

**FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DE CASO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO CONDUTOR NEUTRO EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS**

RAMON SILVÉRIO DO NASCIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso

Caratinga/MG

2017

RAMON SILVÉRIO DO NASCIMENTO

**ESTUDO DE CASO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO CONDUTOR NEUTRO EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso Superior de Engenharia Elétrica das Faculdades DOCTUM de Caratinga como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Professor Orientador: Guilherme Cassimiro de Araújo Borges.

Caratinga/MG

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

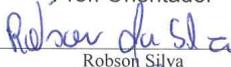
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ESTUDO DE CASO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO CONDUTOR NEUTRO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS, elaborado pelo(s) aluno(s) RAMON SILVERIO DO NASCIMENTO foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de ENGENHARIA ELÉTRICA das FACULDADES DOCTUM CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Caratinga 15 de Dezembro de 2017



Guilherme Casimiro
Prof. Orientador



Robson Silva
Prof. Avaliador 1



Reginaldo Eustáquio
Prof. Examinador 2

À Deus por todas as bênçãos desta vida.....

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas conquistas até o momento. Aos meus pais, pelo carinho e compreensão. Especialmente à minha amada namorada Amanda, pela paciência e apoio. Aos meus companheiros de trabalho Empreender e CEMIG, José Francisco, Everton, Antônio, Felipe, Elton, Giliarde, Carlos, Geraldo Magela, Moacyr, Ernani, Anezio, Jair, Ronaldo, Marcelo Gonçalves, que foram fundamentais na construção deste estudo. Aos meus familiares, Gilmar, Lourdes, Claudia. Ao meu professor orientador Guilherme Cassimiro de Araújo Borges, pela contribuição dos conhecimentos prático e teórico.

“Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas.”

(STEVE JOBS)

SILVÉRIO, Ramon. **ESTUDO DE CASO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO CONDUTOR NEUTRO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS**. Caratinga, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades DOCTUM de Caratinga, Caratinga, 2017.

RESUMO

Neste trabalho é analisado o comportamento do condutor neutro nas redes de distribuição aéreas rurais, visando comprovar a importância do mesmo. Desta forma, foram realizadas as medições dos níveis de tensão, circulação de corrente e resistência de aterramento do transformador em uma única unidade consumidora, utilizando métodos para representar a rede com e sem o condutor neutro. Tudo isso, com o objetivo de obter resultados que evidenciam a relevância do estudo em questão. Através dos resultados obtidos nas medições, foi possível analisar o desempenho das redes em uma visão com e sem o condutor neutro e comprovar a eficácia do estudo.

Palavras-chave: Condutor Neutro, Rede de Distribuição de Energia Elétrica, Sistema Multi-Aterrado.

SILVÉRIO, Ramon. **ESTUDO DE CASO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO CONDUTOR NEUTRO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS**. Caratinga, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades DOCTUM de Caratinga, Caratinga, 2017.

ABSTRACT

In this work the behavior of the neutral conductor in the rural aerial distribution networks is analyzed, aiming to prove the importance of the same. In this way, the measurements of the voltage levels, current circulation and ground resistance of the transformer were carried out in a single consumer unit, using methods to represent the network with and without the neutral conductor. All this, with the aim of obtaining results that show the relevance of the study in question. Through the results obtained in the measurements, it was possible to analyze the performance of the networks in a vision with and without the neutral conductor and to prove the effectiveness of the study.

Key-words: Neutral Conductor, Electric Power Distribution Network, Multi-Grounded System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | – Diagrama de impedância | 17 |
| Figura 2 | – Rede de distribuição de energia elétrica com o condutor neutro multi-aterrado | 22 |
| Figura 3 | – Diagrama de ligação monofásica do regulador de tensão | 24 |
| Figura 4 | – Diagrama de ligação trifásico do regulador de tensão | 25 |
| Figura 5 | – Diagrama de ligação trifásico do regulador de tensão na rede de distribuição | 25 |
| Figura 6 | – Transformador monofásico | 27 |
| Figura 7 | – Transformador monofásico com 50% de carregamento | 28 |
| Figura 8 | – Circulação de corrente de curto através do condutor neutro e no solo | 32 |
| Figura 9 | – Chave Fusível | 35 |
| Figura 10 | – Diagrama elétrico da rede de distribuição monofásica | 41 |
| Figura 11 | – Diagrama elétrico da rede de distribuição trifásica | 41 |
| Figura 12 | – Medição utilizando o equipamento RE 1000 | 44 |
| Figura 13 | – Rompimento do condutor neutro na rede monofásica | 45 |
| Figura 14 | – Equipamento P-300 instalado na baixa tensão | 46 |
| Figura 15 | – Rompimento do condutor neutro na rede trifásica | 47 |
| Figura 16 | – Níveis de tensão da rede trifásica com e sem o condutor neutro | 52 |
| Figura 17 | – Níveis de tensão da rede monofásica com e sem o condutor neutro | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------------|--|----|
| Tabela 1 | – Tipos de solos com seus respectivos valores de resistividade | 18 |
| Tabela 2 | – Condutores utilizados nas redes de distribuição aéreas rurais | 23 |
| Tabela 3 | – Ocorrências de choque elétrico devido a falta do condutor neutro | 29 |
| Tabela 4 | – Ocorrências dos curtos-circuitos no sistema elétrico de potência | 30 |
| Tabela 5 | – Ausência do condutor neutro nas redes de distribuição trifásica | 43 |
| Tabela 6 | – Dados das medições da rede monofásica | 51 |
| Tabela 7 | – Dados das medições da rede trifásica | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| AWG | American Wire Gauge |
| BT | Baixa Tensão |
| CA | Cabo sem alma de aço |
| CAA | Cabo com alma de aço |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| MT | Média Tensão |
| MRT | Sistema Monofásico com Retorno por Terra |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional |
| PU | Por Unidade |
| RDA | Redes de Distribuição Aéreas |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SDAT | Sistema de Distribuição de Energia de Alta Tensão |
| SDMT | Sistema de Distribuição de Média Tensão |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|-----------------------|
| A | Ampere |
| φ | Ângulo |
| Hz | Hertz |
| ΔV | Queda de tensão |
| kVA | Quilovoltampere |
| kV | Quilovolt |
| kA | Quiloampere |
| mA | Miliampere |
| Ω | Ohm |
| ρ | Resistividade do solo |
| V | Volt |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 RESISTÊNCIA ELÉTRICA | 16 |
| 2.1.1 Impedância Elétrica | 16 |
| 2.1.2 Resistividade do Solo | 17 |
| 2.1.3 Tipos de Solos | 17 |
| 2.1.4 Umidade do Solo | 18 |
| 2.1.5 Temperatura do Solo | 18 |
| 2.2 ATERRAMENTO ELÉTRICO | 19 |
| 2.2.1 Haste de Aterramento | 20 |
| 2.2.2 Função do Aterramento Elétrico | 20 |
| 2.2.3 Aterramento de Redes de Distribuição | 21 |
| 2.2.3.1 Sistema de Distribuição Com o Condutor Neutro Multi-Aterrado | 21 |
| 2.2.3.2 Condutores Utilizados nas Redes de Distribuição Aéreas Rurais | 23 |
| 2.3 ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS | 24 |
| 2.3.1 Reguladores de Tensão | 24 |
| 2.3.2 Transformador de Potência | 26 |
| 2.3.2.1 Transformador Monofásico | 26 |
| 2.3.3 Ausência do Condutor Neutro nas Redes de Distribuição Rurais | 27 |
| 2.4 CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA | 29 |
| 2.4.1 Curto-Circuito Permanente | 30 |
| 2.4.2 Curto-Circuito Temporários | 30 |
| 2.4.3 Impedância no Ponto do Curto-Circuito | 31 |
| 2.4.4 Correntes de Curto-Circuito pelo Aterramento | 31 |
| 2.5 PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA | 33 |
| 2.5.1 Classificação do Sistema de Proteção | 33 |
| 2.5.1.1 Seletividade | 33 |
| 2.5.1.2 Zonas de atuação | 33 |
| 2.5.1.3 Velocidade | 33 |
| 2.5.1.4 Sensibilidade | 34 |
| 2.5.1.5 Confiabilidade | 34 |
| 2.5.1.6 Automação | 34 |
| 2.5.2 Sistema de Proteção das Redes de Distribuição | 34 |
| 2.5.2.1 Proteção com Chaves Fusíveis | 35 |
| 2.5.2.2 Proteção com Relés | 36 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 2.5.2.3 | Proteção com Disjuntores | 36 |
| 2.5.2.4 | Proteção com Relé de Neutro | 36 |
| 2.5.2.5 | Proteção com Religador | 37 |
| 2.5.2.6 | Proteção com Para-Raios | 37 |
| 2.6 | QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA | 39 |
| 2.6.1 | Tensão em Regime Permanente | 39 |
| 2.6.2 | Variação de Tensão de Curta Duração | 39 |
| 3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 40 |
| 3.1 | REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM ESTUDO | 40 |
| 3.2 | CAUSAS QUE PROVOCAM A AUSÊNCIA DO CONDUTOR NEUTRO | 42 |
| 3.3 | COLETA DE DADOS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO | 43 |
| 3.4 | CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO | 47 |
| 3.4.1 | Rede Monofásica | 47 |
| 3.4.1.1 | Com o condutor neutro | 47 |
| 3.4.1.2 | Sem o condutor neutro | 48 |
| 3.4.2 | Rede Trifásica | 48 |
| 3.4.2.1 | Com o condutor neutro | 48 |
| 3.4.2.2 | Sem o condutor neutro | 48 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 4.1 | CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 54 |
| 5 | CONCLUSÃO | 55 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 57 |
| | APÊNDICE A AUTORIZAÇÃO COORPORATIVA | 60 |
| | APÊNDICE B CERTIFICADO DE VERIFICAÇÃO TÉCNICA DO TERRÔMETRO | |
| | ALICATE | 61 |

1 INTRODUÇÃO

A grande extensão territorial brasileira contribui para que o sistema elétrico do país obtenha complexa infraestrutura e ampla dimensão de redes aéreas de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica, sendo capaz de atender diferentes centros de consumo, possui como característica principal, ser um sistema totalmente interligado (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

As redes de distribuição de energia são responsáveis por transportar a energia das subestações até os consumidores. No Brasil utilizam-se dois sistemas de redes de distribuição, o MRT (Sistema Monofilar com Retorno por Terra) e o sistema multi-aterrado. Basicamente a diferença dos sistemas é que o multi-aterrado utiliza o condutor neutro (CEMIG, 2016).

O sistema predominante no Brasil é o sistema multi-aterrado, sendo utilizado pelas principais concessionárias de energia elétrica do país. No entanto, algumas concessionárias de energia optam pelo sistema MRT (ELEKTRO, 2014). A indisponibilidade de normas e documentos dificultam determinar qual sistema de distribuição apresenta o melhor desempenho.

Sendo assim, este trabalho busca estudar os principais elementos que compõem o sistema multi-aterrado, com intuito de comprovar a importância do condutor neutro no processo de distribuição de energia. Utilizando métodos para representar as redes com e sem o condutor neutro, para obter os resultados através das medições dos níveis de tensão, circulação de corrente e resistência de aterramento, de tal modo que evidencie a importância do estudo.

É importante ressaltar que o condutor neutro age diretamente na qualidade da energia elétrica distribuída, além de promover a confiabilidade do sistema de proteção (KINDERMANN, 1997).

A estrutura do atual trabalho encontra-se dividido em capítulos, que se inicia neste com a introdução.

No segundo capítulo apresenta-se o referencial teórico, abordando os conceitos sobre aterramento elétrico, resistividade do solo, os conceitos relacionados a aterramento de equipamentos e proteção do sistema de distribuição, seguindo com o curto-circuito no sistema elétrico de potência e os parâmetros exigidos de qualidade de energia elétrica.

O terceiro capítulo aborda os procedimentos metodológicos utilizados nas medições das redes de distribuição trifásica e monofásica, demonstrando o comportamento do condutor neutro através dos dados obtidos em campo.

Finalizando no quarto e quinto capítulo, são apresentados os resultados e discussões e a conclusão. Estes são os capítulos mais importantes, pois neles estarão descritos os resultados obtidos. Desta forma será possível verificar a importância do condutor neutro nas redes de

distribuição aéreas através de relatórios, gráficos, tabelas, ferramentas computacionais, figuras e diagramas elétricos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os conceitos que envolvem a importância do condutor neutro nas redes de distribuição rurais serão abordados no presente referencial teórico, explorando e concatenando todas as pesquisas bibliográficas sobre o tema abordado.

2.1 RESISTÊNCIA ELÉTRICA

De fato, a resistência elétrica é caracterizada por ser um obstáculo, de modo a impedir o deslocamento dos elétrons livres, uma vez que a aplicação de uma tensão propicia a passagem da corrente elétrica.

A relação da tensão e corrente aplicada, em determinados condutores, é definida pela lei de Ohm, que devido à semelhança entre as grandezas, isto é, a elevação do valor da tensão corresponder na elevação do valor da corrente e pode ser expressa em (O'MALLEY, 1993):

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

Em que:

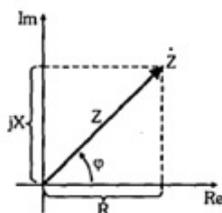
I = Corrente em (Amperes);

V = Tensão em (Volts);

R = Resistência em (Ohms).

2.1.1 Impedância Elétrica

A impedância elétrica possui a característica de impedir o fluxo de corrente alternada, de fato, se divide em dois componentes, real R “resistência” e imaginário X “reatância”, representada pela letra Z, que é medida em ohms “Ω” (MARKUS, 2001).

Figura 1: Diagrama de impedância

Fonte: (MARKUS, 2001)

$$Z = R + jX \text{ (Forma retangular)} \quad (2.2)$$

$$Z = |Z| \angle \varphi \text{ (Forma polar)} \quad (2.3)$$

A reatância “X” é formada por duas grandezas, a indutância e a capacitância, que associadas ao ângulo da impedância “Z” provocam um adiantamento ou um atraso da tensão em relação à corrente (O’MALLEY, 1993).

