

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
ENGENHARIA ELÉTRICA

ALESSANDRO GUGLIANO FERRARO

MARCELO ARTICO

BRÁULIO AUGUSTO BIANCO †

**PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
COM ÊNFASE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Itatiba
2013

ALESSANDRO GUGLIANO FERRARO – R.A. 002200900450

MARCELO ARTICO – R.A. 002200900382

BRÁULIO AUGUSTO BIANCO – R.A. 002200900681 †

**PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
COM ÊNFASE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, campus Itatiba, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Annete Faesarella

Itatiba
2013

ALESSANDRO GUGLIANO FERRARO

MARCELO ARTICO

BRÁULIO AUGUSTO BIANCO †

**PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
COM ÊNFASE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Monografia aprovada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, campus Itatiba, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: ___/___/___

Banca examinadora:

Profa. Dra. Annete Faesarella

Universidade São Francisco

Prof. Dr. Washington Luiz Alves Correa

Universidade São Francisco

Prof. Me. Renato Franco de Camargo

Universidade São Francisco

Para nosso amigo Bráulio Augusto Bianco, que infelizmente não está mais entre nós, uma pessoa maravilhosa, companheiro, amigo, que tivemos a honra de conhecer e que tornou estes anos de faculdade que estivemos em sua companhia muito melhores, não temos dúvidas que teria uma carreira brilhante e uma vida repleta de conquistas, um amigo de verdade, que estará sempre em nossos corações.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, filhos, namorada e esposa por estarem sempre nos apoiando, incentivando e cobrando, muitas vezes nos mostrando os melhores caminhos a serem seguidos e nunca deixando que pequenos acontecimentos ou fatos da vida nos desanimassem de seguir em busca dos nossos objetivos e sonhos.

A Universidade São Francisco por ter nos recebido de portas abertas, nos transformando em Engenheiros e também nos preparando para o mundo real e tudo que daqui para frente poderemos encontrar.

A todos os professores e colaboradores da Universidade São Francisco que de alguma forma contribuíram para nossa formação, em especial a Professora Dra. Annete Faesarella que aceitou o convite de ser nossa orientadora neste trabalho colaborando sempre com o seu conhecimento, aos Professores Me. Renato Franco de Camargo e Professor Dr. Washington Luiz Alves Correa onde sempre que solicitados estavam prontamente preparados a nos atender, inclusive aceitando o convite para participarem da nossa banca de TCC.

A todos os nossos amigos e colegas de faculdade, que sempre colaboraram de alguma forma.

Em especial ao nosso colega e mais que amigo Bráulio Augusto Bianco que acima de tudo nos deu uma lição de vida, sempre prestativo e dedicado aos amigos não nos deixou nenhuma lembrança ruim a não ser a sua falta física, pois a sua presença será eterna em nossos corações.

Enfim, somos gratos a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para as nossas vidas.

RESUMO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica no Brasil e no mundo são complexos e vitais, interligam centros geradores normalmente distantes dos centros receptores que rebaixam o nível de tensão para possibilitar a distribuição de energia nas cidades, indústrias, hospitais, escolas, entre outros.

Para garantir um nível baixo de interrupções se fazem necessários estudos para uma utilização de recursos e equipamentos que previnam os desligamentos acidentais, quando não o evitam, facilitem o rápido restabelecimento.

O presente trabalho trata dos diversos sistemas e equipamentos utilizados na proteção das linhas de transmissão de energia elétrica, como relés, para raios, cabos de aterramento e outros componentes, esse conjunto de equipamentos tem o intuito de promover a proteção das linhas de transmissão, além de indicar a proximidade do ponto onde houve a perturbação, tornando mais rápido e eficaz a sua normalização.

Faz-se aqui, um detalhamento desses sistemas de proteção e ainda, um estudo de caso do sistema de 88 kV que liga a Subestação de Guaratinguetá à Subestação de Cunha, no estado de São Paulo, com a análise de falhas ocorridas desde 2010, até o presente momento.

Através desse estudo de caso, pode-se visualizar a eficácia destes sistemas por meio de estudos de gráficos e tabelas coletados nesta linha de transmissão.

ABSTRACT

Transmission systems of electric power in Brazil and in the world are complex and vital, interconnected generators usually distant centers of receptor sites which lower the voltage level to enable the distribution of power in the cities, industries, hospitals, schools, and other.

To ensure a low level of interruption studies are needed to make a use of resources and equipment to prevent accidental shutdowns when not avoided, facilitate the rapid restoration.

The present work deals with the various systems and equipment used in the protection of transmission lines of electricity, such as relays, surge arrestors, grounding cables and other components, this set of equipment is intended to promote the protection of transmission lines, as well to indicate the proximity of the point where there was a disturbance, making it faster and more effective their standardization.

