elo de expulsão e os religadores automáticos, cuja finalidade é de permitir o religamento da rede convencional, caso ocorram eventuais falhas no sistema, tais como toque não permanente de árvores e outros objetos. No caso de toque permanente, o religador fará três tentativas, até sua abertura permanente para verificação do defeito. A Figura 2.3 mostra a instalação de equipamento de proteção, neste caso chave fusível.



Figura 2.3 – Rede de distribuição convencional com equipamento de proteção

O equipamento de proteção para surtos de tensão é o para raios constituído externamente de porcelana ou material polimérico e internamente de Óxido de Zinco. Possui tensão nominal de 15 kV para redes de 13,8 kV e 27 kV para redes de 34,5 kV. No caso de ocorrência de níveis de tensão superior a estes valores, o para raios conduzirá para a terra a corrente da descarga atmosférica, protegendo os equipamentos de sobretensões. A Figura 2.4 apresenta um para raio de média tensão polimérico.



Figura 2.4 – Para raio polimérico

As Redes de Distribuição aéreas Convencionais são constituídas de postes engastados a aproximadamente sob o calculo de 10% da altura + 600mm no solo, seus condutores são condutores nus na maioria dos casos de alumínio com ou sem alma. As constituições das estruturas dependerão diretamente das condições mecânicas as quais serão aplicadas e necessidades elétricas da instalação.

Este padrão de rede elétrica é notoriamente o mais encontrado nas instalações das concessionárias brasileiras, por se tratar de uma modalidade de rede mais rústica de baixo custo de instalação, sendo largamente utilizada no passado. Atualmente, as concessionárias brasileiras têm buscado instalar outras modalidades de rede, visando ganhos com segurança, confiabilidade de fornecimento e menores custos de manutenção.

As estruturas básicas das redes de distribuição convencionais possuem 04 índices, ou seja 04 configurações de instalação dos isoladores e disposição dos condutores. A Tabela 2.1 caracteriza as estruturas das redes convencionais

Tabela 2.1 – Estruturas de rede de distribuição convencional(*)

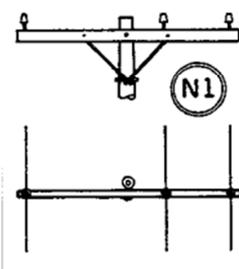
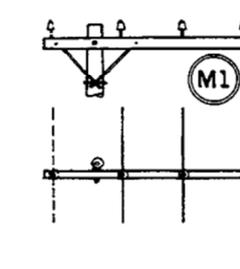
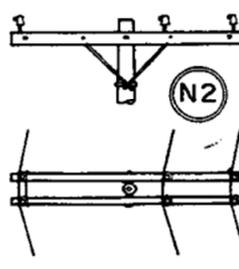
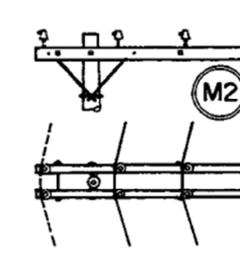
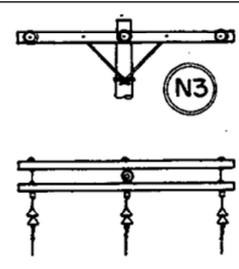
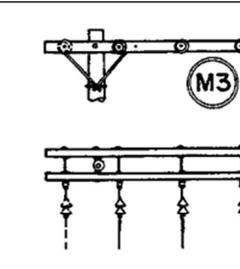
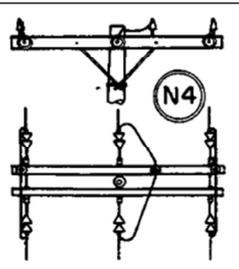
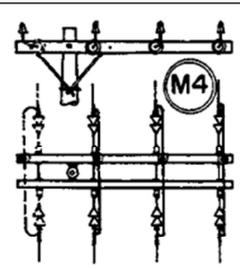
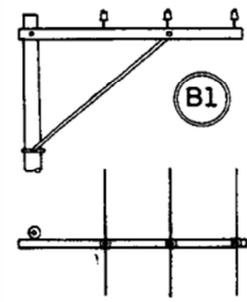
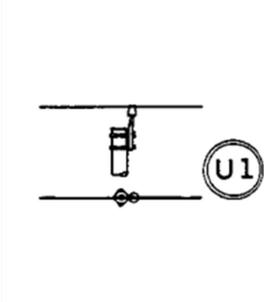
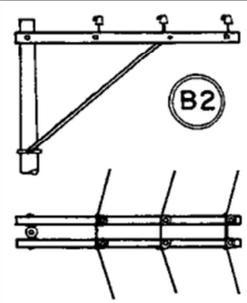
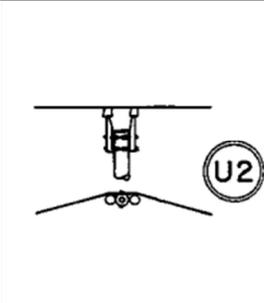
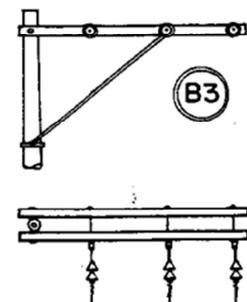
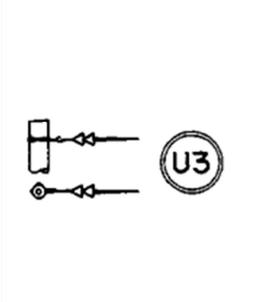
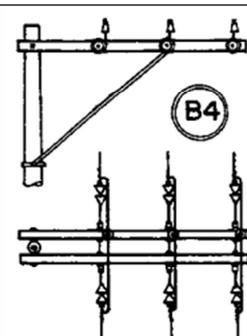
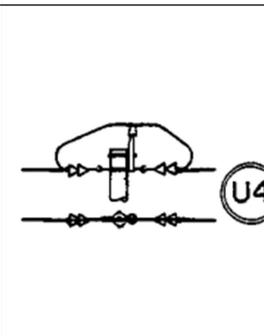
Estrutura	Aplicação	Estrutura	Aplicação
<p>N1</p> 	<p>Vãos passantes de rede nua e posicionamento da cruzeta no centro do poste, condutores isolados do posteamento através de 01 isoladores de pino.</p>	<p>M1</p> 	<p>Vãos passantes de rede nua e posicionamento da cruzeta na lateral do poste afastando os condutores que são isolados do posteamento através de 01 isoladores de pino.</p>
<p>N2</p> 	<p>Vãos com ângulos de deflexão internos e externos compreendidos entre 0° e 60° . Posicionamento da cruzeta no centro do poste, condutores isolados do posteamento através de 02 isoladores de pino.</p>	<p>M2</p> 	<p>Vãos com ângulos de deflexão internos e externos compreendidos entre 0° e 60° . Posicionamento da cruzeta na lateral do poste, afastando condutores e isolados do posteamento através de 02 isoladores de pino.</p>
<p>N3</p> 	<p>Vão em fim de rede. Os cabos são conectados em isoladores de ancoragem poliméricos ou de vidro, que são presos no poste por cruzetas. Posicionamento da cruzeta no centro do poste</p>	<p>M3</p> 	<p>Vão em fim de rede. Os cabos são conectados em isoladores de ancoragem poliméricos ou de vidro, que são presos no poste por cruzetas. Posicionamento da cruzeta na lateral do poste</p>
<p>N4</p> 	<p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e arrancamento. Posicionamento da cruzeta no centro do poste</p>	<p>M4</p> 	<p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e arrancamento. Posicionamento da cruzeta na lateral do poste.</p>

Tabela 2.1 – Estruturas de rede de distribuição convencional(*)

Estrutura	Aplicação	Estrutura	Aplicação
<p>B1</p> 	<p>Vãos passantes de rede nua e posicionamento da cruzeta na lateral do poste, priorizando o afastamento dos condutores que são isolados do posteamento através de 01 isoladores de pino.</p>	<p>U1</p> 	<p>Vãos passantes de rede monofásica nua e posicionamento da cruzeta no cento do poste, condutores isolados do posteamento através de 01 isoladores de pino.</p>
<p>B2</p> 	<p>Vãos com ângulos de deflexão internos e externos compreendidos entre 0° e 60° . Posicionamento da cruzeta na lateral do poste, priorizando o afastamento dos condutores e isolandos do posteamento através de 02 isoladores de pino.</p>	<p>U2</p> 	<p>Vãos monofásicos com ângulos de deflexão internos e externos compreendidos entre 0° e 60° . Posicionamento da cruzeta no cento do poste, condutores isolados do posteamento através de 02 isoladores de pino.</p>
<p>B3</p> 	<p>Vão em fim de rede. Os cabos são conectados em isoladores de ancoragem poliméricos ou de vidro, que são presos no poste por cruzetas. Posicionamento da cruzeta na lateral do poste, rede bastante afastada.</p>	<p>U3</p> 	<p>Vão em fim de rede monofásica. Os cabos são conectados em isoladores de ancoragem poliméricos ou de vidro, que são presos no poste por cruzetas. Posicionamento da cruzeta no cento do poste</p>
<p>B4</p> 	<p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e arrancamento. Posicionamento da cruzeta na lateral do poste, rede bastante afastada.</p>	<p>U4</p> 	<p>Vãos monofásicos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e arrancamento. Posicionamento da cruzeta no cento do poste</p>

(*) As figuras dessa tabela foram extraídas da norma [ND2.1, 1992].