Quando houverem valores positivos para o ângulo da impedância, os circuitos serão denominados como circuito indutivo e para circuitos com valores negativos, estes serão denominados como circuitos capacitivos (O’MALLEY, 1993).

2.1.2 Resistividade do Solo

"Pode-se definir a resistividade do solo como a resistência elétrica medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias".(VISACRO, 2002, p. 25).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{\ell} \quad (2.4)$$

Em que:

ρ = Resistividade do solo em ($\Omega \cdot m$);

R = Resistência elétrica em (Ω);

A = Área em (m^2);

ℓ = Comprimento (m).

2.1.3 Tipos de Solos

Os valores de resistividade do solo são correspondentes aos tipos de solo existentes, de fato, no geral pode-se observar que as variações dos valores de resistividade são alteradas, gradativamente, conforme a umidade própria do solo.

Exemplos de solos evidenciam as diferentes resistividade do solo:

Tabela 1: Tipos de solos com seus respectivos valores de resistividade

| Tipo de Solo | Resistividade ($\Omega.m$) |
|--------------------|------------------------------|
| Lama | 5 a 100 |
| Húmus | 10 a 150 |
| Limo | 20 a 100 |
| Argilas | 80 a 330 |
| Terra de jardim | 140 a 480 |
| Calcário fissurado | 500 a 1.000 |
| Calcário compacto | 1.000 a 5.000 |
| Granito | 1.500 a 10.000 |
| Areia comum | 3.000 a 8.000 |
| Basalto | 10.000 a 20.000 |

Fonte: (VISACRO, 2002)

2.1.4 Umidade do Solo

A quantidade superior de água, no solo, contribui para garantir um baixo valor de resistividade. O fenômeno que envolve a condução de corrente no solo inclui a água como um fator importante no processo. A água contém íons capazes de reduzir os valores de resistividade, conforme representado na tabela 1 (KINDERMANN; MÁRIO, 1995).

Entretanto, é primordial que a água contenha uma quantidade considerável de sais para obter bons resultados de resistividade, desta forma, os solos irão atingir umidade próxima a 40% (VISACRO, 2002).

2.1.5 Temperatura do Solo

A variação da resistividade do solo influenciada pela temperatura está relacionada com dois fatores:

- O elevado valor de temperatura proporciona a redução da umidade do solo devido ao processo de evaporação da água e, conseqüentemente, resultará no aumento da resistividade. Este fenômeno ocorre de maneira mais frequente em regiões tropicais (KINDERMANN; MÁRIO, 1995).

- O solo e a água são elementos que influenciam diretamente, nos valores de resistividade. Nas circunstâncias em que a água contiver valor reduzido de temperatura, os valores de resistividade serão conseqüentemente elevados, isto é, o baixo valor de temperatura do solo irá provocar o estado sólido da água, contribuindo para altos valores de resistividade do solo (VISACRO, 2002).

Os valores de temperatura do solo devem se manter entre os 10 °C a 20 °C para assegurar baixos valores de resistividade (VISACRO, 2002).

2.2 ATERRAMENTO ELÉTRICO

Segundo a ABNT (2009), o aterramento elétrico consiste em interligar todas as partes condutoras de eletricidade à terra, utilizando um condutor para tal função.

Sendo que, interligar intencionalmente ao solo todo conjunto metálico conectado nos equipamentos elétricos, ou qualquer outro meio físico capaz de conduzir a eletricidade é o que define o aterramento elétrico. O aterramento elétrico se divide em três partes (VISACRO, 2002).

- A ligação elétrica da haste de aterramento ou eletrodo de aterramento ao sistema;
- Haste de aterramento fixado no solo;
- O solo que realiza a conexão com a haste de aterramento.

A conexão do solo ao conjunto de aterramento pode ser considerada, em diferentes situações, como por exemplo, construído em uma placa de circuito elétrico, nas partes metálicas dos motores, em computadores e no condutor neutro das redes de distribuição de energia elétrica rurais ou urbanas.

Para a utilização da haste de aterramento existem alguns critérios e procedimentos, que se aplicam de acordo com o tipo de aterramento que se deseja realizar. Quando se utiliza a instalação de haste vertical fixada no solo é fundamental neste procedimento para atingir as camadas mais internas do solo, em situações nas quais o mesmo pode obter valores reduzidos de resistividade. A instalação do eletrodo horizontal contribui para manter os potenciais elétricos dentro dos limites aceitáveis (KINDERMANN; MÁRIO, 1995).

O resultado satisfatório de um aterramento será definido de acordo com a conexão com a terra. Esta ligação está relacionada com a indutância, capacitância e a resistência que, originalmente, deve escoar as correntes de defeito para o solo e todo conjunto está representado por uma impedância.

O solo apresenta a característica de conduzir ou impedir a passagem de corrente elétrica através da haste de aterramento, esse fenômeno é definido como impedância de aterramento, que se constitui pela diferença entre a tensão elétrica injetada no solo com a corrente elétrica total do sistema (VISACRO, 2002).

De acordo com o fenômeno reativo reduzido da impedância de aterramento não se aplica o termo impedância, porém expressa o termo resistência de aterramento (VISACRO, 2002).

Para se estabelecer uma ideia da ordem de grandeza desse valor, deve considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui alta resistividade. Contudo, a seção reta do caminho percorrido por uma corrente no solo pode ser bastante ampla, de forma que, a despeito da alta resistividade do solo, sua resistência real pode ser bem pequena (VISACRO, 2002, p. 15).

2.2.1 Haste de Aterramento

A haste de aterramento é fundamental para obter os principais requisitos (ABNT, 2009):

- Proporcionar uma conexão satisfatória para o solo e o conjunto de aterramento, que de fato, garanta o escoamento da corrente de defeito;
- Garantir a resistência sobre a umidade do solo, pois a mesmo contém elementos como sais e ácidos, que podem comprometer o seu estado natural;
- Por ser um material de boa condução de corrente elétrica, este material tende a sofrer o processo de corrosão. A haste de aterramento deve inibir o máximo este processo para não alterar suas principais características elétricas;
- Na utilização da haste de aterramento se exige que a mesma obtenha uma boa resistência mecânica para realizar a fixação, em diferentes solos, e até em casos de realizar a fixação, em camadas mais internas do solo, para obter possíveis valores reduzidos de resistividade.

2.2.2 Função do Aterramento Elétrico

O aterramento é essencial para manter o funcionamento seguro dos equipamentos elétricos e a continuidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP), que garante ao ser humano trabalhar dentro dos limites de segurança aceitáveis e assegurar a atuação do sistema de proteção (KINDERMANN; MÁRIO, 1995).

As principais funções do aterramento são:

- Manter a baixa resistência de aterramento permitindo o escoamento das correntes de defeito para o solo no momento da falha do sistema;
- Permitir o funcionamento eficiente dos equipamentos de proteção, quando ocorrer falha no sistema;
- Proteger contra descargas atmosféricas, direcionando-as para terra;
- Utilizar a terra para retorno de corrente no sistema MRT (Sistema monofilar com retorno por terra). Basicamente o sistema é constituído por apenas um condutor fase, que realiza a alimentação dos transformadores de distribuição (ELEKTRO, 2014);
- Realizar a proteção contra cargas estáticas geradas nas partes metálicas dos equipamentos, direcionando-as para a terra.

2.2.3 Aterramento de Redes de Distribuição

O sistema de distribuição de energia elétrica vem crescendo gradativamente, em virtude do fornecimento, que devido a grande quantidade de consumidores atendidos, irá corresponder em uma maior demanda de carga no sistema. Entretanto, devido ao aumento no consumo de energia elétrica, existe a necessidade de que o sistema seja feito de forma segura, visando realizar uma proteção contra sobrecorrentes e sobretensões. Para realizar essas funções o sistema primário aterrado passou a ser utilizado e normatizado, a fim de obter melhores resultados técnicos e econômicos na sua utilização.

O aterramento das redes de distribuição viabiliza o sistema elétrico de modo a garantir o fornecimento de energia de uma forma segura e para um funcionamento adequado dos equipamentos do sistema.

De fato, o sistema de aterramento deve obter algumas finalidades no sistema elétrico (COPEL, 2013):

- Garantir a segurança das pessoas e aos equipamentos, que estão configurados com o sistema de aterramento;
- Proporcionar a condução de corrente;
- Resistir a variações climáticas, mantendo a resistência de aterramento estável independente do clima;
- Ter vida útil proporcional ao sistema a ser protegido.

2.2.3.1 Sistema de Distribuição Com o Condutor Neutro Multi-Aterrado

Neste sistema, o condutor neutro obtém origem na malha de aterramento da subestação de energia elétrica, na região em que realiza a interligação do sistema de distribuição de energia de alta tensão (SDAT), com o sistema de distribuição de média tensão (SDMT) e distribuído em conjunto com a rede primária, sendo utilizado na rede primária e secundária, aterrado em locais definidos no circuito, criando um sistema de baixa impedância, distribuído em todo o circuito (CEMIG, 2014).

O aterramento normal deve ser instalado alternadamente, em uma estrutura sim outra não, quando o vão for menor ou igual a 200m, independente se for estrutura estaiada. No caso de vãos maiores que 200m, devem-se aterrar todas as estruturas, tanto na rede monofásica como na rede trifásica (CEMIG, 2016, p. 132).

O condutor neutro representa o comum do sistema trifásico e monofásico na configuração estrela aterrado das redes de distribuição, sendo um ponto de referência de todas as tensões de fase do sistema elétrico (SATO; FREITAS, 2015).

Os sistemas de distribuição de energia com o condutor neutro multi-aterrado são classificados em três sistemas:

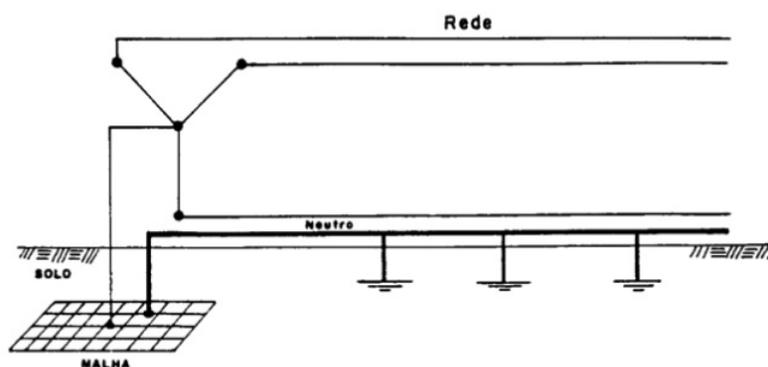
- Sistema trifásico a quatro fios, com o condutor neutro distribuído em todo o circuito e conectado a malha de aterramento da subestação de distribuição;
- Sistema monofásico, com o condutor neutro distribuído em todo o circuito, e conectado a malha de aterramento da subestação de distribuição;
- Sistema bifásico, com o condutor neutro distribuído em todo o circuito, e conectado a malha de aterramento da subestação de distribuição.

As concessionárias de energia elétrica utilizam esta configuração para sensibilizar os equipamentos de proteção. Além desta característica, o sistema com o condutor neutro aterrado (multi-aterrado) proporciona outras funções ao sistema (ABNT, 2016):

- Garante o direcionamento dos surtos a terra, envolvida no sistema elétrico, ou seja, as ondas de tensão, corrente ou potência com limitado tempo de duração;
- Proporciona o funcionamento adequado do sistema elétrico, entretanto, o condutor neutro deve ser mantido no potencial inferior a 10V de tensão em relação à terra e não atingir valores superiores a 10mA de corrente, para não comprometer o funcionamento e a segurança do sistema elétrico;
- Manter a resistência total do sistema de aterramento nos valores de 0,1 Ω a 0,3 Ω para garantir o funcionamento normal do sistema;
- Manter seguro os potenciais de passo na ocorrência de defeito. A instalação do condutor de aterramento dentro dos postes de concreto mantém o sistema seguro para eventuais potenciais de toque.

Representação do sistema de distribuição na configuração estrela está aterrado utilizando o condutor neutro multi-aterrado:

Figura 2: Rede de distribuição de energia elétrica com o condutor neutro multi-aterrado



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

É primordial a distribuição do condutor neutro no sistema na ocorrência de curto-circuito monofásico, os diversos pontos de aterramento no circuito proporcionam baixos valores de impedância para retorno de corrente elétrica através do condutor neutro, em qualquer região que houver o curto-circuito fase-terra, envolvendo o solo. Todavia, nesta situação, melhora a atuação dos dispositivos de proteção (KINDERMANN, 1997).

De fato, as concessionárias no Brasil adotam este sistema com o propósito de assegurar a proteção do sistema de distribuição, sendo que, as concessionárias que utilizam o sistema de distribuição com o condutor neutro multi-aterrado no Brasil são (RÓGER, 2006):

- ESCELSA (Espírito Santo, Centrais Elétricas S.A.);
- CEB (Companhia Energética de Brasília);
- CATAGUAZES (Companhia de Força e Luz Cataguases Leopoldina);
- CELPE (Companhia de Eletricidade de Pernambuco);
- CELPA (Centrais Elétricas do Pará);
- CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais S.A.);
- COELBA (Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia);
- AES ELETROPAULO (Eletropaulo Metropolitana de São Paulo S.A.).

2.2.3.2 Condutores Utilizados nas Redes de Distribuição Aéreas Rurais

Para os sistemas de distribuição trifásicos e monofásicos com as tensões primárias padronizadas de 13.800 volts e 7.967 volts, utilizam os condutores na fase e neutro, conforme apresentado na tabela 2 (CEMIG, 2016):

Tabela 2: Condutores utilizados nas redes de distribuição aéreas rurais

| Condutor Fase Nu CA /CAA | Condutor Neutro |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 21mm ² (4 AWG) | Fio de Aço Aluminizado 1N5 |
| 34mm ² (2 AWG) | Fio de Aço Aluminizado 1N5 (Coberto) |
| 54mm ² (1/0 AWG) | Fio de Aço Aluminizado 1N2 |
| 107mm ² (4/0 AWG) | Fio de Aço Aluminizado 3N5 |
| 170mm ² (336,4 MCM) | Fio de Aço Aluminizado 3N5 |

Fonte: (CEMIG, 2016)

As redes, que contêm distância de até 80 metros no início ou no final de uma nova extensão de rede, poderão utilizar condutores de alumínio nu sem alma de aço (CA) (CEMIG, 2016).