Is made here, a breakdown of these protective systems and also a case study of the 88 kV system linking the substation to substation Guaratinguetá Cunha, in the state of São Paulo, with the analysis of failures from 2010 until the present moment.

Through this case study, you can see the effectiveness of these systems through studies of graphs and tables listed in this transmission line.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1: Linha de Transmissão 88 kV Guaratinguetá.....	5
Figura 2: Esfera em Instalação na Linha de Transmissão	6
Figura 3: Campo de Proteção no Método Franklin	7
Figura 4: Para raio de Carboneto de Silício.....	8
Figura 5: Para raio de Óxido de Zinco	Erro! Indicador não definido. 8
Figura 6: Malha de Aterramento, Solda Exotérmica.....	9
Figura 7: Proteção de Chifre (GAP) na Linha de Transmissão Guaratinguetá	10
Figura 8: Proteção de Chifre (GAP) e Anel Ant-Corona na LT Guaratinguetá.....	11
Figura 9: Esquema Básico de Ligação dos Relés Secundários	12
Figura 10: Curva de Ajuste do Relé	13
Figura 11: Esquema Básico de uma Proteção Diferencial	Erro! Indicador não definido. 5
Figura 12: Sistema Carrier, Bobina de Bloqueio e TP	16
Figura 13: Painel de proteção com Relé de Religamento Eletromecânico.....	22
Figura 14: Relé de Religamento Estático	22
Figura 15: Relé de Religamento Digital SEL 351A.....	23
Figura 16: Tensão de Passo	24
Figura 17: Esquema Elétrico Correspondente a Tensão de Passo.....	24
Figura 18: Tensão de Toque	25
Figura 19: Esquema Elétrico Correspondente a Tensão de Toque.....	26
Figura 20: Representação das Constantes Elétricas da LT 88 kV.....	29
Figura 21: Saída da Subestação	30
Figura 22: Transformador de Corrente	31
Figura 23: Transformador de Potencial	32
Figura 24: Esquema Unifilar de Manobras	33
Figura 25: Gráfico de Perturbação da Linha de Transmissão 88 kV.....	35
Figura 26: Assistente Analítico da Perturbação da Linha de Transmissão	37
Tabela 1: Relé Schweitzer 351A na Subestação de Guaratinguetá.....	35
Anexo 1: Locação de Estruturas e Progressivas da LT. 88 kV GUR/CUN	42
Anexo 2: Nomenclatura dos Aparelhos de Proteção e Manobra.....	46
Anexo 3: Complementação da Tabela ANSI	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Fundamentos de proteção de sistemas elétricos	3
2.2 Sistemas de proteção	3
2.2.1 Proteção de transformadores	3
2.2.2 Proteção de sobrecarga	4
2.2.3 Proteção de sobrecorrente.....	4
2.2.4 Proteção por falta do terra	4
2.2.5 Proteção de linhas de transmissão	4
2.3. Componentes de uma linha de transmissão	5
2.3.1 Cabos-guarda.....	5
2.3.2 Para-raios	7
2.3.3 Malha de aterramento	9
2.3.4 Descarregadores de chifre	10
2.3.5 Relés de proteção.....	11
2.3.5.1 Relés de sobrecorrente.....	11
2.3.5.2 Relé diferencial de corrente	14
2.3.5.3 Relé direcional	17
2.3.5.4 Relé de distância.....	17
2.3.5.5 Relé de religamento	20
2.4 Tensões aplicadas	23
2.4.1 Tensão de passo	23
2.4.2 Tensão de toque	25
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Descrição da linha de transmissão escolhida para estudo de caso	27
3.2 Dados levantados pelo relé Schweitzer 351A na Subestação de Guaratinguetá	30
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
6 ANEXOS	42

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia elétrica é algo diretamente ligado ao progresso. Conforme novas tecnologias são desenvolvidas, novas fontes de energia são necessárias ou se torna crescente a exploração de alguma fonte já conhecida. Dentre as fontes energéticas utilizadas pelo homem na atualidade, a mais notável é a elétrica. Desde a sua descoberta, o ser humano desenvolve maneiras de gera-la e explora-la. Porém, tal desenvolvimento gerou uma nítida dependência.

Como um ato automático, é comum notarmos certa perturbação quando o fornecimento de eletricidade é interrompido. Isto ocorre por já estarmos habituados a constante presença de meios que nos permitam utilizar as vantagens desta forma de energia. Eletrodomésticos, máquinas industriais e lâmpadas elétricas são equipamentos tão necessários às sociedades atuais que muitos não conseguem nem imaginar sua vida sem eles.

Por este motivo, se tornam necessários estudos que visem o desenvolvimento de proteções para as linhas de transmissão aplicados em seu percurso e ou em sua fonte, buscando evitar interrupções de fornecimento. No percurso entre a fonte geradora, seja ela hídrica, térmica, eólica, nuclear ou qualquer outra, a transmissão está sujeita a perturbações e anomalias de funcionamento que podem causar prejuízos à população.