2.3 Rede de Distribuição Compacta

A Rede de Distribuição Aérea Compacta também conhecida como rede “spacer”, é formada por um conjunto de equipamentos composto por cabo de aço, condutores cobertos e espaçadores losangulares, confeccionados em material polimérico. 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 braços metálicos.

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, conforme ilustrado através da Figura 2.5.

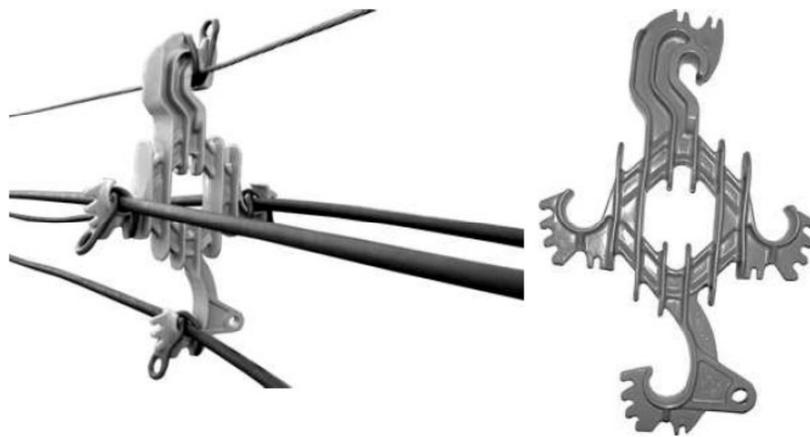


Figura 2.5 – Espaçador losangular

Os locais apropriados para instalações da rede de distribuição aérea compacta são todos aqueles com elevado índice de interferências externas, que propiciem toques eventuais de objetos e nas regiões não densamente arborizadas.

A rede de distribuição compacta é uma solução tecnológica que possibilita às empresas concessionárias de energia melhorar os níveis de qualidade de energia, segurança e confiabilidade no fornecimento da energia elétrica, comparada a rede aérea nua, convencional. Na Figura 2.6 é apresentada estrutura de rede compacta.



Figura 2.6 – Trecho de rede compacta, estrutura de ancoragem

Assim como nas redes convencionais, nas redes compactas são utilizados chaves fusíveis com elos de expulsão e religadores automáticos para proteção contra curtos-circuitos e sobrecorrentes. Para surtos de tensão utilizam-se os dispositivos pára-raios, além do próprio mensageiro ter a função de um cabo guarda, já que este é aterrado a cada 300 m.

Em um vão de 40 m, há pelo menos cinco espaçadores losangulares poliméricos. Desta forma, a rede compacta deve ser instalada sempre em lugares com acesso para troca desses espaçadores, quando estes necessitarem de manutenção. Contudo observa-se que a rede compacta somente poderá ser instalada próximo de estradas ou ruas, facilitando o acesso as estruturas do sistema.

A rede compacta também necessita de poda de árvores, pois o toque permanente fará com que ocorra a queima do cabo, já que o cabo protegido não tem o confinamento do campo elétrico, este fenômeno ocorre devido a intensificação das linhas de campo elétrico nos pontos em que a cobertura do condutor toca a parte aterrada dos galhos e folhas da vegetação. Este fenômeno está ilustrado na Figura 2.7.

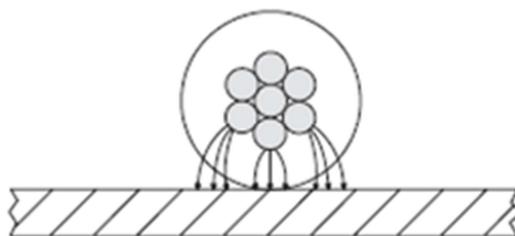


Figura 2.7 – Fenômeno de deteriorização do condutor coberto

As redes protegidas correspondem à totalidade das novas redes urbanas a serem instaladas no estado de Minas Gerais. A aplicação de redes compactas em áreas rurais é realizada quando a rede convencional não atende aos requisitos de confiabilidade e qualidade de energia exigidos pelo cliente.

O espaçador é um acessório de material polimérico no formato losangular cuja função é a sustentação e a separação dos cabos cobertos das redes protegidas ao longo do vão, mantendo o isolamento elétrico da rede. Esse espaçador é sustentado pelo cabo mensageiro através de seu vértice superior, ficando os três vértices restantes incumbidos da sustentação das fases. O cabo mensageiro é conectado ao neutro multi-aterrado (comum às redes primária e secundária) em todas as estruturas da rede através de cabos de aço 6,4 mm. Abaixo temos as duas configurações de espaçadores utilizados na rede compacta, sendo na posição losangular a mais comum e vertical em condições específicas, conforme Figura 2.8.

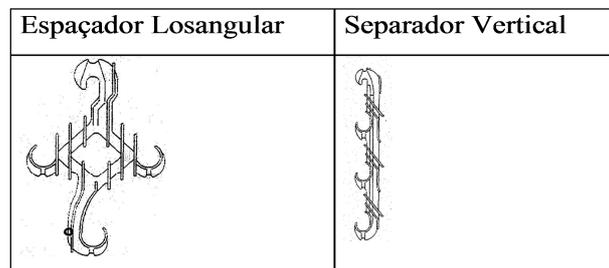
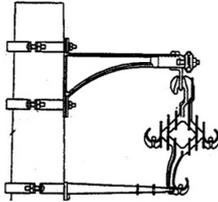
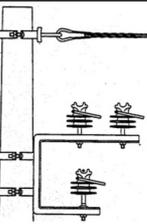
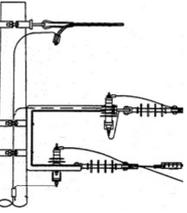
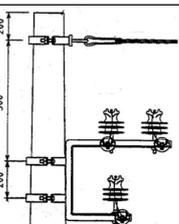


Figura 2.8 – Modelos de espaçadores utilizados em redes compactas.

Mesmo na saída da subestação, quando pode não existir a rede secundária, o neutro deve ser instalado de forma independente, abaixo da linha de média tensão. O NBI das linhas compactas tem valor aproximado de 200 kV, enquanto que em redes convencionais este valor é da ordem de 100 kV, o que demonstra o melhor desempenho das redes compactas sob a ação de descargas atmosféricas.

Existem quatro estruturas básicas utilizadas na sustentação da rede compacta, cada qual com uma aplicação específica. Estas estruturas são detalhadas na Tabela 2.2 a seguir.

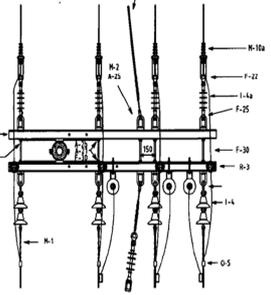
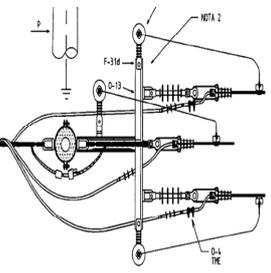
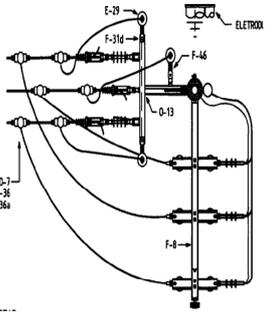
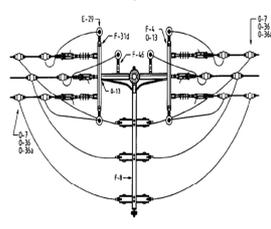
Tabela 2.2 – Estruturas de rede de compacta (*)

Estrutura	Aplicação
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.
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.
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 pára-raios em cada uma das fases.
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 fase e arrancamento.