2.3 ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS

O aterramento dos equipamentos permite que os dispositivos de proteção desenvolvam um funcionamento eficiente no sistema elétrico e proporcionem o controle das tensões de toque e de passo dentro dos limites aceitáveis (COPEL, 2013).

Os dispositivos que devem ser aterrados são: transformadores, religadores, reguladores de tensão, chave tripolar, capacitores, blindagens de cabos isolados, mensageiro de rede compacta, caixas de controle etc.

“Devem ser usadas quantas hastes de aterramento forem necessárias, para que a resistência seja no máximo 80 Ohms” (CEMIG, 2016, p. 116).

2.3.1 Reguladores de Tensão

Naturalmente as concessionárias obtêm a responsabilidade de garantir a qualidade de energia através dos órgãos reguladores que fiscalizam o fornecimento de energia. A aplicação do regulador de tensão no sistema, melhora os níveis de tensão e também propicia um aumento no faturamento de energia elétrica para as concessionárias.

Segundo Mamede (2005), 1 % do aumento da tensão que o regulador de tensão aplica no circuito, aumenta 1,5 % no faturamento para as concessionárias.

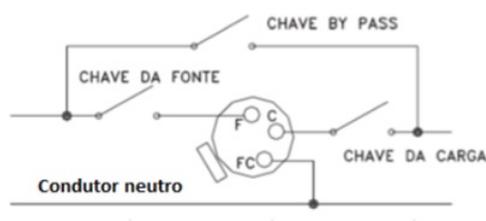
Os reguladores de tensão são aplicados em regiões mais distantes dos centros geradores para melhorar o nível de tensão das redes de distribuição e, conseqüentemente, melhoram a qualidade do fornecimento de energia elétrica (TOSHIBA, 2012).

O processo de aplicação do equipamento na rede de distribuição deve ser efetuado de acordo com a configuração do sistema elétrico, isto é, o sistema que utiliza o condutor neutro multi-aterrado, no qual a conexão do equipamento deve ser aplicada nas configurações estrela aterrado (TOSHIBA, 2012).

Exemplos de conexões do equipamento:

- Conexão do regulador em uma rede monofásica.

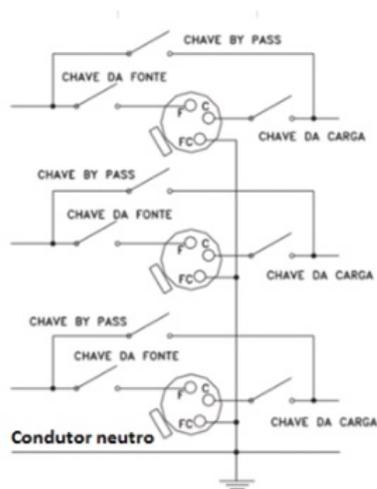
Figura 3: Diagrama de ligação monofásica do regulador de tensão



Fonte: (TOSHIBA, 2012)

- Conexão em estrela do regulador em uma rede trifásica.

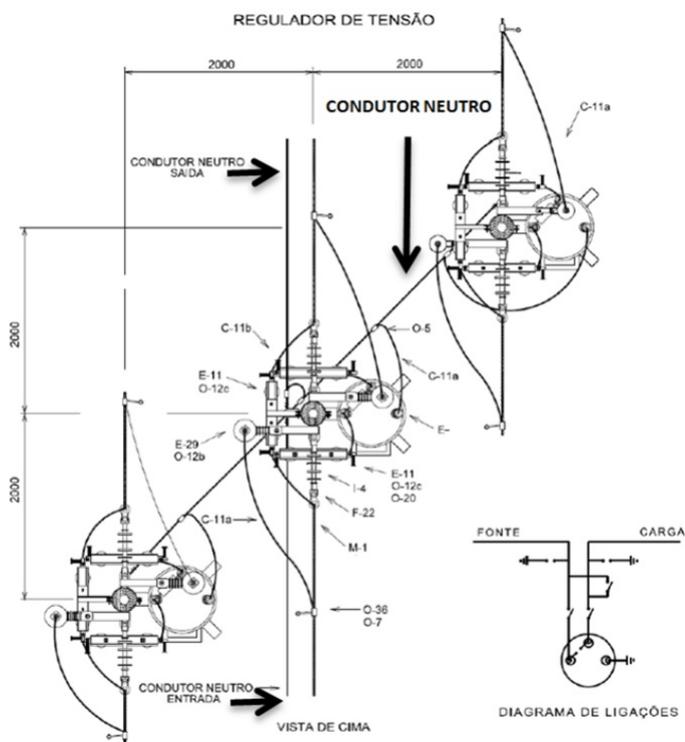
Figura 4: Diagrama de ligação trifásico do regulador de tensão



Fonte: (TOSHIBA, 2012)

De fato, é normatizada a aplicação dos reguladores de tensão nas redes de distribuição trifásicas e utilizadas na configuração estrela aterrado, conforme apresentado na figura 5 (CEMIG, 2016).

Figura 5: Diagrama de ligação trifásico do regulador de tensão na rede de distribuição



Fonte: (CEMIG, 2016)

A utilização do condutor neutro nas instalações dos reguladores de tensão garante a baixa impedância e resistência de aterramento necessária para suprir os níveis adequados para regulação de tensão do equipamento. No entanto, o condutor neutro se caracteriza por ser o ponto de referência de tensão, principalmente, na configuração estrela aterrada, conforme apresentado na figura 5.

Consequentemente, a aplicação do condutor neutro mantém a proteção contra danos à isolação e proporciona o funcionamento independente de cada regulador nas redes de distribuição (CELTINS, 2014).

2.3.2 Transformador de Potência

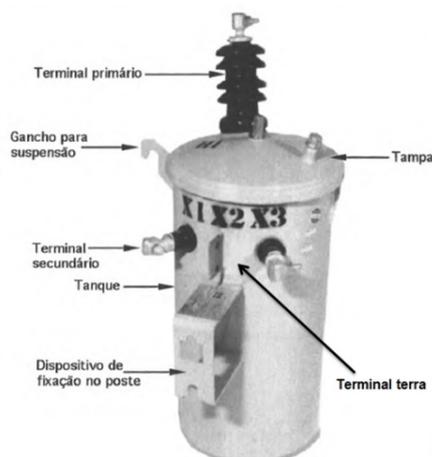
Através do fenômeno de indução eletromagnética, o transformador utiliza um circuito primário com propósito de transferir energia elétrica para um ou mais circuitos, que se caracterizam como circuitos secundário e terciário (MAMEDE, 2005).

No fornecimento de energia elétrica, as redes de distribuição são responsáveis por transportar a energia elétrica até os centros de consumo, com a aplicação dos transformadores no circuito, busca-se apropriar o nível de tensão para o consumo. Os transformadores são utilizados em todo o sistema elétrico de potência, desde a geração, que eleva a tensão para transmissão e também para redução na subtransmissão e distribuição.

2.3.2.1 Transformador Monofásico

Os transformadores monofásicos trabalham com potência até 37,5 kVA com a classe de tensão no primário de 15 kV, sendo estes formados por uma bucha no primário e uma ou mais buchas no secundário (MAMEDE, 2005).

Este tipo de transformador trabalha com a relação de transformação 7.967:127/220 (V), no secundário possui três taps, X1, X2 e X3. Sendo que, X1 e X2 fornece 127 V, X1 e X3 220 V, conforme demonstrado na figura 6.

Figura 6: Transformador monofásico

Fonte: (MAMEDE, 2005)

No entanto, o terminal terra dos transformadores monofásicos representa o local em que será realizada a conexão com o condutor neutro da rede de distribuição multi-aterrado e continuamente distribuído para o consumidor.

2.3.3 Ausência do Condutor Neutro nas Redes de Distribuição Rurais

As redes de distribuição rurais são constituídas de quatro fios, que correspondem à rede trifásica com o condutor neutro multi-aterrado formando a rede principal do circuito ou linha tronco. As redes que derivam do circuito principal correspondem às redes monofásicas com fase e neutro multi-aterrado que, subsequentemente, encaminha a energia elétrica até o consumidor.

A existência do condutor neutro assegura que todo o sistema mantenha a baixa impedância em conjunto com a interligação de todos os pontos de aterramento, incluindo os pontos dos consumidores, conforme o tópico de aterramento de redes de distribuição supracitado.

O furto de condutores elétricos representa um dos fatores que causam a ausência do condutor neutro nas redes de distribuição, por ser um metal de fácil comercialização (ROGER, 2006).

A ausência do condutor neutro nas redes de distribuição de forma explícita irá interromper o circuito de baixa impedância distribuído pelo próprio condutor. O impacto causado pela falta do condutor neutro representará a elevação do potencial do mesmo em situações em que o solo apresentar valores elevados de resistividade (RÓGER, 2006).

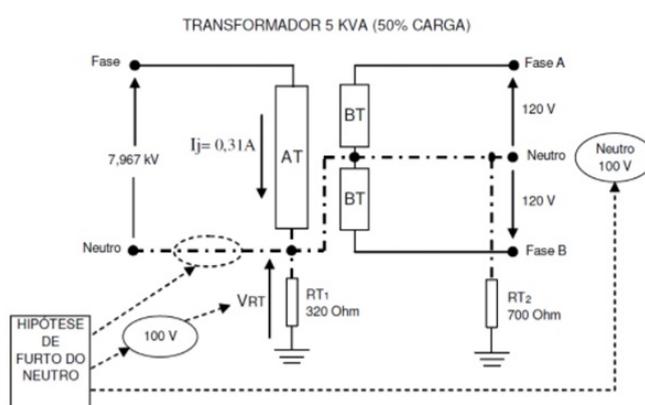
Com o condutor neutro ausente na rede de distribuição multi-aterrado, o sistema passa a atuar com a configuração alterada, que é definida como um sistema MRT (Sistema monofilar com retorno por terra). A alteração realizada criará um ponto único para o direcionamento das

correntes de carga nos aterramentos dos transformadores monofásicos em condições normais de operação.

De acordo com Róger (2006), um transformador monofásico, que atua com o carregamento em 50%, tensão aplicada no terminal primário de 7,97 kV fase-neutro, resistividade do solo de 2.000 Ω .m, 320 Ω para resistência de aterramento, com a ausência do condutor neutro o ponto terra do transformador escoa para o solo 0,31 A e cria um potencial de 100 V utilizando o condutor de aterramento do transformador para direcionar a corrente para o solo.

A figura 7 apresenta o diagrama elétrico do transformador monofásico para situação que envolve a ausência do condutor neutro na configuração de rede multi-aterrado.

Figura 7: Transformador monofásico com 50% de carregamento



Fonte: (RÓGER, 2006)

Deve-se considerar que o potencial criado no transformador com carregamento de 50% pode provocar acidentes, que envolvem o potencial de toque criado pelo terminal terra do transformador devido ao fato de um indivíduo realizar um contato direto com o aterramento.

Segundo CEMIG (2017), anualmente diversas reclamações são registradas devido a choques elétricos situados nas unidades consumidoras. Dos atendimentos realizados no ano de 2016, nove casos foram certificados que o motivo dos choques elétricos causados nas unidades consumidoras, foi em função da inexistência do condutor neutro, na derivação monofásica da rede de distribuição. Os nove casos registrados, estão citados na tabela 3.

Tabela 3: Ocorrências de choque elétrico devido a falta do condutor neutro

| Prioridade | Tipo | Serviço | Bairro | Local | ALM | Eq. |
|------------|------|-----------|--------------------|-------|---------|--------|
| A05 | RC03 | 145985612 | CORREGO CAROLAS | 4203 | CRL04 | 251076 |
| A05 | RC03 | 146179159 | CGO SAO BENTO-NAT | 4294 | CGAU03 | 430071 |
| A05 | RC03 | 146164296 | CGO INDEPENDENCIA | 4208 | LJA06 | 123907 |
| A05 | RC03 | 146117524 | FAZ SANTA CRUZ | 4242 | CRL004 | 72615 |
| A05 | RC03 | 147765374 | CGO DAS CACHOEIRAS | 4232 | INPD208 | 377043 |
| A05 | RC03 | 148122037 | C.S.VICENTE | 4216 | CGAU13 | 288151 |
| A05 | RC03 | 148269933 | CGO BARRA BRONZE | 4206 | YAN013 | 128226 |
| A05 | RC03 | 149017196 | CHUMBAO | 4207 | YAN011 | 311141 |
| A05 | RC03 | 148945445 | CGO DOS PINTOS | 4276 | CGAU02 | 9306 |

Fonte: (CEMIG, 2017)

2.4 CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Para manter o fornecimento de energia elétrica e garantir o fornecimento satisfatório para os consumidores, é relevante o conhecimento e a realização de cálculos da corrente de curto-circuito no sistema elétrico de potência (SEP), com propósito de inibir os danos causados por possíveis falhas no sistema.

O conhecimento do valor da corrente de curto-circuito, em todos os pontos do circuito, enquadra-se para estabelecer o tempo de atuação dos equipamentos de proteção no momento da falha (KINDERMANN, 1997).

O curto-circuito no sistema elétrico ocorre em lugares não definidos no circuito e estes devem ser devidamente protegidos para que não ocorra o curto-circuito de longa duração. Sendo que, o curto-circuito de longa duração provoca danos aos equipamentos elétricos, à vida útil dos condutores e aos demais componentes no sistema (KINDERMANN, 1997).

No entanto, o curto-circuito consiste na alteração elevada da corrente no sistema elétrico. Os seus efeitos devem ser de curta duração para manter o funcionamento adequado dos equipamentos elétricos. O tempo de duração deve permanecer entre 50 a 1000 ms, para que os equipamentos de proteção realizem a função de proteção no sistema elétrico em tempo hábil (MAMEDE, 2013).