Descargas atmosféricas, surtos de tensão, vandalismo e incêndios são algumas das ameaças às quais um sistema de transmissão está sujeito. E buscando prever a ocorrência destas anomalias, meios de proteção são implementados no início e ao longo da rede. Estes dispositivos atuam de modo a evitar as falhas elétricas e limitar os defeitos caso a falha ocorra. Contudo, é necessário calcular as vantagens econômicas desta proteção, já que o custo dos dispositivos protetores não pode ser maior que o custo dos equipamentos protegidos.

Características como sensibilidade, seletividade, velocidade, confiabilidade e precisão necessitam ser dimensionadas para atender as necessidades do sistema, não excedê-las demasiadamente, evitando assim tornar inviável a instalação de proteções em linhas de transmissão.

Neste contexto, o trabalho tem como objetivo apresentar os principais dispositivos, seus dimensionamentos, métodos de aplicação e estudos de caso de proteções utilizados em Linhas de transmissão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos de proteção de sistemas elétricos

A função básica de um sistema de proteção é garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica da melhor maneira possível. Aliado a este conceito, existe a finalidade de resguardar os equipamentos de distribuição que tem altos custos nas instalações elétricas.

Para isso, é necessária a constante avaliação da necessidade de implementação de dispositivos de proteção, detecção de curtos ou eventos anormais que possam danificar os elementos da rede. (CAMINHA, 1977)

Em um sistema elétrico, a falha mais comum é o curto-circuito. Um curto produz uma corrente elevada que circula por todos os elementos da linha, podendo ser prejudicial para o funcionamento dos mesmos e gerar graves distúrbios de tensão ao longo da linha. Além deste fator de anormalidade, existem outros eventos que podem ter consequências não menos graves para o sistema elétrico. São eles: sobrecarga, sub e sobre tensões, podendo ser geradas por descargas atmosféricas, manobras, quedas de árvores, entre outras.

O principal objetivo de um sistema de proteção é assegurar que na ocorrência de uma das anormalidades citadas acima, seja possível desconectar a parte falha de todo o sistema elétrico, de modo a facilitar a detecção e resolução das causas de falha. (MAMEDE, 2011)

2.2 Sistemas de proteção

2.2.1 Proteção de transformadores

Os transformadores podem sofrer com distúrbios causados por faltas internas ou externas. Faltas internas geralmente são causadas por curtos-circuitos entre os enrolamentos ou entre um enrolamento e a armadura.

Já as faltas externas são consequências de sobrecargas ou curtos que ocorrem do lado externo ao transformador. (THE ENGLISH ELECTRIC CO. LIMITED, 1968)

2.2.2 Proteção de sobrecarga

Uma sobrecarga tende a gerar aquecimento nos componentes internos de uma transformação, tal aquecimento pode prejudicar o funcionamento do isolante que separa os enrolamentos e armadura. Para se evitar os danos resultantes de uma sobrecarga, um relé que analisa uma imagem térmica do interior do transformador registra as variações de temperatura do mesmo e pode disparar um alarme, ativar o sistema de refrigeração ou ainda desativar o disjuntor. (CAMINHA, 1977)

2.2.3 Proteção de sobre corrente

Um dispositivo de proteção de sobre corrente é uma opção econômica para a proteção de um transformador, porém de baixo nível de confiabilidade. Por não ser muito sensível e suscetível a variações externas, este relé é mais comumente empregado em transformadores de potência não superiores a 7 MVA/138kV. (MAMEDE, 2011)

2.2.4 Proteção por falta do terra

A falta do terra (ou sequencia zero) não pode passar entre o primário e o secundário de um transformador. Para isso, é necessário prover proteção individual entre o terra e cada um dos lados do transformador.

2.2.5 Proteção de linhas de transmissão

A filosofia de proteção de uma linha de transmissão é baseada nas suas características construtivas como tipo de estrutura, isolamento, utilização de cabo guarda, bitola e comprimento de cabos condutores, local de instalação com estudos de vento, solo, vegetação, descargas atmosféricas, meios operativos e relés de proteção nas subestações lado fonte e lado carga.

2.3 Componentes de uma linha de transmissão

2.3.1 Cabos-guarda.

São cabos de aço ou aço revestido com alumínio que podem também conter em seu núcleo um conjunto de fibra óptica conhecida como OPGW - (Optical Ground Wire), também conhecido como Cabo de Guarda com fibra óptica que interligam as estruturas em seu ponto mais alto, fazendo assim a proteção aérea dos cabos condutores contra descargas atmosféricas e possibilitam a interligação de dois pontos distantes para a transferência de dados.