(*) As figuras dessa tabela foram extraídas da norma [ND2.9,2006].

Existem também estruturas de transição as quais são necessárias para interligação de redes de modalidade diferentes e, conseqüentemente, parâmetros elétricos diferenciados. Nestes casos estas diferenças de parâmetros são tratadas com arranjos padrões, apresentados a seguir na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Estruturas de rede de compacta, estruturas de ancoragem, equipamentos (*)

Estrutura	Aplicação
<p>CEM4</p> 	<p>Transição de rede nua para compacta.</p> <p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e com mudança de modalidade de rede, a instalação de para raios e primordial para manutenção do NBI da rede .</p>
<p>I3.CE3</p> 	<p>Transição de rede compacta para isolada</p> <p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e com mudança de modalidade de rede, a instalação de para raios e primordial para manutenção do NBI da rede .</p>
<p>CE-3</p> 	<p>Transição de rede compacta para isolada com instalação de chave seccionadora.</p> <p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e com mudança de modalidade de rede, a instalação de para raios e primordial para manutenção do NBI da rede .</p>
<p>CE-4</p> 	<p>Transição de rede compacta para compacta com instalação de chave seccionadora.</p> <p>Vãos com ângulos externos e internos entre 0° e 90° e/ou quando houver necessidade de ancoragem de rede e mudança de seção das fase e com mudança de modalidade de rede, a instalação de para raios e primordial para manutenção do NBI da rede .</p>

(*) As figuras dessa tabela foram extraídas da norma [ND2.9,2006].

2.4 Rede de Distribuição Isolada

Em virtude do crescimento industrial, da existência de clientes mais exigentes quanto à qualidade de entrega de energia, muitas por degradação ambiental (cortes e podas de árvores) e muitas por transgressão dos índices de DEC/FEC e DIC/FIC, indicadores de qualidade da agência regulatória ANEEL, observou-se a necessidade de aplicação de uma nova topologia de rede, sendo esta a Rede de Distribuição Aérea Isolada de Média Tensão com cabos pré-reunidos ou multiplexados.

Esta rede é uma evolução da rede aérea, com custos bem inferiores à rede Subterrânea. Como comentado acima, esta topologia de rede também tem um benefício muito grande quanto se trata de segurança, pois devido a isolação do cabo, acidentes com terceiros devem reduzir significativamente, pois nos casos em que há toques acidentais na rede de distribuição de média tensão, não ocorrerá choque elétrico, devido à isolação e confinamento do campo elétrico no cabo.

O cabo isolado de média tensão é completamente diferente dos cabos protegidos da rede compacta ou nu de rede convencional, pois nele o objetivo é confinar o campo elétrico, permitindo que na sua camada externa o potencial seja zero, ou seja, se uma pessoa tocar nele, não ocorrerá risco de choque elétrico. Este cabo pode ter contato direto com objetos, pois como há o confinamento do campo elétrico, não haverá distorções das linhas de campo elétrico, mantendo estas sempre uniformes. Na Figura 2.9 são demonstradas as camadas construtivas dos condutores isolados.

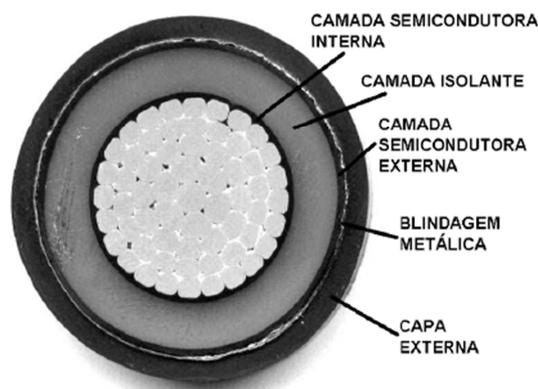


Figura 2.9 – Detalhes construtivos do condutor isolado de media tensão

As características e finalidade das partes do cabo isolado de media tensão são descritas a seguir:

Capa externa: Tem como objetivo proteção mecânica do cabo, ou seja, permitir que este cabo possa ser tocado sem ser danificado.

Blindagem metálica: Esta é responsável pela proteção do cabo em um curto-circuito, descargas atmosféricas induzidas e principalmente equalizar as linhas de força do campo elétrico quando o cabo estiver em contato com alguma superfície aterrada.

Camada semicondutora externa: É responsável por equalizar o campo elétrico em torno do condutor da blindagem e garantir um perfeito contato entre a blindagem e a isolação.

Isolação: Responsável por isolar o condutor da camada externa do cabo.

Camada semicondutora interna: Tem como objetivo preencher as partes vazias do cabo, a fim de equalizar o campo elétrico do mesmo. Isto é necessário porque o cabo é constituído por diversos tentos circulares, encordoados mantendo uma forma geométrica circular, devido a este tipo de construção o cabo não fica uniforme e sim com diversas saliências. A Figura 2.10 que segue mostra a diferença entre os condutores com utilização de camada semicondutora e sem esta camada.

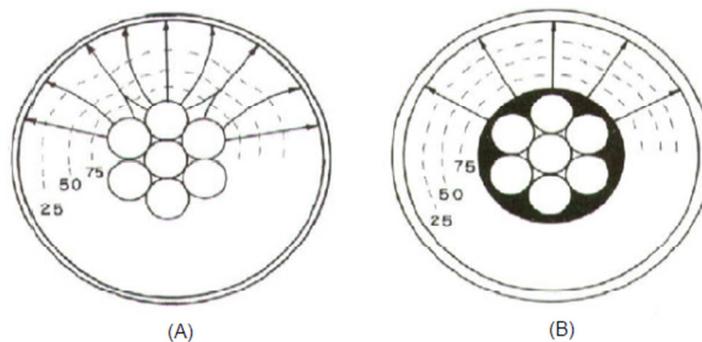


Figura 2.10 – Detalhes do comportamento do campo elétrico nos condutores isolados

Existem dois tipos de isolação rígidas dos cabos isolados e estas são denominadas de EPR ou XLPE. O cabo XLPE apresenta menores perdas dielétricas, porém suas propriedades mecânicas são inferiores ao cabo com isolação EPR, o qual permite maior flexibilidade.

Perda dielétrica é o resultado do efeito de aquecimento do material dielétrico entre os condutores. A potência da fonte é utilizada no aquecimento do dielétrico.

O cabo pré-reunido tem uma particularidade, pois este deve ter as três fases encordoadas a um cabo mensageiro de aço com diâmetro de 9,5 mm, este com o intuito de tracionamento quando da construção e também para dar sustentabilidade aos cabos condutores.

A rede aérea isolada consiste na instalação de cabos isolados multiplexados da rede primária de distribuição trifásica através do uso de estruturas de suportaçõ dos condutores e equipamentos blindados. Estes equipamentos são capazes de evitar correntes de fuga no caso de contato da rede com árvores, quedas acidentais de postes, não sendo suficiente, entretanto, para garantir condições segurança de pessoas e operação do sistema devido a impossibilidade de se aterrar o circuito para manutenção e não permitir abertura em carga dos trechos. Como soluçõ desta condiçõ, estõ sendo utilizados equipamentos não blindados, os quais iremos analisar seus efeitos perante interferências eletromagnéticas. A Figura 2.11 apresenta a estrutura de rede isolada com equipamento de transformaçõ



Figura 2.11 – Estrutura de rede de distribuição isolada com transformador

As redes isoladas correspondem à boa parte das novas redes urbanas a serem instaladas no estado de Minas Gerais. A aplicação de redes isoladas em áreas rurais é restrita às áreas de proteção ambiental, que exigem maior segurança a toque de animais e plantas. A seguir são apresentadas estruturas básicas das redes de distribuição isolada, conforme Figura 2.12.