O valor da corrente de curto-circuito no sistema elétrico de potência é limitado pela impedância dos componentes do sistema, que são determinados através dos transformadores, geradores e das próprias redes de distribuição e transmissão de energia elétrica (SATO; FREITAS, 2015).

De fato, os valores de curto-circuito devem ser determinados para que se conheça o efeito provocado na ocorrência do defeito no sistema (KINDERMANN, 1997).

Exemplos da importância em determinar os valores de curto-circuito:

- Descobrir a exatidão do seu valor para manter o conhecimento da falha no sistema;
- Para configuração das linhas de distribuição ou transmissão no tratamento das temperaturas elevadas, mantendo valores de curtos-circuitos suportados;
- Para configuração dos disjuntores, determinar a seção dos contatos do equipamento;
- Para configuração dos transformadores de corrente (TC), referentes à curva de magnetização, que representa a precisão do equipamento;
- Para configurar as curvas de atuação dos relés de proteção;
- Definir o tempo de operação dos relés de proteção.

Existem alguns tipos de curtos-circuitos no sistema elétrico, que independentemente da classe do curto podem propiciar falhas no fornecimento de energia elétrica. Os curtos que têm menor frequência no sistema são os curtos-circuitos trifásicos, entretanto, os curtos-circuitos monofásicos que envolvem a terra, ocorrem com maior frequência, de acordo com a tabela 4 (KINDERMANN, 1997).

Tabela 4: Ocorrências dos curtos-circuitos no sistema elétrico de potência

| Tipos de Curtos-circuitos | Ocorrência em % |
|---------------------------|-----------------|
| Trifásico | 6 |
| Bifásico | 15 |
| Bifásico-Terra | 16 |
| Fase-Terra | 63 |

Fonte: (KINDERMANN, 1997)

Segundo Sato (2015), às ocorrências dos curtos-circuitos trifásicos são de 5 %, bifásico 15 %, bifásico-terra 10 % e fase-terra 70 %.

2.4.1 Curto-Circuito Permanente

Constatando que no sistema elétrico houve um curto-circuito permanente, definitivamente, a proteção do sistema não atuou no tempo hábil para interromper o fornecimento de energia elétrica, conseqüentemente, este irá causar danos aos equipamentos e condutores no circuito, sendo necessário recurso humano para restabelecer o fornecimento de energia (KINDERMANN, 1997).

2.4.2 Curto-Circuito Temporários

Quanto à proteção do sistema elétrico interrompe o fornecimento de energia no momento da falha e o sistema consegue retornar com o fornecimento sem que ocorram danos, pode-se definir como os curtos-circuitos temporários.

Exemplos de causas que geram os curtos-circuitos temporários no sistema elétrico (KINDERMANN, 1997).

- Sobretensão no circuito, que provoca o curto-circuito entre o isolador e a ferragem que o suporta, ocasionando o arco elétrico;
- Poluição acumulada no isolador;
- Umidade;
- Chuva;
- Árvores;
- Pássaros;
- Vento;
- Neve;
- Salinidade.

2.4.3 Impedância no Ponto do Curto-Circuito

As correntes de curto-circuito fase-terra podem obter valores reduzidos no local do defeito, na circunstância em que a impedância de contato ou a resistividade do solo apresentar valores elevados, impossibilitando os valores de correntes de curto definidos, serem atingidos no sistema de proteção para o equipamento de proteção atuar.

Desconsiderar a impedância no ponto da falha, altera diretamente o tempo de atuação dos equipamentos de proteção ou, inclusive, impede a atuação dos equipamentos e portanto, criará um conjunto de valores não reais no sistema para configuração de todo o sistema de proteção.

Alguns fatores podem influenciar à impedância no ponto do curto-circuito (KINDERMANN, 1997).

- Resistência do arco elétrico, quando envolve os condutores com a terra e entre dois condutores;
- Resistência no ponto do curto-circuito por motivo da oxidação provocada no momento da falha;
- Resistência da superfície do solo;
- Resistência de terra no local do defeito.

2.4.4 Correntes de Curto-Circuito pelo Aterramento

No sistema de distribuição com o condutor neutro multi-aterado ou no cabo guarda das linhas de transmissão existe uma semelhança, quando envolve curto-circuito com a terra, os

sistemas utilizam o condutor neutro ou o cabo guarda como retorno de corrente, em conjunto com as correntes que retornam pelo solo. Entretanto, este fenômeno cria, conseqüentemente, a corrente de sequência zero (KINDERMANN, 1997).

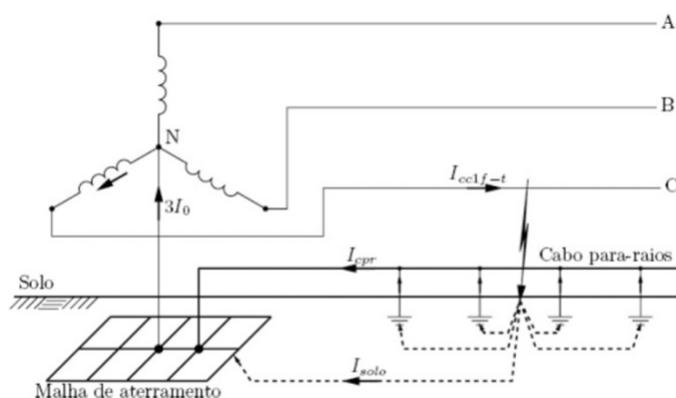
Segundo o teorema de Fortescue, que utiliza as componentes simétricas, as correntes de sequência zero são representadas, exclusivamente, em sistemas que contém o condutor neutro ou sistema aterrado.

Altos valores de impedância de aterramento limitam a corrente de curto-circuito fase-terra no sistema elétrico e provocará a diminuição da sensibilidade dos equipamentos de proteção (SATO; FREITAS, 2015).

No sistema de distribuição, independente do ponto do curto-circuito fase-terra ou bifásico-terra as correntes produzidas no momento da falha retornam para fonte através do solo, evidentemente, quando a alimentação do sistema esteja definitivamente aterrado, denominados como curto-circuito assimétricos.

O retorno da corrente de curto-circuito necessita de um circuito fechado para realizar o retorno da corrente através do solo, conforme apresentado na figura 8. Por meio de um curto-circuito fase-terra é representado a corrente de retorno pelo solo, em conjunto com o condutor neutro:

Figura 8: Circulação de corrente de curto através do condutor neutro e no solo



Fonte: (SATO; FREITAS, 2015)

O princípio de atuação do sistema de proteção emprega valores de correntes de curto-circuito para garantir que a proteção atue em tempo hábil. O sistema necessita-se de altos valores de corrente de curto-circuito, que possibilita visualizar o defeito no sistema elétrico e permitir que o equipamento de proteção realize a função com eficiência.

A distribuição do condutor neutro multi-aterrado possibilita, efetivamente, o sistema atingir altos valores de corrente de curto capaz de sensibilizar os dispositivos de proteção, devido a baixa impedância proporcionada pelo próprio condutor neutro.

2.5 PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O funcionamento do sistema elétrico está sujeito a falhas que, conseqüentemente, causam interrupções no fornecimento de energia e geram insatisfação aos consumidores em relação a qualidade da energia elétrica.

Os curtos-circuitos correspondem ao maior número de causas, que provocam interrupções no fornecimento de energia, por motivos de altos valores de correntes que o mesmo gera no circuito no momento da falha, assim como os curtos-circuitos, as sobrecargas podem provocar danos ao sistema elétrico (MAMEDE, 2013).

Evidentemente, espera-se que o sistema de proteção efetue a desconexão do sistema na ocorrência de qualquer falha no circuito ou em qualquer comportamento irregular do sistema. (MAMEDE, 2013).

2.5.1 Classificação do Sistema de Proteção

Os elementos principais, que contemplam o sistema de proteção para garantir a efetividade e qualidade do sistema de proteção:

2.5.1.1 Seletividade

Corresponde ao método realizado para assegurar que o sistema de proteção efetue a desconexão do local mais próximo de onde ocorreu o defeito, de modo a analisar, antecipadamente, a coordenação e a proteção do sistema para garantir atuação (ENERGISA, 2012).

2.5.1.2 Zonas de atuação

No momento da falha, o sistema deve ser hábil a identificar se a falha está ocorrendo dentro ou fora da região protegida. Quando a falha corresponder, conforme a configuração de atuação da proteção, o sistema de proteção irá atuar, no entanto, se a falha não corresponder com a configuração de atuação da proteção, o sistema não deverá sensibilizar (ENERGISA, 2012).

2.5.1.3 Velocidade

Considerando que seja estabelecido um valor mínimo de tempo para atuação do sistema de proteção, este deve apresentar o menor tempo para a velocidade de atuação, assegurando os casos de afundamento de tensão e possibilitando a ressincronização dos equipamentos (MAMEDE, 2013).

2.5.1.4 Sensibilidade

Garantir que o sistema de proteção atue no tempo, conforme determinado. Representando-o numericamente com finalidade de qualificar a sensibilidade da proteção, o mesmo pode ser descrito pela equação (MAMEDE, 2013):

$$N_s = \frac{I_{cmmi}}{I_{ac}} \quad (2.5)$$

Em que:

I_{cmmi} : Corrente de curto-circuito em seu valor máximo, tomado no ponto mais extremo da zona de proteção, considerando a condição de geração mínima;

I_{ac} : Valor de Corrente mínimo capaz de acionar o sistema de proteção.

Para representar um valor de sensibilidade satisfatório deve considerar que $N_s < 2$.

2.5.1.5 Confiabilidade

Corresponde a confiança transmitida para o sistema de proteção e este realize as funções a qual foram repassadas, procedendo com segurança e exatidão (MAMEDE, 2013).

2.5.1.6 Automação

A automação representa a forma em que o sistema de proteção obtém a performance de efetuar as próprias funções, de maneira autônoma. As falhas que ocorrem no sistema elétrico são sensibilizadas, exclusivamente, pelo sistema de automação sem que haja necessidade de recurso humano.

2.5.2 Sistema de Proteção das Redes de Distribuição

As redes de distribuição, em geral, possuem longa extensão com finalidade de atender aos consumidores rurais e urbanos, por essa razão as redes são expostas a diversas falhas.

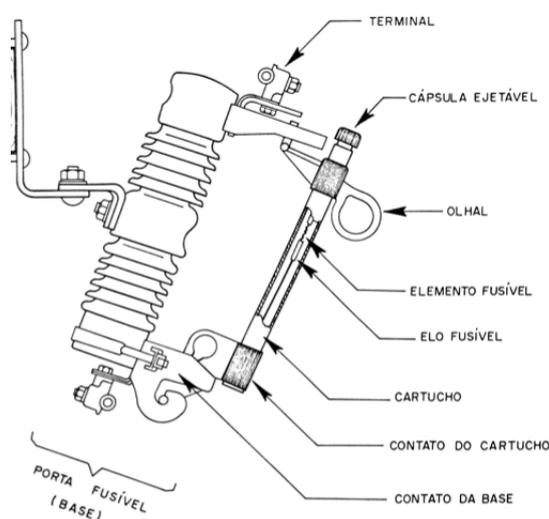
Para continuidade do fornecimento de energia elétrica faz-se necessário definir e realizar um projeto de redes de distribuição, buscando minimizar as falhas ocorridas no sistema. O projeto de redes também determina os pontos de instalação dos equipamentos de proteção, que são definidos como chaves fusíveis, religadores e seccionadores.

2.5.2.1 Proteção com Chaves Fusíveis

As chaves fusíveis consistem no equipamento aplicado nas redes de distribuição rurais e urbanas por apresentar preço reduzido e serem capazes de atender amplamente os critérios de proteção (MAMEDE, 2013).

A chave fusível ou corta-circuito consiste no equipamento formado por diversas partes e todo o conjunto recebe o elo fusível, sendo o componente de proteção da chave, o mesmo se encontra no interior do cartucho (ELETROBRÁS, 1982).

Figura 9: Chave Fusível



Fonte: (ELETROBRÁS, 1982)

Naturalmente, o elo fusível permanece instalado no cartucho e é aplicado na chave. Para assegurar o rompimento do circuito, existe uma cobertura no filamento do elo fusível que libera gases necessários para interromper a ionização do ar (ELETROBRÁS, 1982).

Os elos fusíveis são modificados para atuarem em diferentes tempos e correntes, quando aplicados nas redes, definidos em três tipos (MAMEDE, 2013):

- Tipo H: Aplicados exclusivamente na proteção dos transformadores por exercer propriedade gradativamente lenta de operação. Possui correntes nominais: 0,5A – 1A – 2A – 3A – 5A;

- Tipo K: Aplicados em derivações da rede tronco dos alimentadores, obtém a característica de tempo rápido de operação. São classificados em dois tipos: preferenciais e não preferenciais. A existência de dois tipos de elos fusíveis define a aplicação separada para quando estes forem utilizados na coordenação do circuito. Os elos fusíveis preferenciais possuem correntes nominais: 6A – 10A – 15A – 25A – 40A – 65A – 100A – 140A – 200A e os elos fusíveis não preferenciais possuem correntes nominais: 8A – 12A – 20A – 30A – 50A – 80A;

- Tipo T: possui a característica de operação lenta, valores de correntes nominais é semelhante a do elo fusível do tipo K.

2.5.2.2 Proteção com Relés

Nas redes de distribuição, os relés são aplicados atribuindo várias funções de proteção no sistema elétrico, sendo classificadas em: sobrecarga, curto-circuito, sobretensão, subtensão etc. Os diversos tipos de relés existentes contêm funções únicas definidas para cada tipo (MAMEDE, 2013).

Os relés são dispositivos capazes de monitorar todos os tipos de grandezas elétricas no sistema, sejam: tensões, correntes, frequência, potências etc (ELETROBRÁS, 1982).

2.5.2.3 Proteção com Disjuntores

Os disjuntores estão situados nas saídas dos alimentadores das redes de distribuição para efetuar a proteção do sistema elétrico (MAMEDE, 2013).

De fato, os disjuntores recebem informações atribuídas pelos relés e, conseqüentemente, estes realizam a abertura e o fechamento do circuito mecanicamente (ELETROBRÁS, 1982).