Para proteção dos cabos guarda contra choques mecânicos causados por aeronaves são utilizadas esferas de sinalização aérea - (esfera de fibra resinada na cor laranja com 600 milímetros de diâmetro) instaladas nos cabos condutores ou cabo guarda entre as estruturas de sustentação (torres ou postes), os principais pontos utilizados são em travessias de rodovias, dutos, vãos entre estruturas com alturas superiores a 150 metros e ao redor de aeródromos conforme norma NBR 15237, a figura 1 mostra um dos vãos da Linha de Transmissão 88 kV Guaratinguetá / Cunha que cruza com a rodovia Paulo Virgínio (SP-171) entre as estruturas 32 e 33, tendo instalado nesse vão 3 unidades de esferas.



Figura 1 – Linha de Transmissão 88 kV Guaratinguetá / Cunha (Elektro)

A figura 2 mostra a instalação de uma esfera de sinalização aérea no cabo guarda de 3/8", pelo método de linha energizada a distância com uso de cordas, carretilhas e bastão isolante.



Figura 2 - Esfera em Instalação na Linha de Transmissão (Elektro)

As descargas atmosféricas causam sérias perturbações nas redes aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além de provocarem danos materiais nas construções atingidas por elas, sem contar os riscos que as pessoas e os animais ficam submetidos.

As descargas atmosféricas induzem surtos de tensão que chegam a centenas de kV nas redes aéreas de transmissão e distribuição das concessionárias de energia elétrica, obrigando a utilização de cabos-guarda ao longo das linhas de tensões mais elevadas e para-raios a resistor não linear para a proteção de equipamentos elétricos instalados nesses sistemas. (Mamede, Instalações Elétricas Industriais, 488).

Para realizar essa proteção, em linhas de transmissão de energia elétrica, um dos métodos utilizados, é o Método de Franklin que consiste em determinar o volume de proteção propiciado por um cone, cujo ângulo da geratriz com a vertical varia segundo o nível de proteção desejado e para uma determinada altura da estrutura como mostra a figura 3.

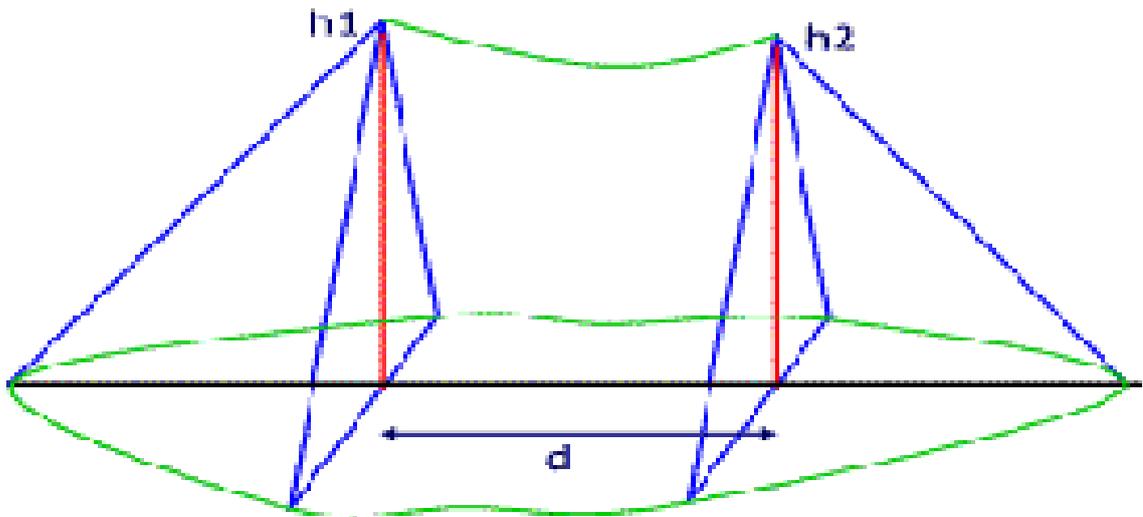


Figura 3 – Campo de Proteção no Método Franklin (Mamede, Instalações Elétricas industriais, 507)

2.3.2 Para raios

A proteção dos equipamentos elétricos contra as descargas atmosféricas é obtida através de para raios que utilizam as propriedades de não-linearidade dos elementos de que são fabricados para conduzir as correntes de descarga associadas às tensões induzidas nas redes e em seguida interromper as correntes subsequentes, isto é, aquelas que sucedem às correntes de descarga após a sua condução à terra.

Para raios de Carboneto de Silício são aqueles que utilizam como resistor não-linear o mesmo (SiC) e têm em série com este um centelhador formado por vários gaps (espaços vazios). Esses para raios são constituídos basicamente pelas partes indicadas na figura 4.