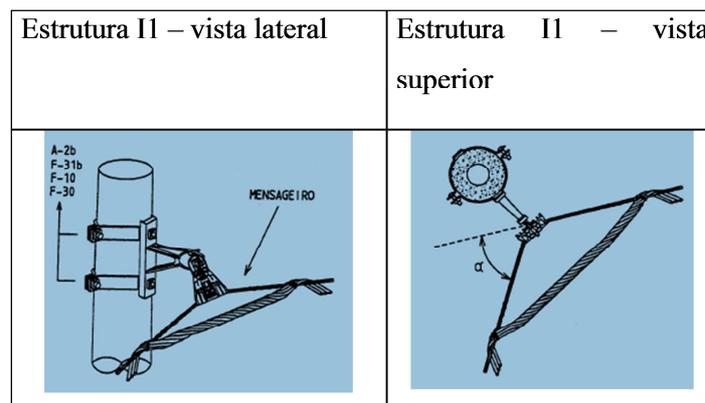


Figura 2.12 – Detalhes ancoragem da rede de distribuição isolada

Na saída da subestação, quando pode não existir a rede secundária, o neutro deve ser instalado de forma independente, abaixo da linha de média tensão, como nas modalidades de rede compacta e convencional.

No próximo capítulo serão apresentadas detalhadamente as estruturas da rede de distribuição aéreas isoladas.

3 Estruturas de Rede de Distribuição Aérea Isolada

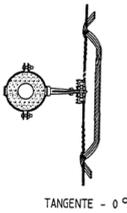
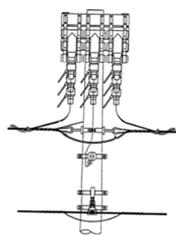
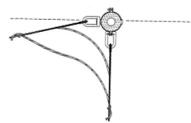
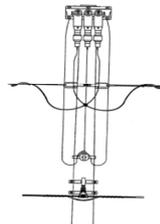
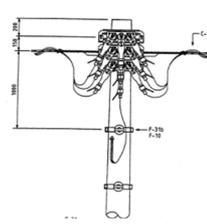
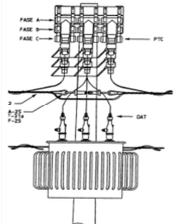
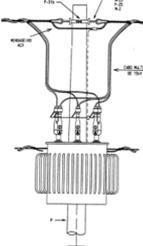
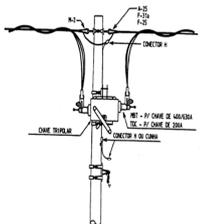
3.1 Introdução às Redes de Distribuição Aéreas Isoladas

Neste capítulo iremos detalhar as estruturas das redes isoladas. Como conceito preliminar as redes de distribuição isoladas são configurações de redes subterrâneas em estruturas suspensas, esta definição é bastante simples mas imprime a ideia principal da modalidade da rede de distribuição.

A implantação destas redes no Brasil se concentrou na CEMIG, estado de Minas Gerais, e possui atualmente 280 km instalados, principalmente na área central de Belo Horizonte e nas cidades no interior do estado de Governador Valadares e Ipatinga.

As estruturas básicas de rede isoladas compõem um conjunto de montagens de acessórios e ferragens adequadas ao funcionamento dos sistemas, tais estruturas são descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Estruturas de rede de isolada (*)

Estrutura	Aplicação	Estrutura	Aplicação
<p>I1</p> 	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 cabo multiplexado.	<p>I4-I3</p> 	Vãos em tangência ou c/ângulo de deflexão externo e interno máximo de 24 ou situação de deflexão, seguimento da rede e derivação. São utilizados suportes para módulos básicos tipo T.
<p>I3 - I3</p> 	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.	<p>I4-I3</p> 	Vãos em tangência ou c/ângulo de deflexão externo e interno máximo de 24 ou situação de deflexão, seguimento da rede e derivação. São utilizados barramentos de interligação cuja funcionalidade é permitir derivação da rede.
<p>I4 - I3</p> 	Vão em fim de rede. Os cabos são conectados em desconectáveis isolados, que são presos no poste por suporte. Por ser um fim de rede, há continuação da rede para derivações e equipamentos isolados	<p>I4 - I3</p> 	Estrutura com instalação de equipamentos, neste caso transformador, nesta condição há continuidade da rede utilizando modulo básico T, quando a linha principal é o tronco.
<p>I4 - Instalação de transformador</p> 	Estrutura com instalação de equipamentos, neste caso transformador, nesta condição há continuidade da rede e instalação de desconectáveis nas buchas primarias do transformador.	<p>I4 - Instalação de chave SF6</p> 	Estrutura com instalação de equipamentos, neste caso chave seccionadora SF6, nesta condição há continuidade da rede e instalação de desconectáveis nas buchas primarias da chave.

(*) As figuras dessa tabela foram extraídas da norma [ND2.10,1990].

3.2 Estruturas Passantes

As estruturas passantes são a maioria das estruturas nas redes de distribuição. Tais estruturas são de simples montagem por terem a finalidade de dar continuidade ao encaminhamento da rede. Vale lembrar que em tais estruturas podem ocorrer terminações que devem ser tratadas com cuidados específicos.

A Mufla (terminação/terminal) constitui um sistema simples e rápido para terminar cabos de potência com isolamento extrudado, unipolar ou tripolar. Trata-se de uma terminação nos cabos de média tensão, aplicada onde existe uma transição de cabos isolados para equipamentos ou até mesmo cabos não isolados. É composta de tubo de alívio de campo elétrico, cobertura de aterramento e saias isolantes em borracha à base de silicone. As aplicações das muflas são descritas a seguir:

- Pode ser montado na posição invertida.
- Instalação em espaços limitados, ambientes internos, externos, áreas poluídas ou de elevada salinidade.
- Resistente à radiação ultravioleta, ao trilhamento (tracking) e à erosão.
- Rapidez e simplicidade de montagem

O objetivo da mufla é fazer uma mudança suave nos campos elétricos nestas transições, já que a simples interrupção do isolamento cria um estresse (linhas de campo muito densas) que danificam o isolamento naquela região.

Adicionalmente, as muflas são projetadas para fazer também a impermeabilização no ponto de término do isolamento, para evitar a entrada de umidade, que também pode danificar o cabo naquele ponto.

Outro ponto importante dos trechos de rede passantes são as emendas, que permitem a restauração do sistema em casos de manutenção e continuidade na construção onde há término dos condutores lançados, ou seja são utilizadas para possibilitar a continuidade de todas as camadas do cabo, possibilitando a recomposição do condutor até a blindagem. A emenda deve ser utilizada sempre que termina um tramo de cabo e começa outro. Os detalhes construtivos das emendas de cabos isolados são apresentados na Figura 3.1, abaixo

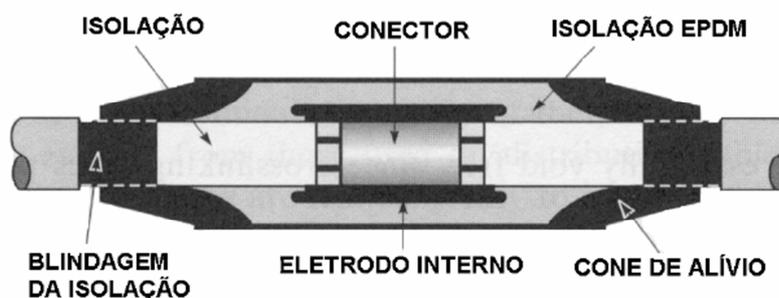


Figura 3.1 – Detalhes construtivos de emenda de condutor isolado de média tensão

As estruturas passantes devem ser aplicadas somente em casos em que a rede não tenha ângulos, para isso deve-se usar suportes adequados como demonstrado abaixo, na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Estrutura passante de rede de distribuição isolada.

Caso haja necessidade de maiores tensionamentos ou angulação, deverão ser aplicadas estruturas de encabeçamento, ou seja, seccionar o cabo mensageiro de aço 9,5 mm e ancora-lo. No próximo tópico serão apresentadas as características das estruturas de ancoragem.

3.3 Estruturas de Ancoragem

A ancoragem ou encabeçamento da rede isolada é feita através do cabo mensageiro, aço 9,5 mm de diâmetro. Para isso é necessário fixar a cinta universal ao poste e a ela deverá ser fixado um prolongador, com o objetivo de facilitar o trabalho de montagem aos eletricitistas, afastando o cabo do poste.

Estruturas de encabeçamento devem ser utilizadas em três situações, ao final de um tramo (300 m capacidade da bobina do condutor), quando ocorrerem ângulos, ou no final da rede de distribuição, conforme apresentado na Figura 3.3.