2.5.2.4 Proteção com Relé de Neutro

A princípio, o relé de neutro depende de fatores que influenciam diretamente a operação do equipamento no sistema elétrico. Deve-se, exclusivamente, prever a faixa de máximo valor de desequilíbrio da corrente nos condutores fase para circular a corrente necessária no ponto neutro para o relé atuar, valores que devem corresponder de 10 a 30 % da máxima corrente de carga. Outro fator, corresponde ao menor valor possível de corrente de curto-circuito fase-terra necessário para realizar um desempenho satisfatório (ENERGISA, 2012).

Situações críticas são destacadas na função de proteção do relé por ocorrência de curto-circuito fase-terra, quando ocorre defeito monopolar com alta resistência de contato ou elevado valor de resistividade do solo, que impede o relé de atingir os valores de corrente suficientes para o dispositivo atuar (MAMEDE, 2013).

Esse fato é muito comum nas redes aéreas de distribuição, quando o condutor vai ao solo que possui elevada resistência superficial, como é o caso de ruas asfaltadas e calçamentadas, e até mesmo quando o condutor fica preso aos galhos de alguma árvore que se desenvolve debaixo da rede aérea (Mamede, 2013, p. 265).

As condições salientadas a respeito das limitações impostas para o dispositivo de proteção atuar, na ocorrência de defeito monopolar ou defeito fase-terra, destaca-se está situação quando

ocorre na rede de distribuição com o condutor neutro multi-aterrado. Devido aos vários pontos de aterramento no sistema em conjunto com a baixa impedância proporcionada unicamente pelo condutor, contribuem para o desempenho satisfatório do sistema de proteção, adequando as correntes de defeito necessária para o dispositivo de proteção atuar.

2.5.2.5 Proteção com Religador

De modo autônomo, o religador apresenta a característica de abrir e fechar o circuito automaticamente no momento das falhas de regime transitório, isto é, as falhas de curta duração. Realizando a proteção do trecho para o qual foi definido, atuando nas ocasiões de sobrecorrente no sistema de distribuição (ELETROBRÁS, 1982).

Os religadores são configurados para atuar em quatro operações (ELETROBRÁS, 1982):

- Uma rápida e três lentas;
- Duas rápidas e duas lentas;
- Três rápidas e uma lenta;
- Todas lentas.

O religador contém a proteção de neutro, que apresenta as configurações similares às destacadas no capítulo anterior. Porém, o religador possui todo o conjunto de proteção e controle localizado em uma única unidade (MAMEDE, 2013).

2.5.2.6 Proteção com Para-Raios

As redes de distribuição aéreas (RDA) são expostas às descargas atmosféricas diretas e indiretas, que provocam as sobretensões transitórias no sistema elétrico. Entretanto, as sobretensões no sistema elétrico não são causadas apenas por descargas atmosféricas, mas também podem ser provocadas em manobras de chaves seccionadoras e disjuntores. As sobretensões causam danos aos equipamentos e aos demais elementos que compõem o sistema (MAMEDE, 2005).

Para efetuar a proteção no sistema elétrico os para-raios utilizam elementos que contém a característica de não-linearidade, formados por: carbonato de silício ou óxido de zinco, atuando quando são submetidas as correntes de descarga em conjunto com as tensões induzidas (MAMEDE, 2005).

A resistência não linear é exclusiva para proteção contra sobretensão, ou seja, atribui baixa resistência nas situações de surto atmosférico no sistema e alta resistência para as correntes provocadas no curto-circuito (ELETROBRÁS, 1982).

Atualmente, os para-raios são aplicados nas redes de distribuição com elemento não

linear constituído por varistores, formado por óxido de zinco. Existem dois tipos de estruturas para os para-raios, a porcelana e o polimérico, porém se utilizam os poliméricos por assegurar a vedação do elemento não linear constituído no interior do equipamento, proporcionando maior vida útil para o elemento (MAMEDE, 2005).

Estudos realizados pela empresa General Eletric em vínculo com oito concessionárias norte-americanas, com intuito de analisar qual melhor utilização dos para-raios nas redes de distribuição, efetuaram três procedimentos para analisar o desempenho do equipamento (ELETROBRÁS, 1982).

- Cabos de para-raios protegendo o sistema;
- Para-raios instalados apenas na fase superior;
- Para-raios instalados nas três fases.

Conclui-se que os resultados obtidos com os pára-raios instalados nas três fases apresentam melhor desempenho em relação aos outros dois procedimentos supracitados, por assegurar a operação dos para-raios, independentemente, do espaçamento do aterramento entre as estruturas. Outro fator importante é a alteração da resistência de aterramento na faixa de 10Ω a 100Ω , que não influenciou no desempenho do equipamento. Até o momento atual está padronizada a utilização dos para-raios nas três fases (ELETROBRÁS, 1982).

Os para-raios detêm a função de proteger o sistema elétrico contra as sobretensões transitórias e, por consequência, reduzem o tempo de duração das elevadas correntes em sequência (ELETROBRÁS, 1982).

De acordo com os valores das sobretensões e do tipo do sistema de aterramento utilizado pode se definir a tensão nominal do para-raio. O sistema com o condutor neutro multi-aterrado, que proporciona adequada circulação de corrente de curto-circuito fase-neutro, diminui as sobretensões no sistema elétrico nas situações de descargas induzidas (ELETROBRÁS, 1982).

As descargas induzidas têm origem, quando ocorrem descargas atmosféricas próximas às redes de distribuição denominadas como descargas indiretas, nas quais se obtêm valores de 500 kV de sobretensão no sistema elétrico. No sistema de distribuição são mais influenciadas as falhas na isolação, por operarem com tensão igual ou inferior a 69 kV. No entanto, a existência do condutor neutro multi-aterrado proporciona aproximadamente a redução de 70% das descargas induzidas (MAMEDE, 2005).

As descargas indiretas ocorrem com mais frequência no sistema elétrico, entretanto, as descargas diretas ocorrem com pouca frequência no sistema elétrico devido à proteção dos edifícios e árvores, que se encontram próximas às redes de distribuição.

Quando os para-raios ficam submetidos a tensões superiores à sua nominal, como no caso de curtos-circuitos monopolares, em sistemas cujo neutro não está efetivamente aterrado, estão sujeitos a falhas (Mamede, 2015, p. 32).

Evidentemente, os curto-circuitos monopolares provocam sobretensão nas fases que estão em condições normais de operação, desta forma, irá ocorrer apenas em sistemas trifásicos (MAMEDE, 2005).

2.6 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

As falhas no sistema elétrico em conjunto com as variações dos níveis de tensões, são fatores que influenciam diretamente os indicadores que avaliam os índices de qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Devido às exigências em relação à continuidade no fornecimento de energia elétrica, faz-se necessário estabelecer parâmetros com o propósito de garantir o fornecimento de energia permanentemente estável.

2.6.1 Tensão em Regime Permanente

Os valores de tensão nominal do sistema de distribuição são avaliados seguindo os procedimentos realizados através de medições de tensão, com intuito de analisar o desempenho caso ultrapassem os valores definidos em situações normais de operação (ANEEL, 2016).

Nos níveis padrões de tensão para o fornecimento de energia elétrica acima de 1 kV, as concessionárias têm a responsabilidade de manter conforme os limites definidos a seguir (ELETROBRÁS, 1982):

- Nível máximo permitido – 13,8 kV + 5% ou 14,5 kV;
- Nível mínimo permitido – 13,8 kV – 5% ou 13,1 kV.

2.6.2 Variação de Tensão de Curta Duração

A variação de tensão de curta duração (VTCD), é a alteração da tensão eficaz do sistema para valores inferiores a 0,9 pu ou para valores superiores a 1,1 pu, em um período inferior a um minuto (KAGAN; CÉSAR; JOÃO, 2005).

Segundo a ANEEL (2016), a VTCD consiste na variação da amplitude da tensão eficaz em um período inferior a três minutos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com base nos estudos realizados no referencial teórico, serão definidos os métodos para investigar o comportamento da rede de distribuição com a ausência do condutor neutro e com o condutor existente no sistema. Conforme destacado teoricamente a importância do condutor no contexto do referencial teórico, os procedimentos metodológicos irão explorar claramente as situações em que o sistema de distribuição procede nos dois modelos de rede em função do condutor neutro.

O Método utilizado para analisar o comportamento do sistema com e sem o condutor neutro, foi em definir uma rede de distribuição rural (RDR) monofásica e uma (RDR) trifásica para o estudo ser realizado.

3.1 REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM ESTUDO

Em uma derivação monofásica identificada pela chave fusível 199533 no início e o transformador 107267 monofásico de 5 kVA no final. Esta derivação se encontra conectado na fase C do alimentador CGAU 02, na subestação de energia elétrica localizada no município de Caratinga. Desta forma, foram coletados os seguintes dados para realização do estudo (GEMINI, 2017):

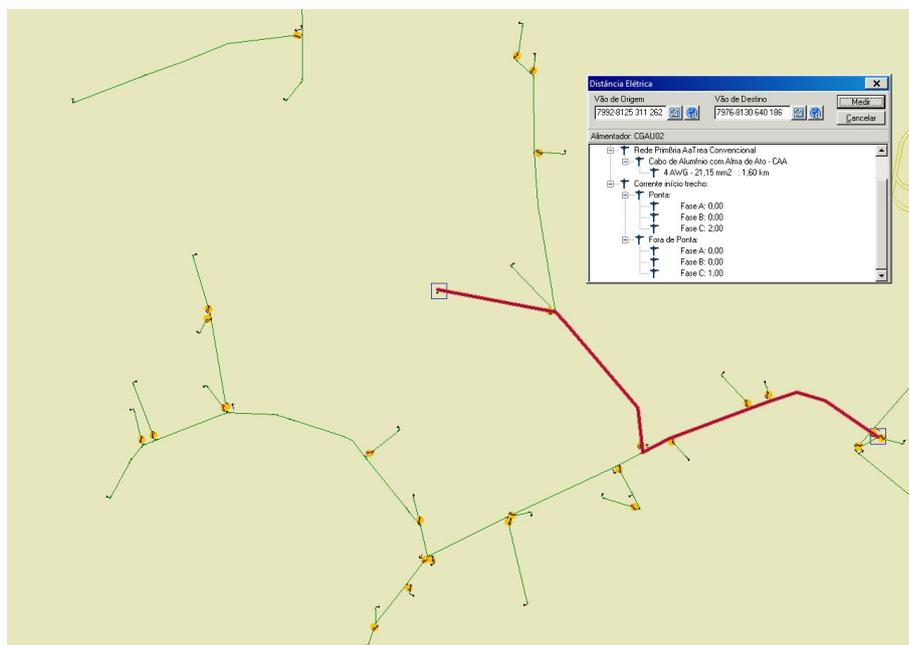
- Condutor fase: CAA 21mm² (4 AWG);
- Condutor neutro: CAA 21mm² (4 AWG);
- Comprimento: 1,60 km;
- Nível de tensão fase-terra: 7.967 kV;
- Classe de tensão: 15 kV;
- Carregamento do transformador: 25 %.

A rede de distribuição rural trifásica possui a chave fusível 30141 no início da derivação e o transformador 30141 trifásico de 75 kVA no final do alimentador CGAU 013. Esse alimentador se inicia na subestação do município de Caratinga e possui os seguintes dados (GEMINI, 2017):

- Condutor fase: CAA 21mm² (4 AWG);
- Condutor neutro: CAA 21mm² (4 AWG);
- Comprimento: 180 m;
- Nível de tensão fase-terra: 7.967 kV;
- Classe de tensão: 15 kV;

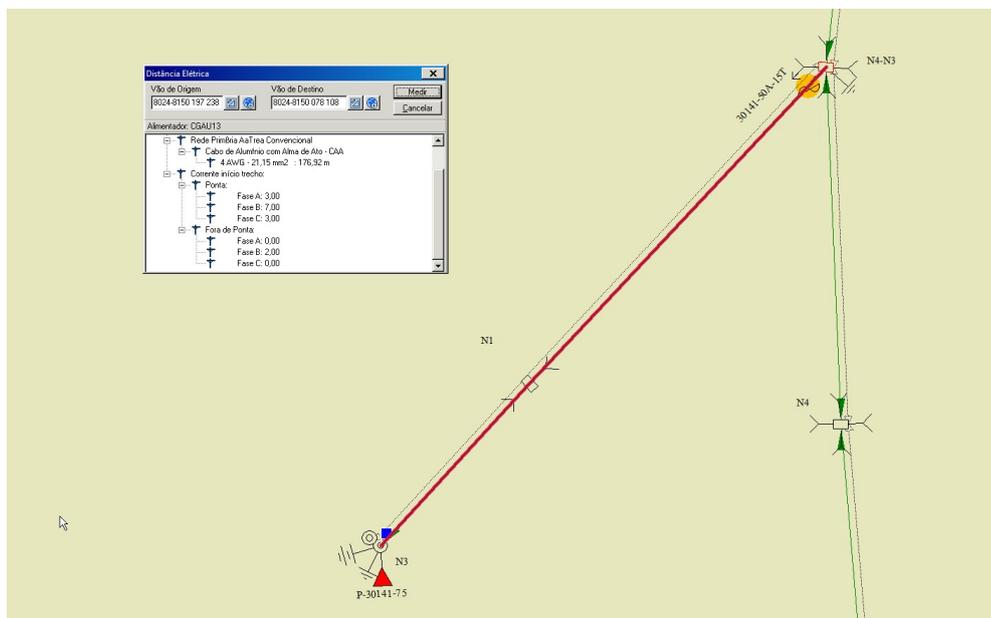
- Carregamento do transformador: 104 %.

Figura 10: Diagrama elétrico da rede de distribuição monofásica



Fonte: (GEMINI, 2017)

Figura 11: Diagrama elétrico da rede de distribuição trifásica



Fonte: (GEMINI, 2017)

3.2 CAUSAS QUE PROVOCAM A AUSÊNCIA DO CONDUTOR NEUTRO

A princípio, conforme destacado no referencial teórico, uma das causas que originam a ausência do condutor neutro nas redes de distribuição principalmente nas áreas rurais, se dá nas práticas de furto. Evidentemente, isso acontece devido o tipo de condutor utilizado nas redes de distribuição, um metal de fácil comercialização.