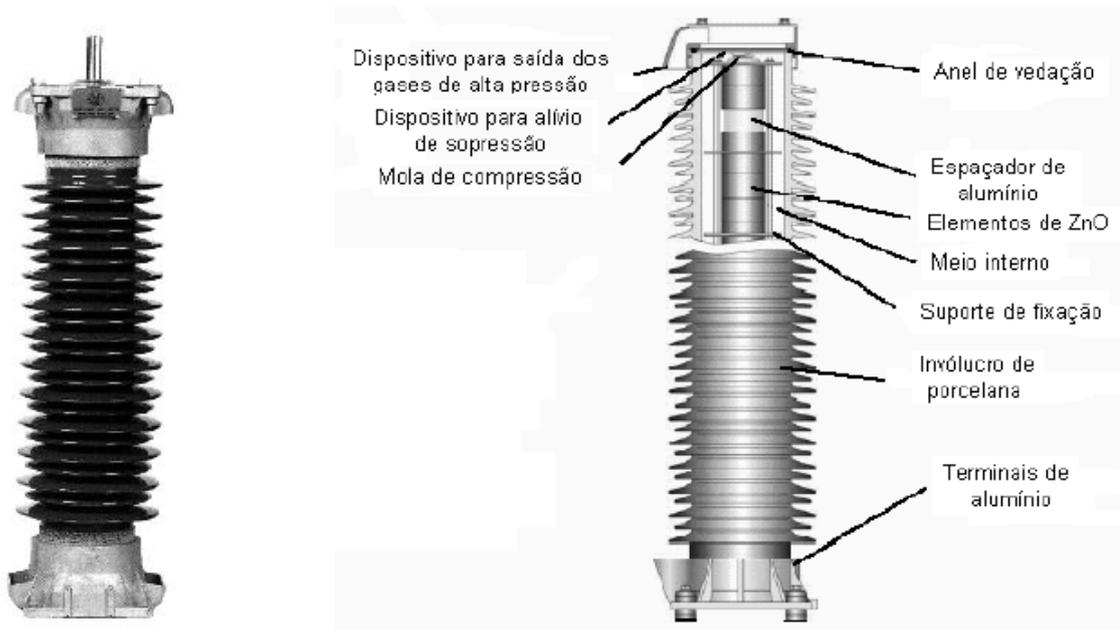


Figura 4 – Para raio de carboneto de Silício (<http://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-5.pdf>)

Para raios de Óxido de Zinco utilizam como resistor não linear o próprio ZnO e ao contrário dos para raios de carboneto de silício, não possuem centelhadores série. Estes para-raios são constituídos basicamente das partes indicadas na figura 5.

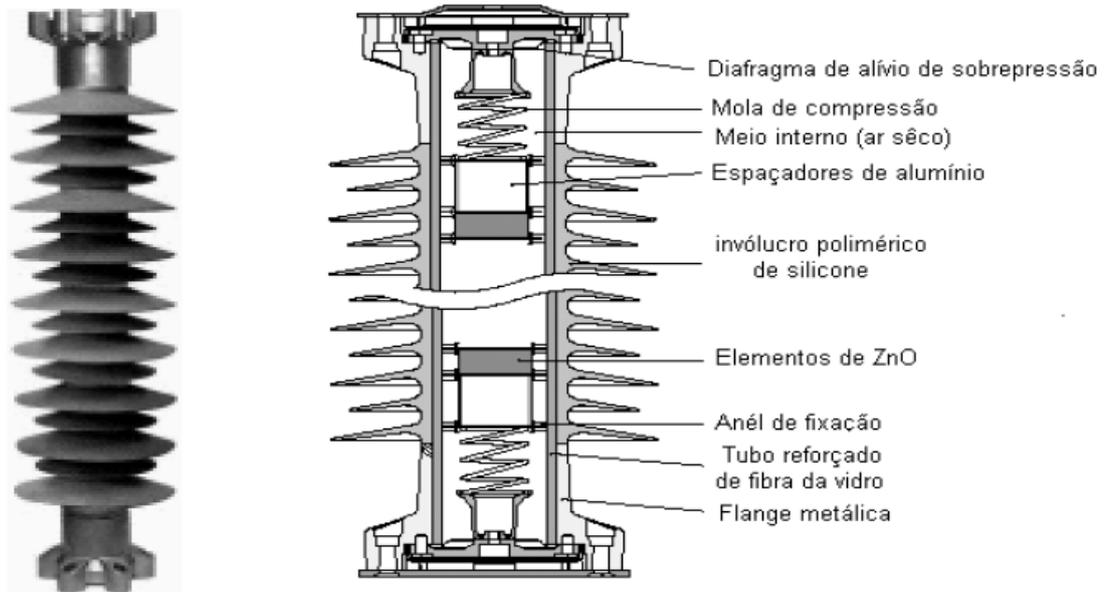


Figura 5 – Para raio de Óxido de Zinco (<http://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-5.pdf>)

2.3.3 Malha de aterramento

Toda instalação elétrica para funcionar com desempenho satisfatório e ser suficientemente segura contra riscos de acidentes fatais deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto. Um sistema de aterramento visa:

- segurança de atuação da proteção;
- proteção das instalações contra descargas atmosféricas;
- proteção do indivíduo contra contatos com partes metálicas da instalação energizadas acidentalmente;
- uniformização do potencial em toda área do projeto, prevenindo contra lesões perigosas que possam surgir durante uma falta fase-terra.