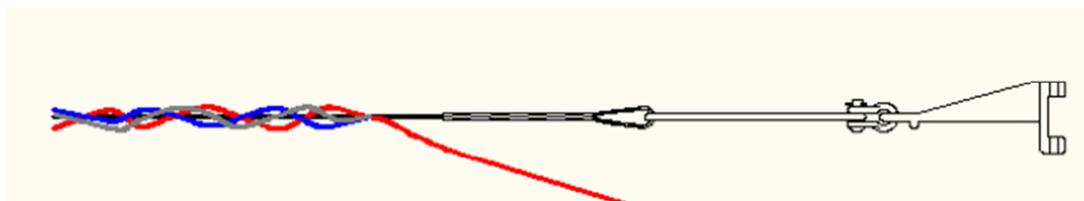


Figura 3.3 – Estrutura de ancoragem de rede de distribuição isolada

O grande desafio nas instalações de redes isoladas aéreas é a adaptação dos equipamentos ao sistema, serão mostradas as características destas estruturas no próximo tópico.

3.4 Estruturas com Instalação de Equipamentos

As estruturas nas quais são instalados equipamentos tem sua complexidade devido as ocorrências de conexões para a implantação dos equipamentos, já que é necessário a descontinuidade do circuito.

Os equipamentos de proteção e manobra blindados têm deficiência de condições de trabalho, ou seja, nestas estruturas os pontos de aterramentos temporários são escassos e não dão condições totalmente seguras aos eletricitistas nas atividades de manutenção. Nestes casos são usados equipamentos não blindados, ou seja, dispositivos usados em redes nuas ou compactas que mantêm os pontos energizados vivos ao ambiente, mas permitem o sistema ser aterrado em casos de manutenção desenergizada.

Se por um lado resolve-se os problemas de condições de trabalho, por outro se cria situações em que a blindagem do sistema fica comprometida.

Estas configurações são apresentadas preliminarmente neste capítulo e serão detalhadas e analisadas no capítulo seguinte, a Figura 3.4 que compara as duas situações.

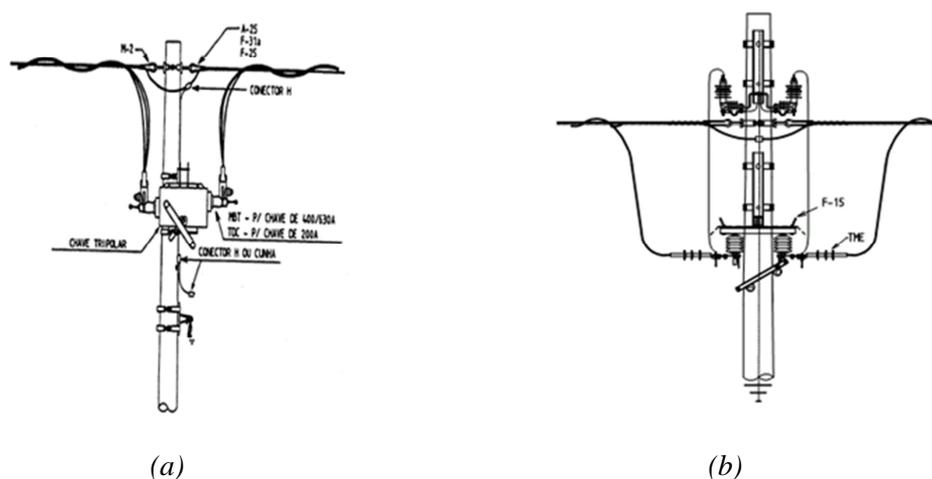


Figura 3.4 – Estrutura com instalação de equipamento de rede de distribuição isolada

Acima temos na Figura 3.4 (a) estrutura de seccionamento de circuitos com uso de chave seccionadora tripolar isolada em SF6, estrutura não condiciona aterramento temporário para atividade de manutenção. A estrutura do lado direito (b) é a chave seccionadora unipolar, equipamento não blindado, que dá condições de aterramento temporário aos eletricitistas.

No próximo capítulo serão feitas análises do problema apresentado, comparando resultados obtidos de trabalhos do tema interferências eletromagnéticas causadas por descargas atmosféricas.

4 Análise de Comportamento das Redes de Distribuição Aéreas Isoladas (RDI) com Uso de Equipamentos não Blindados

4.1 Introdução às análises de sobretensões

A investigação aqui proposta tratará das interferências eletromagnéticas promovidas por descargas atmosféricas nas proximidades das estruturas e verificará o nível de tensões induzidas nos terminais da chave e na blindagem dos condutores isolados .

Para isso serão revisados os tópicos que tratam dos conceitos sobre Interferências Eletromagnéticas causadas por descargas próximas, da configuração da estrutura de rede isolada a ser analisada e posteriormente se comparam os resultados obtidos em trabalhos sobre tensões induzidas já estudados por outros autores.

4.2 Conceitos sobre interferências eletromagnéticas causadas por descargas próximas.

A principal fonte de danos às redes de distribuição são as sobretensões geradas por interferências eletromagnéticas advindas de descargas atmosféricas. Conforme citado em [Silveira, 2006], a etapa da descarga atmosférica de maior relevância no fenômeno tensão induzida ocorre após a conexão dos canais ascendentes e descendente, período em que a corrente de descarga flui pelo canal e promove intensos campos eletromagnéticos. A Figura 4.1 a seguir apresenta este fenômeno.

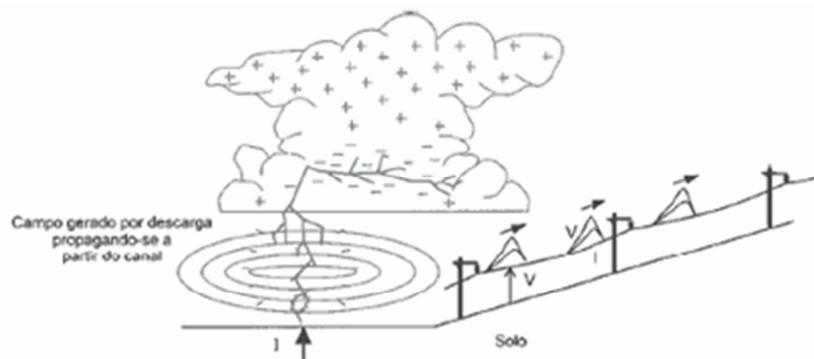


Figura 4.1 – Ilustração do fenômeno de tensão induzida em rede de distribuição. Retirado de [VISACRO, 2005]

Os conceitos sobre interferências eletromagnéticas causadas por descargas próximas podem ser entendido preliminarmente com a aplicação das equações de Maxwell que regem os fenômenos eletromagnéticos apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Equações de Maxwell

NOME	FORMA DIFERENCIAL	FORMA INTEGRAL
<i>Lei de Faraday</i>	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
<i>Lei de Ampère</i>	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + j\omega \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$
<i>Lei de Gauss</i>	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho dV$
<i>Lei de Gauss do magnetismo</i>	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$
<i>Equação da continuidade</i>	$\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega\rho$	$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = -j\omega \int_V \rho dV$

Tensão induzida por descarga atmosférica em um condutor aéreo pode ser definida como a integral do campo elétrico total entre o condutor e a superfície do solo, conforme citado em [Silveira, 2006]. Esta totalização se dá com a soma do campo elétrico conservativo, associado às cargas do canal de descarga, com o campo elétrico não-conservativo, associado ao fluxo de corrente no canal, conforme indica a equação 4.1.

$$E_{total} = E_{conservativo} + E_{n\tilde{a}o-conservativo} \quad (4.1)$$

Considerando a modelagem de antena com uso do dipolo de Hertz, podemos considerar que no sistema tridimensional existem três componentes de campos elétrico e magnético sendo demonstrado na Figura 4.2.