Outra situação que provoca a ausência do condutor neutro nas redes de distribuição, principalmente nas RDR monofásica, são os contatos com pássaros. E quando se deslocam causam o curto-circuito, devido o contato entre os condutores.

Os procedimentos para definir se a causa do problema são pássaros, se inicia com o primeiro atendimento de uma equipe de manutenção que deverá retornar com o fornecimento de energia elétrica e verificar as possíveis falhas.

Quando asseguram que a causa das falhas no sistema são pássaros, nas situações que envolvem curto-circuito, aplicam-se três procedimentos procurando obter a melhor solução para sanar o defeito e inibir as falhas que estão causando as interrupções no fornecimento de energia.

Exemplo das soluções aplicadas:

- Calibrar os condutores fase e neutro, aumentando a distância entre os condutores;
- Substituir o condutor neutro por fio alumizado 1N5 isolado;
- Retirar o condutor neutro.

Quando o comprimento do vão em metros dos condutores forem extensos, há opção de aplicar o método de calibrar os condutores fase e neutro. No entanto, o método é limitado, pois em algumas situações o condutor neutro poderá ficar muito baixo, causando uma situação de risco.

Uma das alternativas eficientes em relação ao curto-circuito provocado pelo contato dos condutores fase e neutro, se dá na substituição do condutor neutro nu por um fio aluminizado isolado. Porém o condutor não é padronizado no processo de projetos de redes de distribuição, ou seja, essa situação limita a disponibilidade do condutor neutro isolado uma vez que não há demanda planejada, mas apenas emergenciais.

Mediante o processo representado anteriormente com relação à disponibilidade do condutor neutro isolado, um dos recursos utilizados na correção da falha causada pelos pássaros, consiste na retirada do condutor neutro, resultando em uma solução satisfatória. Tudo isso, devido ao fato de não ocorrer o curto-circuito que é provocado quando os condutores entram em contato.

No entanto, a falta do condutor neutro nas redes de distribuição trifásica, é evidenciado durante as inspeções visuais. Essas inspeções são realizadas em decorrência de falhas, com intuito de registrar todas as anormalidades da rede de distribuição.

Anualmente são realizadas inspeções nas redes de distribuição trifásicas principais, denominadas como rede tronco, registrando todas as anormalidades encontradas. Desta forma são elaboradas as manutenções preventivas, evitando eventuais falhas que podem comprometer o fornecimento de energia elétrica.

No primeiro semestre do ano de 2017, foram inspecionados 774 quilômetros de redes de distribuição rurais trifásica de posse CEMIG e diante das anormalidades registradas, vários trechos apresentavam a ausência do condutor neutro na rede, conforme a tabela 5.

Tabela 5: Ausência do condutor neutro nas redes de distribuição trifásica

| NS | Descrição | Qtde | Equipamento | Local | Sub/Alim |
|----------|----------------------------------|------|-------------|------------|----------|
| 56514484 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 255966 | CARATINGA | CGAU012 |
| 56508569 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 30227 | TARUMIRIM | ENC 012 |
| 56506430 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 196078 | TARUMIRIM | ENC 012 |
| 56504071 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 211214 | CARANGOLA | CRL 004 |
| 56508512 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 30846 | FERVEDOURO | CRL 006 |
| 56510686 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 305674 | IMBE | INPD208 |
| 56514650 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 31934 | CARATINGA | CGAU012 |
| 56548836 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 31877 | CAIANA | CRL 013 |
| 56566443 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 28264 | MUTUM | LJA 008 |
| 56565890 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 30294 | TARUMIRIM | ENC 012 |
| 56565875 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 30294 | TARUMIRIM | ENC 012 |
| 56565488 | CABO NEUTRO RDR REINSTALAR - VAO | 1 | 250535 | CARATINGA | CGAU002 |

Fonte: (CONDIS, 2017)

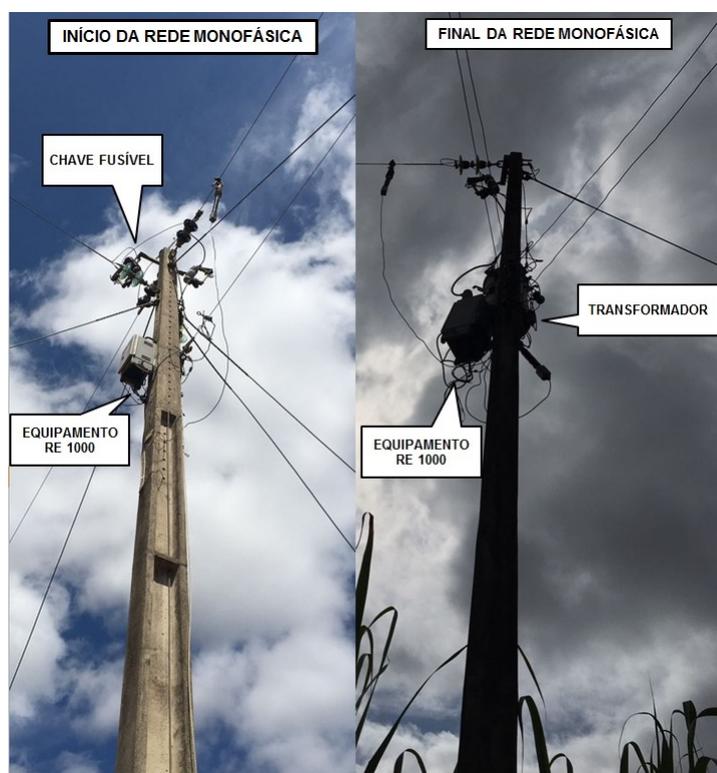
3.3 COLETA DE DADOS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Para efetuar a coleta de dados foi necessário instalar um equipamento de medição na rede de distribuição. A princípio, foi escolhido uma rede de distribuição monofásica que se apresentava sem o condutor neutro.

O equipamento utilizado foi dois RE 1000, que é um analisador das grandezas elétricas

tensão e corrente. O equipamento foi instalado na rede de média tensão.

Figura 12: Medição utilizando o equipamento RE 1000



Fonte: (Acervo do Autor)

Feito isso, não logrou-se êxito nas medições da rede monofásica que apresentava sem o condutor neutro por diversos fatores:

- O equipamento RE 1000 possui duas alimentações, uma alimentação interna para armazenar as medições na memória e outra externa para acionar as funções e configurações. O equipamento ficou instalado durante sete dias e um dos equipamentos perdeu todos os registros, devido ao descarregamento da bateria de 9 v da memória, impossibilitando a extração dos dados.
- No período em que o equipamento estava instalado foi identificado a falta do condutor neutro em um vão da rede tronco, que interligava a rede que estava sob medição, tornando irrelevante os possíveis resultados obtidos nas medições.
- Devido à rede estar localizada no distrito de Novo Horizonte que pertence ao município de Inhapim, tornando inacessível o deslocamento e no acesso à rede.

Diante das diversas dificuldades encontradas optou-se por realizar as medições em uma rede monofásica próxima à subestação de Caratinga, garantindo a continuidade do condutor neutro até o ponto da rede sob medição.

No entanto, para representar a rede totalmente sem o condutor neutro, houve a necessidade de romper o condutor intencionalmente em dois pontos elétricos, na conexão com o

aterramento do transformador da unidade consumidora e a 1,6 KM de rede, isto para rede monofásica.

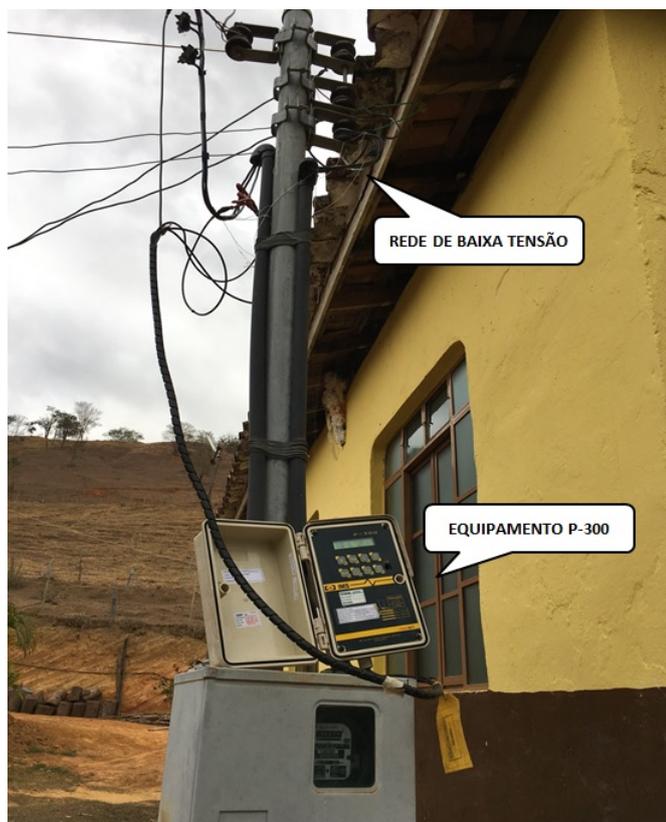
Figura 13: Rompimento do condutor neutro na rede monofásica



Fonte: (Acervo do Autor)

O equipamento utilizado para realizar as medições desta vez foi o P-300, que é um medidor de energia elétrica capaz de armazenar os níveis de tensão. O equipamento foi instalado na baixa tensão da unidade consumidora.

Alterando os parâmetros de leitura do equipamento, o mesmo demonstra em seu visor e nos dados armazenados, os valores de média tensão, facilitando a análise dos resultados.

Figura 14: Equipamento P-300 instalado na baixa tensão

Fonte: (Acervo do Autor)

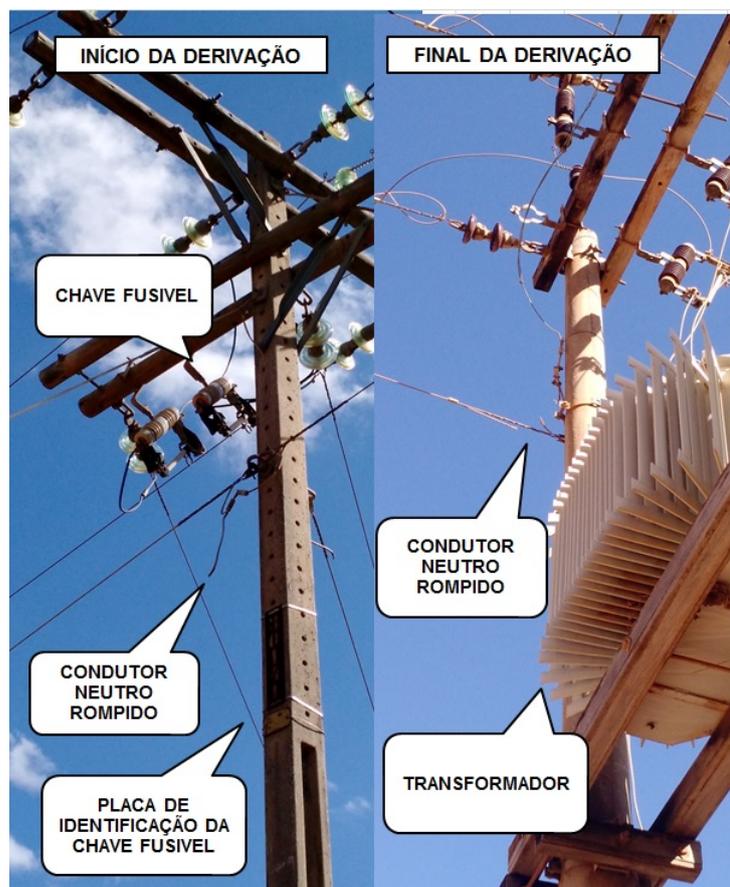
Em conjunto com as medições de tensão, realizou-se as medições de resistência de aterramento e circulação de corrente utilizando o equipamento terrômetro alicate.

O terrômetro alicate é um equipamento que realiza as medições de corrente e resistência elétrica, utilizando o princípio de queda tensão em um circuito fechado.

Inicialmente, foram realizadas as medições de tensão, circulação de corrente e resistência de aterramento, no período de uma hora com o condutor neutro. Com a rede sem o condutor neutro, foram efetuadas as mediações no período de 15 minutos, para não causar possíveis falhas nas demais unidades consumidoras conectadas no mesmo condutor neutro.

Na rede de distribuição trifásica, também foram utilizados os procedimentos supracitados. Porém, o equipamento ficou instalado no período de dois dias, coletando dados constantemente. Entre os dois dias de medição, foi rompido o condutor neutro intencionalmente em dois pontos elétricos.

No instante em que houve o rompimento do condutor neutro, a rede de distribuição trifásica apresentava-se com 176 metros de rede sem o condutor neutro em uma única unidade consumidora.

Figura 15: Rompimento do condutor neutro na rede trifásica

Fonte: (Acervo do Autor)

Após ter realizado as medições nas redes de distribuição monofásica e trifásica, foram extraídos os dados da medição de tensão através do *software* próprio do equipamento p-300, SOFTWARE SMART ANALISADOR P300.

3.4 CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO

Com os dados obtidos através das medições em conjunto com dados do *software* GEMINI, foi analisado os níveis de tensão das redes de distribuição, realizando os cálculos de queda de tensão com e sem o condutor neutro.

3.4.1 Rede Monofásica

3.4.1.1 Com o condutor neutro

Para calcular a queda de tensão temos os seguintes dados:

A tensão de entrada apresenta em 103 % em relação à tensão nominal do sistema que é 7.967 V.

Tensão de entrada: 8.206 V (V_i).

Tensão de saída: 7.653 V (V_f).

$$\Delta V = 1 - \frac{V_f}{V_i} = \frac{7.653V}{8.206V} = 6,738\% \quad (3.1)$$

3.4.1.2 Sem o condutor neutro

Para calcular a queda de tensão na rede sem o condutor neutro temos os seguintes dados:

Tensão de entrada: 8.206 V (V_i).