Para que se tenham esses itens implementados, a malha de terra se faz necessária. A Malha de terra é constituída de Eletrodos de terra que podem ser de aço galvanizado ou de aço banhado a cobre onde são enterrados a profundidades variando pelo tamanho das hastes e os cálculos que envolvem o tipo de solo sendo interligados por cabos ou cordoalhas também de aço galvanizados, aço banhado a cobre ou puramente de cobre, normalmente enterrados a profundidades variando de trinta a setenta centímetros como mostra a figura 6.



Figura 6 – Confeção de aterramento, Imagem Subestação Atibaia 01, solda Exotérmica (Elektro)

2.3.4 Descarregadores de chifre.

Os descarregadores de chifre funcionam de maneira bastante peculiar. Quando instalados no sistema, o afastamento dos seus eletrodos evita que ocorra uma descarga elétrica à frequência industrial, para a terra através do *gap*. Porém, quando surgem sobretensões acima de um determinado valor, o dielétrico (*gap* – no caso o ar) é rompido, provocando a formação de um arco voltaico, através do qual é criado um caminho de fácil escoamento para as correntes transitórias atingirem a terra. O arco voltaico, formado na parte mais próxima entre os eletrodos, caminha rapidamente para as suas extremidades, tendo assim, seu percurso alongado e resfriado. (Mamede Manual de equipamentos, 770)

A figura 7 mostra os chifres instalados nos dois lados da cadeia de isoladores, um no lado aterrado, ou seja, na estrutura e o outro no lado energizado, lado cabo condutor, já a figura 8 mostra o chifre no lado da estrutura e um anel anti-corona no lado energizado que além da função de *gap* também desempenha o papel de equalizador do campo elétrico no terminal com a fase do isolador.

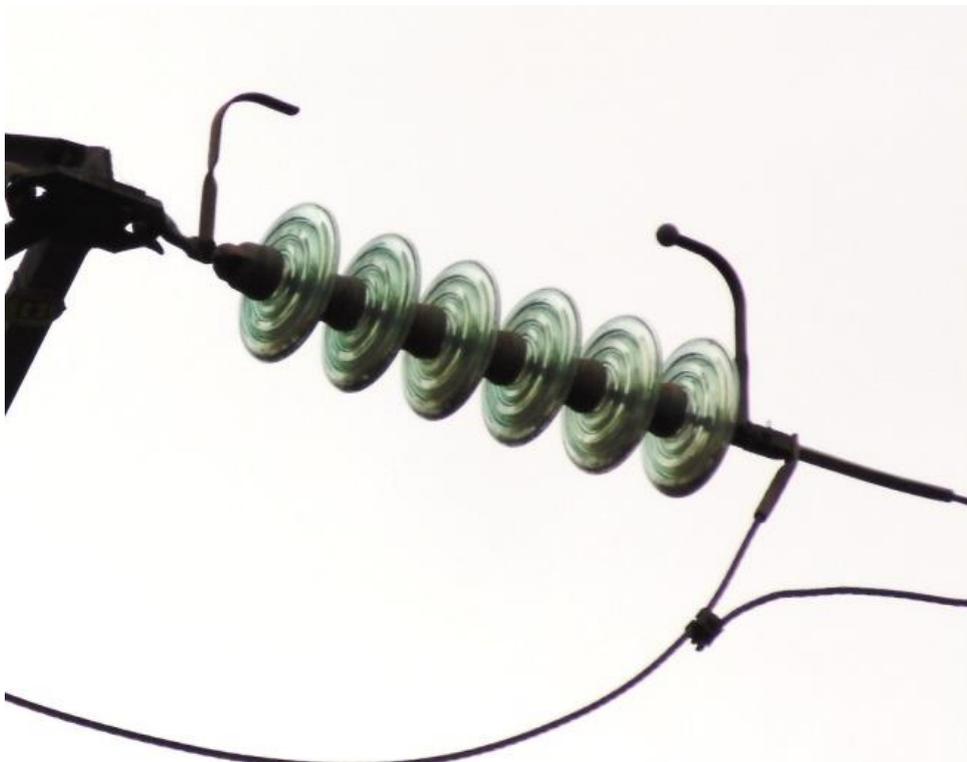


Figura 7 – Proteção de chifre (GAP) na Linha de Transmissão Guaratinguetá / Cunha (Elektro)