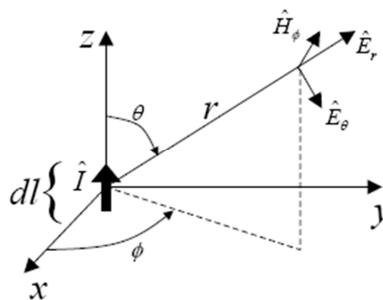


Figura 4.2 – Demonstração tridimensional dos campos eletromagnéticos

A formulação completa das resultantes dos campos eletromagnéticos é complexa, conforme indicado no conjunto de Equações 4.2.

$$\begin{aligned}
 \hat{E}_r &= 2 \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \eta_0 \beta_0^2 \cos \theta \left(\frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} & \hat{H}_r &= 0 \\
 \hat{E}_\theta &= \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \eta_0 \beta_0^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} & \hat{H}_\theta &= 0 \\
 \hat{E}_\phi &= 0 & \hat{H}_\phi &= \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \beta_0^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} \right) e^{-j\beta_0 r}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Utilizando do conceito de campo distante podemos simplificar estas formulações nas equações 4.3:

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_{dist} &= j \eta_0 \beta_0 \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \sin \theta \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} \hat{a}_\theta \\
 \bar{H}_{dist} &= j \beta_0 \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \sin \theta \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} \hat{a}_\phi
 \end{aligned}$$

Equações 4.3

Lembrando que o conceito de campo distante se refere ao campo a uma distância $\gg \lambda$, deem relação à fonte geradora do efeito, onde λ refere-se ao comprimento de onda.

Objetivando a simplificação da modelagem do sistema pode-se considerar o efeito da corrente no fenômeno de descarga atmosférica como uma linha de transmissão percorrida por uma corrente elétrica e avaliar a influencia das tensões induzidas advindas da corrente na linha através dos efeitos dos campos eletromagnéticos envolvidos, demonstrados na Figura 4.3.

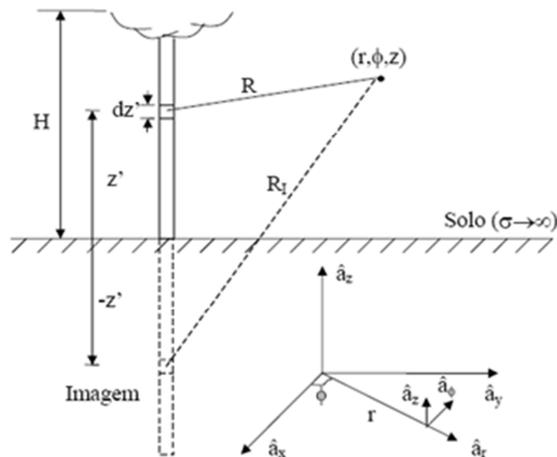


Figura 4.3 – Ilustração dos efeitos dos campos eletromagnéticos gerados por uma descarga atmosférica. Retirada de [Visacro, 2004].

Na construção simplificada deste modelo devemos considerar os seguintes parâmetros:

Canal de descarga representado como uma antena longa e vertical composta por segmentos infinitesimais de corrente.

Solo representado como plano condutor perfeito.

Outros efeitos da descarga são desprezados.

A contribuição dos filamentos ao longo do canal se faz contabilizando cada elemento atual como fonte de campo, o total é a superposição dos efeitos.

A tensão induzida é determinada pela contribuição da corrente ao longo do canal de descarga, diante de tais condições no próximo item será tratada a configuração em que este fenômeno será analisado.

4.3 Configuração da estrutura de rede isolada com instalação de equipamento não blindado

A rede de distribuição isolada (RDI), conforme já apresentado possui variadas configurações de estruturas por necessidades de instalação de equipamento de transformações, proteção e manobras. A estrutura a ser analisada neste trabalho trata-se de instalação de equipamento de manobra “chave seccionadora unipolar”, dispositivo não blindado, representado na Figura 4.4.

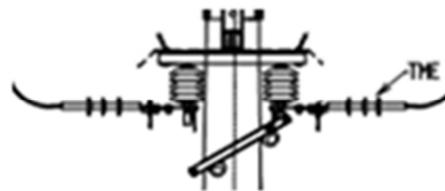


Figura 4.4 – Chave seccionadora unipolar de média tensão

A estrutura investigada é a de instalação do equipamento chave seccionadora unipolar. Sua aplicação é necessária para permitir manobras no sistema. Estas manobras são unipolares e com carga e ocorrem com a utilização de dispositivo específico de abertura em carga.

Para melhor entendimento e posterior análise, a definição dimensional da estrutura não blindada é importante. Para isso, nesta etapa será caracterizada fisicamente a montagem proposta com dimensionais das partes não blindadas, apresentada na Figura 4.5.

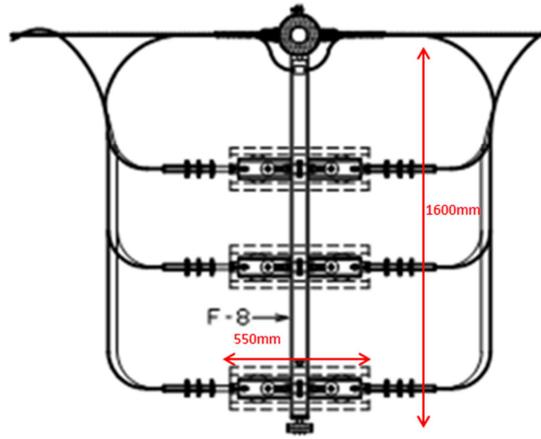


Figura 4.5 – Detalhamento da estrutura não blindada

Diante os dimensionais apresentados acima podemos considerar como referencia as medidas de 1600 mm de comprimento e três partes distribuídas de 550 mm ao logo do comprimento. Vale ressaltar que os comprimentos expostos às interferências eletromagnéticas se referem ao comprimento da chave seccionadora (550 mm) e do suporte que a sustenta (1600 mm).

O próximo item tratará das análises comparativas com resultados obtidos em trabalho sobre tensões induzidas.

4.4 Análise de sobretensões nas estruturas de Rede de Distribuição Aérea Isolada

Este item apresenta um conjunto de resultados apresentados em trabalhos para o cálculo de tensões induzidas em redes de distribuição, os quais serão base para analisar as condições apresentadas na configuração do problema proposto. Esta análise partirá com valores de tensões induzidas em redes de baixa tensão, considerando aspectos de blindagem por partes aterradas, condições físicas locais, e análise do dimensional não blindado frente ao fenômeno de indução.

O mecanismo de indução nas redes de distribuição primária é o mesmo das redes de baixa tensão. Entretanto, devido às suas diferentes características de redes, as tensões induzidas apresentam comportamentos distintos nos dois casos, para análise deste tema poderemos considerar as mesmas características pois iremos pontualmente indicar valores de sobretensões, para avaliação do isolamento do sistema. Embora as tensões induzidas nas linhas de classe 15 kV sejam estudadas já há algum tempo, ainda existem divergências sobre o fenômeno, o que motiva ainda mais este estudo.

Diante as ponderações apresentadas anteriormente analisando os resultados obtidos em [Silveira, 2007] pode-se afirmar que foram concebidos nas seguintes condições:

Forma de onda da corrente do tipo triangular com 1 kA de valor de pico, tempo de frente de 1 μ s e tempo de meia onda igual a 50 μ s.

O efeito do solo é desprezado

A incidência da descarga ocorre a 50 m da região central da linha

Vão com 150 m de comprimento

O arranjo proposto para análise tem o condutor neutro a 7,2 m do solo e o condutor fase a 7 m, simular as medidas das redes de distribuição isoladas, conforme Figura 4.6.

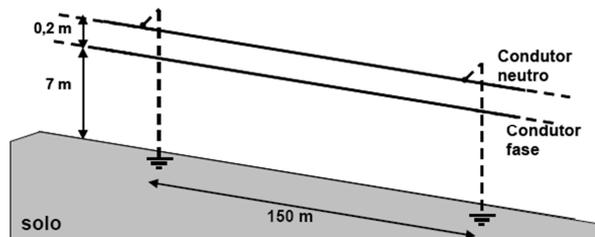


Figura 4.6 – Rede de baixa tensão, configuração simulada. Retirada de [Silveira, 2007]

Abaixo são apresentados os resultados das análises de [Silveira, 2007].

A presença do condutor neutro tem influencia extremamente positiva na redução dos valores de tensão induzida, a redução se da em mais de 38% conforme mostrado na Figura 4.7 retirado do trabalho [Silveira, 2007].

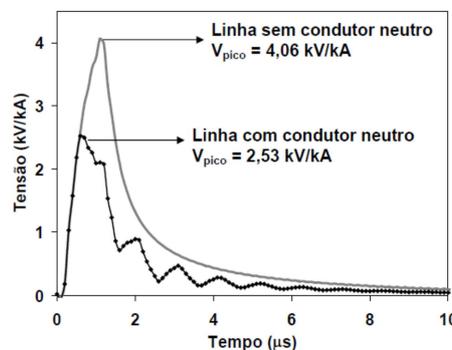


Figura 4.7 – Comportamento dos valores de tensão induzida na presença do condutor neutro.