Tensão de saída: 7.506 V (V_f).

$$\Delta V = 1 - \frac{V_f}{V_i} = \frac{7.506V}{8.206V} = 8,530\% \quad (3.2)$$

3.4.2 Rede Trifásica

3.4.2.1 Com o condutor neutro

Para analisar o desempenho da rede trifásica foi considerado as transgressões dos níveis de tensão apenas na Fase A do sistema, devido às cargas estarem equilibradas.

A tensão no início da derivação apresentava em 102 % em relação à tensão nominal do sistema.

Para calcular a queda de tensão temos os seguintes dados:

Tensão de entrada: 8.126 V (V_i).

Tensão de saída: 8.056 V (V_f).

$$\Delta V = 1 - \frac{V_f}{V_i} = \frac{8.056V}{8.126V} = 0,864\% \quad (3.3)$$

3.4.2.2 Sem o condutor neutro

Para calcular a queda de tensão na rede sem o condutor neutro temos:

Tensão de entrada: 8.126 V (V_i).

Tensão de saída: 7.996 V (Vf).

$$\Delta V = 1 - \frac{V_f}{V_i} = \frac{7.996V}{8.126V} = 1,600\% \quad (3.4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ausência do condutor neutro na rede aumentou a resistência de aterramento do transformador de cada unidade consumidora, evidenciado conforme as medições e os resultados demonstrado nas tabelas 6 e 7, que compartilha também os resultados obtidos nas medições de circulação de corrente e níveis de tensão.

A conformidade dos níveis de tensão do sistema monofásico está relacionada com dois elementos principais, sendo este o condutor neutro e um adequado aterramento elétrico, que em conjunto proporcionam uma baixa impedância para o sistema.

Desta forma, a queda de tensão ocorrida pela ausência do condutor neutro na rede monofásica foi um dos fatores fundamentais para comprovar a importância do condutor.

O único ponto elétrico de aterramento na unidade consumidora apresentado devido a ausência do condutor neutro, intensificou a circulação de corrente. A interação da resistência de aterramento com a circulação de corrente indica que são diretamente proporcionais, isto para rede monofásica, onde houve a alteração excessiva da resistência de aterramento.

O cálculo de queda de tensão confirma o resultado obtido na medição de tensão, principalmente da rede monofásica, comprovando que a queda de tensão na rede ocorreu em função da inexistência do condutor neutro.

A alteração da resistência de aterramento da rede de distribuição trifásica não elevou a valores excessivos e com as cargas da unidade consumidora estritamente equilibrada. Evidentemente, não houve alteração da circulação de corrente pelo aterramento do transformador, mantendo os níveis de tensão adequados.

A seguir, as tabelas 6 e 7 apresentam os dados das medições realizadas em campo na rede trifásica e monofásica.

Tabela 6: Dados das medições da rede monofásica

| Rede de Distribuição Monofásica | |
|---|----------------|
| Com o condutor neutro | |
| Nível de tensão | 7.653 V |
| Resistência de aterramento do transformador | 35.11 Ω |
| Circulação de corrente | 40.37 mA |
| Sem o condutor neutro | |
| Nível de tensão | 7.506 V |
| Resistência de aterramento do transformador | 90 Ω |
| Circulação de corrente | 232 mA |

Fonte: (Acervo do Autor)

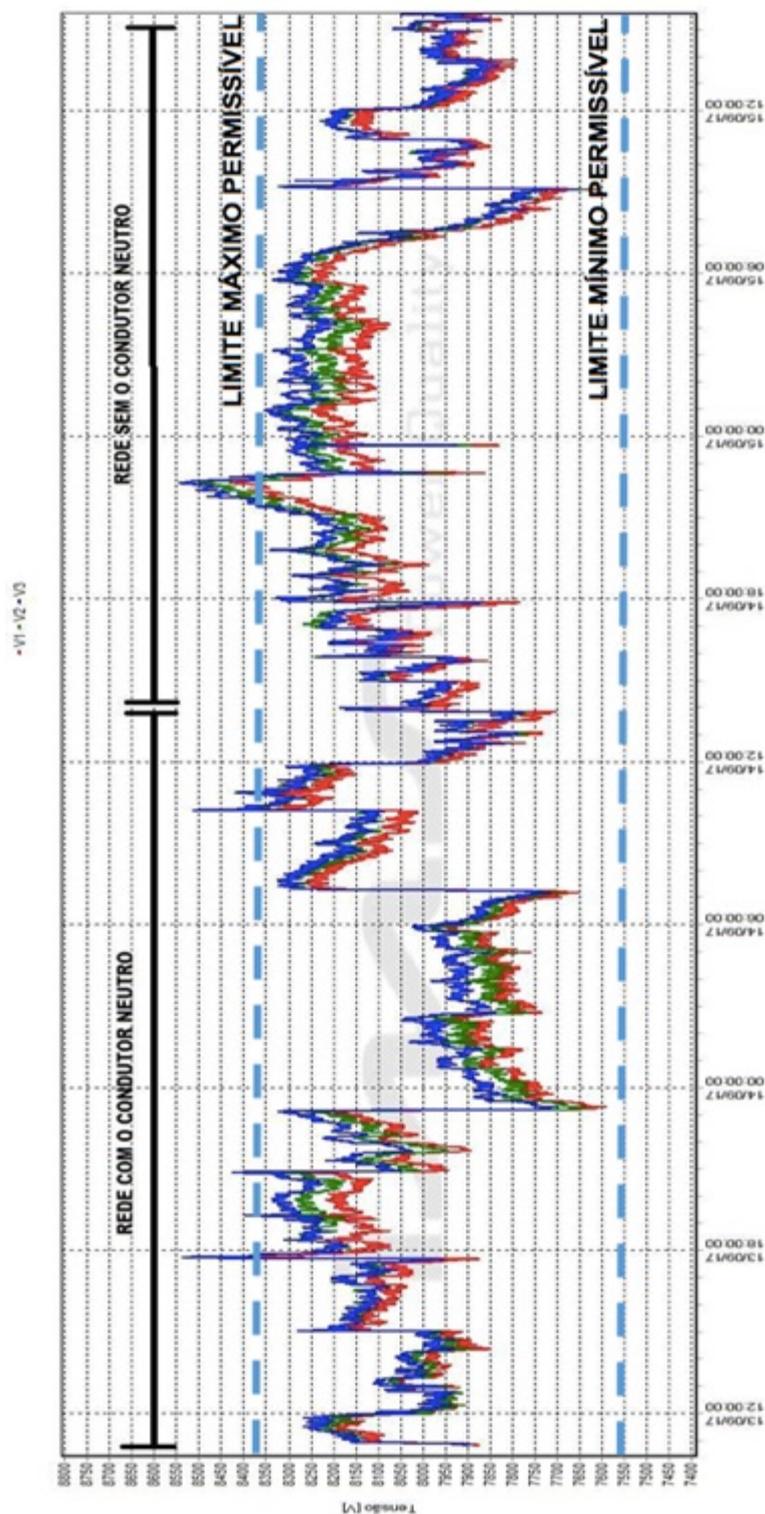
Tabela 7: Dados das medições da rede trifásica

| Rede de Distribuição Trifásica | |
|---|-------------|
| Com o condutor neutro | |
| Nível de tensão - Fase A | 8.056 V |
| Nível de tensão - Fase B | 8.097 V |
| Nível de tensão - Fase C | 8.112 V |
| Resistência de aterramento do transformador | 7 Ω |
| Circulação de corrente | 1.75 mA |
| Sem o condutor neutro | |
| Nível de tensão - Fase A | 7.996 V |
| Nível de tensão - Fase B | 8.055 V |
| Nível de tensão - Fase C | 8.054 V |
| Resistência de aterramento do transformador | 12 Ω |
| Circulação de corrente | 1.75 mA |

Fonte: (Acervo do Autor)

A figura 16 apresenta os níveis de tensão graficamente da unidade consumidora da rede trifásica durante os dois dias de medição com e sem o condutor neutro. Pode-se verificar, que as cargas estão estritamente equilibradas nas duas situações.

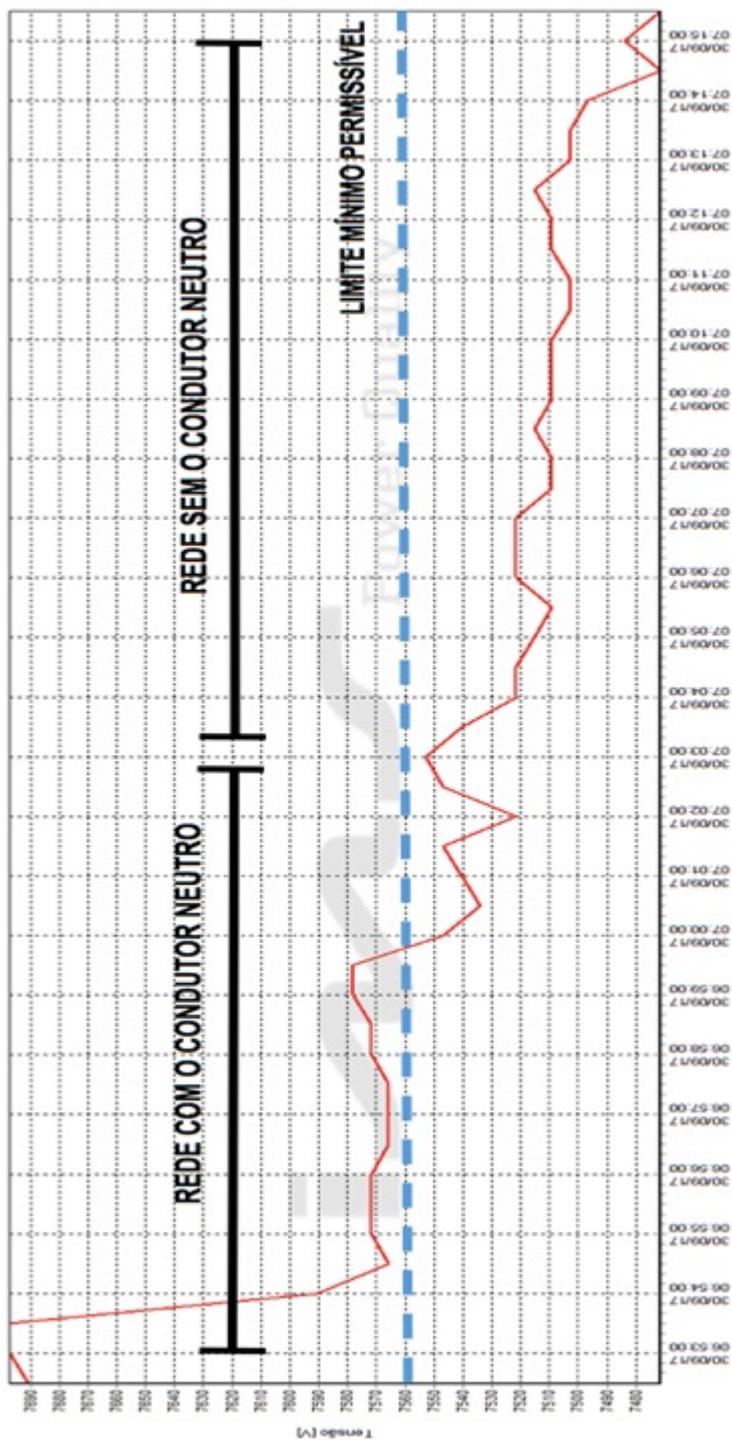
Figura 16: Níveis de tensão da rede trifásica com e sem o condutor neutro



Fonte: (SOFTWARE IMS, 2017)

Com base nos resultados apresentados na tabela 6 em relação aos níveis de tensão, graficamente também é observado a queda de tensão no instante em que houve o rompimento do condutor neutro intencionalmente na rede monofásica.

Figura 17: Níveis de tensão da rede monofásica com e sem o condutor neutro



Fonte: (SOFTWARE IMS, 2017)

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Após a análise dos dados coletados, foi possível constatar a importância do condutor neutro nas redes de distribuição de energia. Pode-se afirmar que o parâmetro mais relevante que proporcionou os resultados satisfatórios, foi o rompimento do condutor neutro em dois pontos elétricos, tal procedimento, aumentou a distância entre os outros pontos de aterramentos existentes no sistema e interrompeu a baixa impedância proporcionada unicamente pelo condutor neutro.

Com os resultados obtidos nas medições de tensão, foi possível efetuar uma análise evidente em relação ao desempenho das redes de distribuição. Conforme apresentado nos cálculos de queda de tensão, obteve uma queda de tensão no circuito monofásico de 8,53 % e no circuito trifásico 1,6 %, tudo isso, quando a rede apresentou-se sem o condutor neutro.

Verificou-se que a demonstração gráfica dos níveis de tensão, obtido através do *software* próprio do equipamento P-300, confirmou os resultados obtidos nas medições em campo. Ou seja, graficamente foi observado que na rede trifásica não houve redução significativa dos níveis de tensão e também não houve alteração da circulação de corrente, devido às cargas da unidade consumidora estarem equilibradas.

Na rede monofásica, observa-se que graficamente o nível de tensão reduziu significativamente quando ocorreu o rompimento do condutor neutro. Além disso, foi comprovado através dos cálculos de queda de tensão e também das medições, os níveis de tensão inadequados no sistema, ou seja, queda de tensão abaixo dos 95 % exigidos pela ANEEL.

Outro fator importante constatado na rede monofásica, quando houve o rompimento do condutor neutro, foi o aumento da resistência de aterramento para 90 ohms, excedendo os 80 ohms exigido pela CEMIG.

Contudo, Comprovou-se a importância do condutor neutro na teoria, através do referencial teórico e na prática, através dos procedimentos metodológicos. De forma geral, procurou-se sempre analisar o comportamento das redes, com e sem o condutor neutro. Desta forma, o estudo foi comprovado e evidenciado, através dos cálculos, gráficos, tabelas e nas medições realizadas em campo.