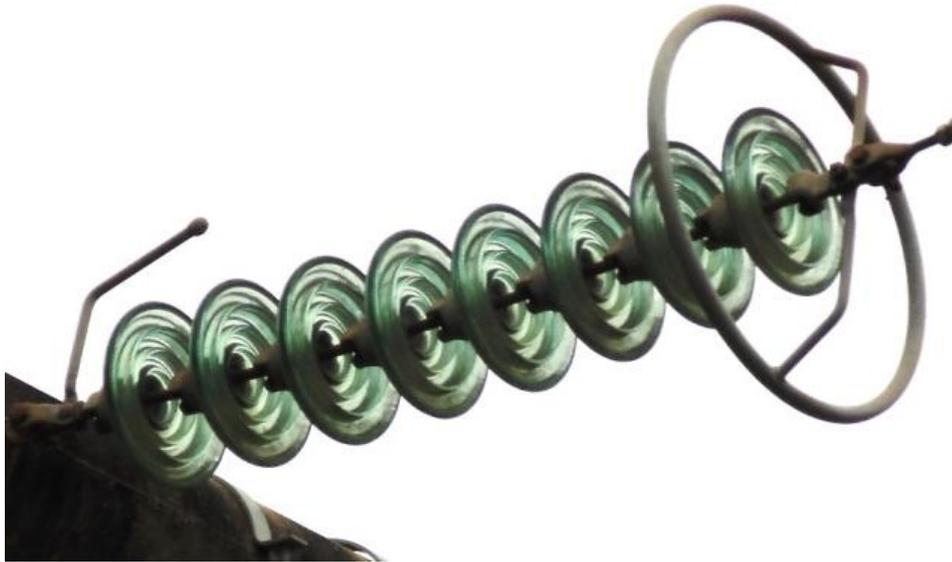


Figura 8 – Proteção de chifre (GAP) e anel anti-corona no pórtico da Subestação Guaratinguetá (Elektro)

2.3.5 Relés de Proteção.

O relé representa uma gama numerosa de equipamentos e dispositivos, com as mais diferentes formas de construção e operação, para aplicações diversas, dependendo da importância do porte e da segurança da instalação considerada. (Mamede Proteção sistemas elétricos de potência, 265)

2.3.5.1 Relé de sobre corrente.

O relé de sobre corrente é a proteção mínima de qualquer sistema elétrico, ele é interligado ao sistema através de transformadores de corrente (TC) que representam as correntes reais em escalas menores, os relés de sobre corrente são divididos em Instantâneo, Temporizado e Neutro.

Relé de sobre corrente Instantâneo conhecido pela numeração 50 atua instantaneamente para qualquer corrente maior que o seu ajuste. (KINDERMANN, 109)

Seu esquema de ligação é representado pela figura 9 que mostra o fechamento de ligação dos TC's com os relés.