Retirada de [Silveira, 2007].

O numero de pontos em que o condutor neutro é aterrado influencia também na diminuição dos valores de tensão induzida, esta redução mais considerável ocorre nos casos em que temos mais de 6 (seis) descidas. Observa-se uma redução da ordem de 18% para um aumento de 2 (duas) para 6 (seis) descidas, conforme mostrado no resultado obtido e apresentado em [Silveira, 2007] na Figura 4.8.

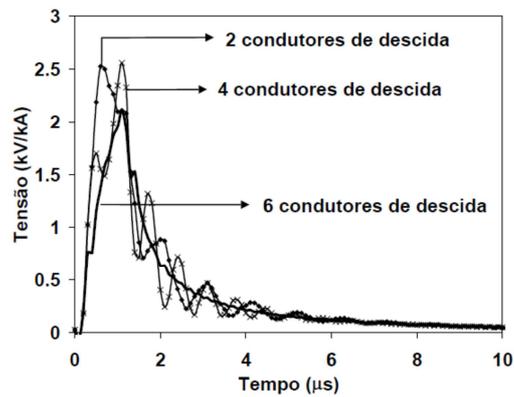


Figura 4.8 – Análise dos valores de tensão induzida diante pontos de aterramento. . Retirada de [Silveira, 2007].

Outro fator a ser analisado é o efeito da redução do valor resistência de aterramento que resulta na diminuição do valor da tensão induzida. Esta redução é ainda mais expressiva para vãos menores, conforme demonstrado na Tabela 4.1 e Figura 4.9, retirados do trabalho [Silveira, 2007].

Tabela 4.2 – Comportamento dos valores de tensão induzidas com variação das resistências do solo e comprimento dos vãos, retirado de [Silveira, 2007].

R_{at} (Ω)	Neutro com dois condutores de descida (vão de 150 m)		Neutro com seis condutores de descida (vãos de 30 m)	
	V_{pico} (kV/kA)	Redução (%)	V_{pico} (kV/kA)	Redução (%)
240	2,75	-	2,37	-
120	2,541	7,6%	2,19	7,59%
80	2,525	8,18%	2,11	10,97%
50	2,524	8,22%	2,02	14,77%
10	2,523	8,25%	1,85	21,94%

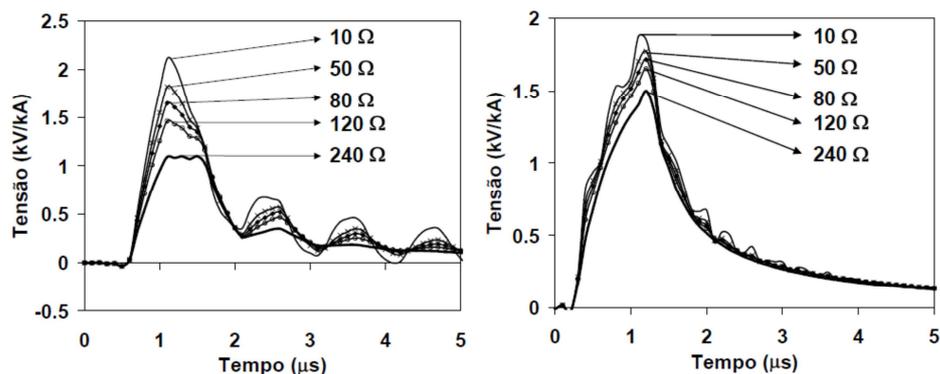


Figura 4.9 – Comportamento dos valores de tensão induzida perante valores de resistência de aterramento. Retirado de [Silveira, 2007].

[Silveira, 2007] também comparou os valores de tensão induzida nas redes de baixa tensão convencionais e multiplexadas com os mesmos parâmetros das análises anteriores. Os detalhes das configurações são destacados a seguir na Figura 4.10.

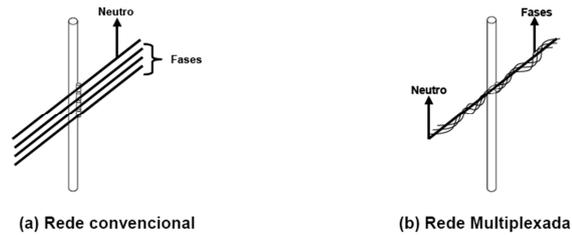


Figura 4.10 – Redes de baixa tensão convencionais e multiplexada. Retirado de [Silveira, 2007].

O resultado foi muito expressivo, nos caso em que havia presença de carga a redução superou 27% para as redes multiplexadas. A apresentação dos resultados segue abaixo na Figura 4.11.

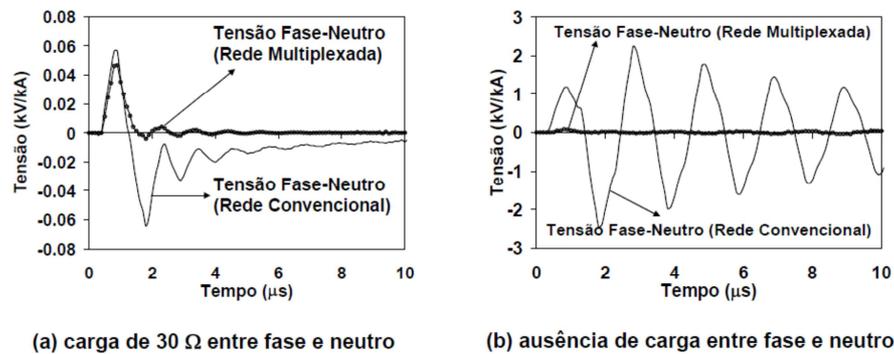


Figura 4.11 – Valores de tensões induzida nas redes convencionais e isoladas multiplexadas

- Sob a análise da presença de neutro no sistema, a configuração da rede isolada aérea de media tensão possui o neutro contínuo e multi aterrado, sendo assim podemos afirmar que os valores de tensão induzida nesta estrutura terão redução de até 40% em relação as condições de redes de distribuição sem a presença do condutor neutro. Para maior entendimento e considerando valores médios de corrente de descarga no Morro do Cachimbo, [Visacro, 2004], com valores médios de 45 kA de primeira descarga e 16 kA para subsequente, os resultados de tensões induzidas poderiam chegar a estrutura em torno de 113 kV e 40,48 kV, respectivamente. Considerando que o NBI da chave seccionadora unipolar é de 95 kV [CEMIG ET 401, 2004], podem ocorrer rupturas de isolamento do equipamento e provocar desligamento no sistema.

Cabe ressaltar que a estrutura de instalação da chave seccionadora possui um suporte de aço com a denominação “Braço J”, onde são fixadas. Este acessório é aterrado através do neutro e hastes instaladas no pé do poste. Perante estas condições o dispositivo é instalado sob uma blindagem. Sendo assim podemos concluir que serão reduzidas as tensões induzidas, sob a ótica de presença de neutro.

- Analisando sob o ponto de vista de pontos de aterramentos no sistema pode-se afirmar que nas redes de distribuição aéreas isoladas temos vários pontos de aterramento o que contribui para redução dos valores de tensões induzidas, estes pontos ocorrem nas instalações de equipamentos e a

cada 100 m. Em áreas urbanas esta distância média é diminuída para 30 m, devido a grande quantidade de equipamentos e aterramentos de consumidores. Diante estas condições a contribuição para redução dos valores de tensão induzida é significativa neste sistema. Considerando os valores de 2,2 kV/kA em 06 descidas e para uma corrente de 45 kA teremos 99 kV, já para 02 descidas as tensões poderiam chegar a 112,5 kV. Conclusivamente valores superiores a suportabilidade de isolamento do equipamento.

- Verificando o sistema sob análise dos valores de resistência de aterramento, a rede de distribuição aérea isolada tem como requisito mínimo valores abaixo de 50 ohms, já as estruturas de instalação dos equipamentos não blindados possuem a exigência normativa de que o aterramento seja menor ou igual a 30 ohms, sendo assim as tensões induzidas serão menores neste sistema em relação a condições de altos valores de resistência de aterramento. Considerando vãos médios de descida de 30 m e valores de resistência de aterramento em média de 30 ohms, os valores de tensões induzidas poderiam chegar a 90 kV, considerando corrente de descarga de 45 kA. Neste caso o valor de suportabilidade não será superado. A Tabela 4.3 indica os valores de referência para diversos valores de pico de primeira corrente de descarga.