5 CONCLUSÃO

O estudo proposto, visando comprovar a importância do condutor neutro nas redes de distribuição que utiliza a configuração multi-aterrado, obteve resultados satisfatórios. Através das medições das grandezas elétricas, tensão, corrente e resistência, em uma visão da rede com e sem o condutor neutro, foi comprovado a importância do mesmo no sistema elétrico.

Baseando-se nos métodos para analisar o comportamento do condutor neutro nas redes de distribuição, foram encontradas algumas dificuldades para realizar as medições em campo, que resultou na busca de alternativas como o rompimento do condutor neutro, intencionalmente.

Nos resultados das medições foi possível verificar que a falta do condutor neutro na rede monofásica, alterou o desempenho do sistema em maior dimensão. A elevação excessiva da resistência de aterramento intensificou a circulação de corrente e provocou a queda de tensão. No entanto, as alterações ocorridas nos níveis de tensão e resistência de aterramento, foram suficientes para exceder os limites prescritos em normas, níveis de tensão exigidos pela ANEEL e resistência de aterramento definido pela CEMIG. Ou seja, o nível de tensão foi inferior aos 95 % definido pelo PRODIST e a resistência de aterramento foi superior aos 80 Ohms exigido pela CEMIG.

O desempenho da rede de distribuição trifásica não foi comprometido com a falta do condutor neutro, no entanto, a pequena redução da resistência de aterramento devido ao curto comprimento da rede, representou-se relevante para o estudo. Como as cargas da unidade consumidora estavam estritamente equilibradas, não houve alteração dos resultados de circulação de corrente.

A interação dos resultados obtidos nas medições de circulação de corrente, queda de tensão e resistência de aterramento do transformador, nas redes em função da falta do condutor neutro, foram os fatores determinantes que permitiram avaliar o desempenho do sistema e comprovar a importância do estudo.

O estudo teórico apresentado no contexto do referencial teórico contribuiu para realizar o estudo prático em campo. Além disso, destaca-se as afirmações de alguns autores que asseguram a relevância do condutor neutro no sistema, proporcionando uma baixa impedância distribuída. Estas afirmações foram comprovadas através dos resultados das medições nas redes de distribuição e mediante os métodos utilizados para analisar a rede com e sem o condutor neutro. Ou seja, a importância do estudo foi comprovado na teoria e na prática.

Evidentemente, a elevação da resistência de aterramento das redes, quando ocorreu a falta do condutor neutro, evidenciou a importância do mesmo para a confiabilidade do sistema de proteção, principalmente para as falhas do sistema elétrico que envolve o solo.

A afirmação supracitada dos autores em relação à importância do condutor neutro, representou-se como ponto de partida para elaboração do estudo. No entanto, a indisponibilidade de documentos e normas que abordam os conceitos sobre o comportamento do sistema, quando o condutor neutro é utilizado nas redes de distribuição, dificultou a realização do estudo em questão.

Contudo, o trabalho servirá como fonte de referência para novos trabalhos, pois existem poucos documentos e normas que comprovam a importância do condutor neutro nas redes de distribuição aéreas.

É importante ressaltar a contribuição do autor como colaborador de uma empresa autorizada a interagir no SEP, que possibilitou a realização do estudo e na utilização dos equipamentos de medição.

Para os trabalhos futuros, surge a possibilidade de realizar uma análise complexa das redes de distribuição, utilizando cálculos de queda de tensão. Para isso, será necessário efetuar as medições na rede de média tensão e fator de potência.

Recomenda-se também como proposta para trabalho futuro, analisar o desempenho das redes de distribuição com e sem o condutor neutro, seguindo os critérios definidos de qualidade de energia elétrica do PRODIST, em relação aos indicadores de continuidade do serviço.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica – PRODIST**. Brasília, 2016. 76 p. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 08 de julho de 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Aterramento para Sistemas de Distribuição**. ABNT NBR 16527, Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 06 maio de 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento**. ABNT NBR 15749, Rio de Janeiro, 2009. Acesso em: 10 setembro de 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Sistemas de Aterramento de Subestações – requisitos**. ABNT NBR 15751, Rio de Janeiro, 2009. Acesso em: 20 setembro de 2017.
- CELTINS. **Critério Básico para Projetos de Redes Aéreas de Distribuição Rural**. Grupo Energisa. Palmas, 2014. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTD-07-Crit%C3%A9rio%20b%C3%A1sico%20para%20projetos%20rural.pdf>>. Acesso em: 05 de outubro de 2017.
- CEMIG, C. E. **Fornecimento de Energia Elétrica em Média - Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea**. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas%20T%C3%A9cnicas/nd5-3p.pdf>>. Acesso em: 03 de julho de 2017.
- CEMIG, C. E. **Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais**. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Documents/nd-2-2.pdf>>. Acesso em: 05 de maio de 2017.
- CEMIG, C. E. **Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/ptbr/atendimento/Clientes/Documents/Normas%20%C3%A9cnicas/nd3-1-000001p.pdf>>. Acesso em: 20 de junho de 2017.
- Centrais Elétricas Brasileiras S.A., **Aterramento e Proteção Contra Sobretensões em Sistemas Aéreos de Distribuição**. ELETROBRÁS, Coleção Distribuição de Energia Elétrica – vol. 7. Rio de Janeiro, 1982. 358 p. Acesso em: 1 de junho de 2017.
- Centrais Elétricas Brasileiras S. A. **Desempenho de Sistemas de Distribuição**, ELETROBRÁS, Coleção Distribuição de Energia Elétrica – vol. 3. Rio de Janeiro, 1982. 169 p. Acesso em: 21 de maio de 2017.

- Centrais Elétricas Brasileiras S. A. **Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**, ELETROBRÁS, Coleção Distribuição de Energia Elétrica – vol. 2. Rio de Janeiro, 1982. 233 p. Acesso em: 13 de maio de 2017.
- COPEL. **Manual de Instruções Técnicas – Módulo: Aterramento de Redes de Distribuição**. COPEL Distribuição. Paraná, 2013. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/47BED5E72DF4EFA2032574F1005C8FD3/\\$FILE/Mit%20Aterramento%20-%20Ago13.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/47BED5E72DF4EFA2032574F1005C8FD3/$FILE/Mit%20Aterramento%20-%20Ago13.pdf)>. Acesso em: 21 de julho de 2017.
- COPPERSTELL. **Alumosteel – Fios e Cabos de Aço Alumínio**. Copperstell Bimetálicos. 8 p. 2003. Disponível em: <<https://xa.yimg.com/kq/groups/catalogo-Coopersteel-bim-etatico.pdf>>. Acesso em: 25 de setembro de 2017.
- CONDIS; GEMINI. **Sistema de Controle de Distribuição**. Disponível em: <<https://sistemas-deacessoremore.com.br/Citrix/XenApp/auth/login.aspx?CTX-MessageTypeSUCCESSCTX-MessageKeyUsableClient>>. Acesso em: 09 de Setembro de 2017.
- ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A. - ELEKTRO. **Critérios para Projeto, Construção e Manutenção de Rede Monofilar com Retorno por Terra (MRT)**. Campinas, 2014. Disponível em <www2.elektro.com.br/IsoSystemDoc/Download.aspx?fileID=12434>. Acesso em: 18 de outubro de 2017.
- ELETROPAULO, A. E. S. **Proteção de Redes de Distribuição Aérea Primária**. São Paulo, 2004. Disponível em: <<https://www.aeseletpaulo.com.br/padroes-e-normas-tecnicas/manuais-normas-tecnicas-e-de-seguranca/Documents/Padr%C3%B5es%20e%20Normas%20T%C3%A9cnicas/ND-3001.pdf>>. Acesso em: 22 de julho de 2017.
- ENERGISA. **Proteção da Distribuição**. Grupo Energisa, 2012. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/ndu017.pdf>>. Acesso em: 25 de setembro de 2017.
- IMS. **Power NET P-300 – Registrador Digital de Tensão – Manual de Instalação e Operação**. IMS Power Quality. 26 p. 2012.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1ª ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 27/01/2005, 344p.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3ª ed. Santa Catarina, 1995.
- KINDERMANN, Geraldo. **Curto Circuito** / Geraldo Kinderman. 2ª ed. Porto Alegre, 1997
- MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos** / João Mamede Filho, 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- MAMEDE FILHO, João. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência** / João Mamede Filho, Daniel Ribeiro Mamede – [Reimpr.] – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARKUS, Otávio. **Circuitos Elétricos – Corrente Contínua e Corrente Alternada**. 1ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2001.

O'MALLEY, Jhon. **Análise de Circuitos**. Trad. Moema Sant'Anna Belo ; revisão técnica Antônio Pertence Júnior. - 2ª ed. São Paulo: Editora Makron Books, 1993.

RÓGER, M.S. **Avaliação de Alternativas Para Eletrificação Rural no Contexto dos Programas de Universalização do Atendimento de Energia no Brasil**. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia. Universidade Federal Minas Gerais UFMG, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/422M.PDF>>. Acesso em: 06 de março de 2017.

SATO, F.; FREITAS W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica** / Fujio Sato, Walmir Freitas. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2015.

TOSHIBA. **Manual de Instruções para Reguladores de Tensão Monofásicos**. Toshiba Infra-estrutura América do sul. 55 p. 2013. Disponível em: <<https://www.toshiba-bhz.com.br/tic-bhz/downloads/EP-40021%20rev%203%20REGULADOR.pdf>>. Acesso em: 06 de maio de 2017.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento** / Silvério Visacro Filho, São Paulo: Artliber Editora, 2002.

APÊNDICE A AUTORIZAÇÃO COORPORATIVA**EMPREENDER** >>>**EMPREENDER LTDA - EPP**

CNPJ 11.203.088/0001-65

Projeto - Construção - Manutenção e Conservação de Redes Elétricas.

EMPREENDER LTDA - EPP**CNPJ: 11203088000165****Av. Presi. Tancredo Neves, 2115 – Zacarias, Caratinga - MG**

OFÍCIO DE SOLICITAÇÃO

Caratinga/ MG, 16 de junho de 2017

Ilustríssimo Sr. Moacyr Mendonça Costa Júnior

Gerente e Eng. Eletricista, CREA: 61403/D

Solicito a esta conceituada instituição autorização para citar informações que venham a contribuir para uma pesquisa de cunho científico (TCC – Trabalho de Conclusão de Curso), que será desenvolvida pelo Sr. Ramon Silvério do Nascimento, brasileiro, solteiro, estudante, inscrito no CPF sob nº 119.587.466-90, residente e domiciliado a Rua Dr. Maninho nº 803, Caratinga.

Os dados necessários à pesquisa citada acima, referem-se a serviços de construção e manutenção prestados a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, perante o contrato de nº 4680005051.



Moacyr M. Costa Júnior
Engenheiro Eletricista
RG, CREA 61403/D

Moacyr Mendonça Costa Júnior
Eng. Eletricista, CREA: 61403/D

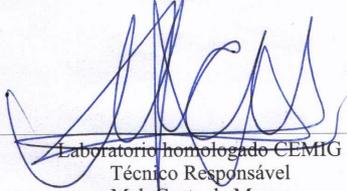
APÊNDICE B CERTIFICADO DE VERIFICAÇÃO TÉCNICA DO TERRÔMETRO ALICATE



MATRIZ ELETRIFICAÇÃO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

“O Senhor é o meu Pastor e nada me faltará.” “Deus está conosco” A Melhor Manutenção do Brasil

| CERTIFICADO DE MANUTENÇÃO E VERIFICAÇÃO TÉCNICA | | | | | |
|--|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------|--|
| Cliente: Construrede Eletricidade Ltda Endereço: Av: Presidente Tancredo Neves, 2115 Bairro: Zacarias Município: Caratinga / MG Cep: 35300-102 CNPJ: 00.600.238/0001-58 Inscr.Estadual: 001.093.489-0021 | | | | | |
| Instrumento: Terrômetro digital | Marca: | Modelo: MRT-100 | | | |
| Série: 08480143 | | | | | |
| Data da Calibração: 11/05/2017 | Valido até: 11/11/2017 | Local: Manutenção | | | |
| Situação do item calibrado: Usado | | | | | |
| Condições Ambientais | | Temperatura: 19° C | umidade: 50% | | |
| Nº Certificado: 56750 | | Nº Patrimônio: ***** | Nº Serie: 08480143 | | |
| Equipamentos utilizados: EM5248 faz indicação direta de resistencia de laço de terra de 0,01 a 1.200 ohms. Decada Resitiva modelo DR-800 | | | | | |
| Referencia utilizada nos testes: NBR6690 | | | | | |
| Ensaio Reliaizados | Tipo | Especificações | Obtido. | Erro% | |
| Escala de Resistencia | R | 1-10-100 | Conforme | 1 | 1 Ohms: erro 1% X 10 Ohms: erro 1% X 100 Ohms: erro 1% Tensão AC. Erro 2% |
| Escala de tensão aplicada AC | R | 1-10-100 | Conforme | 1 | |
| R= Rotina. Padrões Aceitáveis O objeto não apresentou comportamento anormal durante o ensaio, não havendo rupturas ou trincas em seu corpo. O objeto se apresenta de acordo com as exigencias prevista a NBR. Assim, considero o Objeto apto e adequado para sua efetiva utilização nas aplicações previstas. Verificação visual: O corpo do objeto não apresenta fissuras ou deformações consideráveis em toda a sua área. Ancho ificaç O sitema não apresenta peças danificadas e mostrou-se eficiente quando submetido a esforço fisico funcional Equipamento Apto. Laboratório Homologado pela CEMIG | | | | | |



Laboratório homologado CEMIG
Técnico Responsável
Mak Costa de Moura



Engenheiro Responsável
Gustavo Luiz Prates Oliveira
Crea: 96488 / D MG

CRENCIADO



A Melhor Energia do Brasil.





Av. Catulo da Paixão Cearense, 286 - Loja 01/02 - Fones: (31) 3362-8832 / 3333-6227 - B. das Indústrias - Cep 30610-010 - Belo Horizonte - MG
Site: www.mclmatriz.com.br - E-mail: contato@mclmatriz.com.br