Tabela 4.3 – Valores de Corrente de primeira descarga típicas medidas no Morro do Cacimbo, comparado aos possíveis níveis de tensões induzidas [Visacro, 2004].

Ip(kA)	% das Correntes > Ip	kV	Ruptura de isolamento
24 kA	95%	48 kV	Não
45 kA	50%	90 kV	Não
85 kA	5%	170 kV	Sim

- A comparação entre tensões induzidas nas redes convencionais e redes multiplexadas apresentados no trabalho [Silveira, 2007], demonstra através dos resultados que o sistema multiplexado tem valores bastante reduzidos de tensões em relação ao sistema convencional. A rede de distribuição em análise nesta monografia tem os condutores multiplexados, o que permite afirmar que teremos menores valores de tensão induzida nos condutores, principalmente no mensageiro.

Diante os resultados obtidos e análises comparativas do problema em estudo, pode-se inicialmente concluir que a estrutura com instalação do equipamento não blindado “chave seccionadora unipolar”, terá risco de ruptura de isolamento nos casos de não existência de neutro, em situações de poucas descidas de aterramento e em locais de alto valor de resistência de aterramento.

No entanto a estrutura não estaria comprometida do ponto de vista de sobretensões, causadas por tensões induzidas com valores medianos de corrente de primeira descarga, já que na instalação da chave seccionadora são previstos aterramentos em postes adjacentes e para-raios após esta análise de sensibilização feita neste trabalho e em consonância com as instruções do Estudo de Distribuição ED. 3.4, 1995, CEMIG, que determina em casos de transições de NBI das redes ou equipamentos a instalação de para-raios. No entanto, vale destacar que para valores de corrente de descarga superiores

ao valor mediano medido no Morro do Cachimbo, as sobretensões induzidas poderão superar a suportabilidade do equipamento estudado.

Entretanto, é importante destacar a necessidade de realização de análises mais aprofundadas de modo a representar mais fielmente a configuração em estudo, como a consideração do dimensional da estrutura. Além disso, as análises realizadas nesta monografia estão baseadas no efeito de iluminação direta do campo eletromagnético de descarga geradora da tensão induzida. Deve-se considerar também aqueles efeitos referentes à propagação de surtos induzidos em pontos distantes do sistema e o efeito que os diversos equipamentos instalados na rede, bem como as possíveis rupturas de isolamento no sistema possam causar no resultado final. Neste contexto, o efeito da resistividade do solo tanto para a parcela de tensão induzida propagada ao longo da linha assim, bem como o efeito para a iluminação direta do campo eletromagnético merece ser considerado.

Outro aspecto que deve ser observado é a tipicidade do evento, ou seja, eventos de descarga de primeira e subsequente. No trabalho [Silveira, 2010] são avaliadas as influências de tensões induzidas advindas de descargas negativas de primeiras e subsequentes. As conclusões deste artigo são que as amplitudes das correntes de descarga negativas de primeira exercem maior influência nos valores de tensão induzidas, mesmo considerando que di/dt da corrente subsequente é menor que nas correntes de primeira descarga, considerando vãos de 30 m e 150 m.

5 Conclusões

O setor elétrico brasileiro tem passado por transformações muito expressivas, principalmente em relação às novas regras regulatórias do setor, na maior exigência por qualidade de fornecimento da energia, em requisitos de segurança mais exigentes e na necessidade de implementação de novas tecnologias.

Nos últimos tempos as redes de distribuição de energia estão sendo mais exigidas e passando por mudanças tecnológicas muito grandes. Considerando que, no início de implementação de redes de energia elétricas de distribuição havia apenas redes convencionais, e que grande parte destes ativos foram instalados nesta modalidade, hoje tem-se outros tipos de redes aéreas, como as compactas e isoladas.

Diante a alta performance das redes isoladas as concessionárias vem implementando longos trechos de distribuição, no entanto as condições tecnológicas ainda não foram superadas, por isso este trabalho vem analisar a estrutura de equipamento não blindado neste sistema perante interferências eletromagnéticas causadas por descargas atmosféricas.

Como proposta foi analisado o comportamento deste, equipamento não blindado, ao sistema isolado sob o ponto de vista de sobretensões causadas por tensões induzidas advindas de descargas atmosféricas.

A base para esta análise foi o estudo dos resultados obtidos em [Silveira, 2007], para sensibilização dos valores de sobretensões nas estruturas da chave seccionadora unipolar.

Com resultados analisados pode-se concluir:

- Os níveis de sobretensões na estrutura sem a presença de neutro compromete o isolamento do equipamento severamente, em outro caso com a presença do neutro, a condição continua sendo crítica superando os 95 kV de NBI, requisito do equipamento.

- Quando aumentamos a quantidade de descidas de aterramento, os níveis de sobretensões diminuem drasticamente. Os valores obtidos superam a suportabilidade do isolamento nos casos de 2 e 6 descidas, considerando corrente de 45 kA.

- Na configuração completa da rede, ou seja, presença do neutro, vãos de 30 m, maior número de descidas e valores baixos de resistências de aterramento, em torno de 30 ohms, as sobretensões não superam a suportabilidade da chave seccionadora. Vale ressaltar que o padrão das redes de distribuição

aéreas isoladas tem estes mesmos requisitos acima citados, sendo assim pode-se concluir que não ocorrerá ruptura de isolamento do equipamento.

No entanto, baseado no Estudo de Distribuição ED 3.4, 1995, CEMIG, mesmo que os valores ainda que não superem a suportabilidade do equipamento, foi prudente indicar como prevenção a instalação de para-raios nestes pontos não blindados, promovendo assim a proteção do sistema contra sobretensões.

O assunto sobretensões causadas por descargas atmosféricas é bastante vasto, este trabalho foi dedicado apenas a análise das tensões induzidas, o tema ligado a propagação do surto pela rede não foi discutido.

Como proposta de continuidade é sugerido análises de propagação de tensões provocadas por descargas atmosféricas nas redes de distribuição isoladas, com verificação no condutor mensageiro e pontos não blindados do sistema. Como sugestão esta avaliação poderá ser feita com simulações computacionais mais completas e abrangentes à configuração do problema, buscando-se uma melhor modelagem da configuração da estrutura com maior aproximação das condições reais.

6

Referências Bibliográficas

-CEMIG – ET-401- Especificação Técnica Chaves Seccionadoras e Interruptoras Secas de Distribuição, fev. 2004.

- CEMIG – ED-3.4 – Proteção Contra sobretensões em redes de distribuição Aéreas – Estudo de Distribuição, set. 1995.

- CEMIG - ND-2.1 – “Instalações básicas de redes de distribuição isoladas” – Norma Técnica, dez, 1992.

- CEMIG - ND-2.7 – “Instalações básicas de redes de distribuição isoladas” – Norma Técnica, dez, 2000.

- CEMIG - ND-2.9 – “Instalações básicas de redes de distribuição compactas” – Norma Técnica, dez, 2006.

- SILVEIRA, F. H.“ Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas” LRC – UFMG Dez, 2006

- SILVEIRA , F. H. , DE CONTI. A VISACRO S. “Voltages Induced in Single-Phase Overhead Lines by First and Subsequent Negative Lightning Strokes: Influence of the Periodically Grounded Neutral Conductor and the Ground Resistivity” LRC – UFMG Nov, 2011.

- SILVEIRA , F. H. , DE CONTI. A, VISACRO. S, SANTOS. C. M. “On the Application of Typical Patterns of First and Subsequent Negative Strokes for Computational Evaluations of Lightning-Induced Voltages” LRC – UFMG Nov, 2010.

- SILVEIRA , F. H. , VISACRO S. “Evaluation of lightning-induced voltages on low-voltage distribution networks” LRC – UFMG Nov, 2007.

- VISACRO, S., SCHROEDER, M.A.O., SOARES J., A., CHERCHIGLIA, L.C.L., SOUZA, V.J., "Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station", Journal of Geophysical Research, vol. 109, no. D01105, 1-11, 2004.

- VISACRO S.F – Livro – “ Descargas Atmosféricas uma Abordagem de Engenharia” Artiliber Editora – 2005.