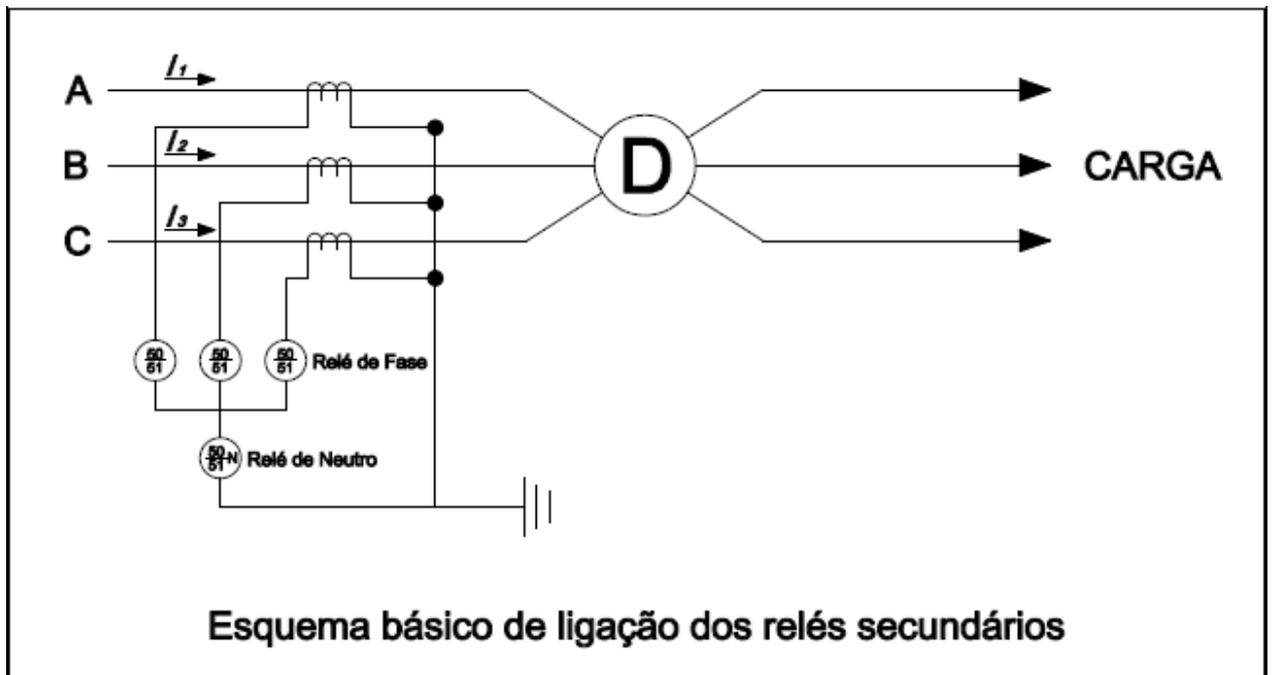


Figura 9 – Esquema Básico de ligação dos Relés Secundários (KINDERMANN)

Relé de sobre corrente Temporizado conhecido pela numeração 51 atua após certo tempo de ajuste de curva, quanto maior a corrente maior a velocidade de desligamento, caracterizado por tempo definido ou tempo inverso. (KINDERMANN, 109)

Relé de sobre corrente de Neutro conhecido como relé de sobre corrente de sequência zero.

Os tempos de ajuste para atuação do relé é representado pela figura 10 que ilustra as curvas correlacionando tempo e corrente.

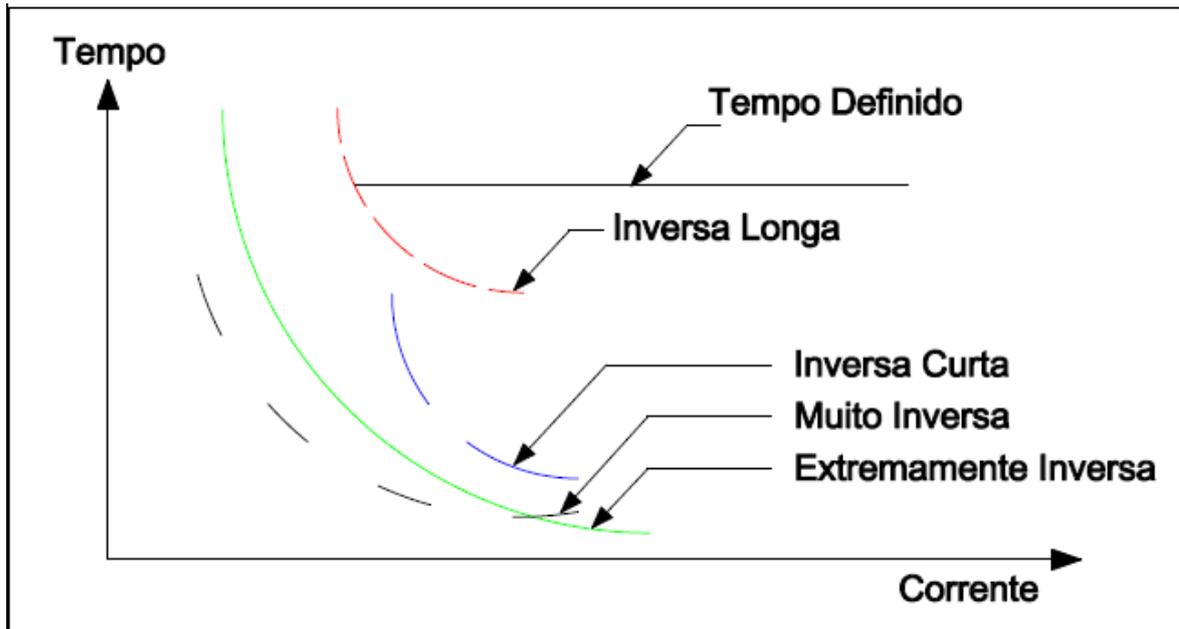


Figura 10 – Curva de Ajuste do relé de sobre corrente. (KINDERMANN)

Os três TC's em paralelo, formam um filtro onde só passam as componentes de sequência zero. Portanto, o fechamento com o terra passa somente a sequencia zero do sistema já referido ao circuito secundário dos TC's. (KINDERMANN 109)

Toda corrente do sistema elétrico que escoar pela linha de terra tem o seu reflexo no relé de neutro.

No sistema as correntes que geram componentes de sequência zero são:

- curto-circuito monofásico à terra.
- curto-circuito bifásico à terra.
- cargas desequilibradas aterradas.
- abertura de fase de sistemas aterrados.

As que não geram sequência zero:

- curto-circuito trifásico.
- curto-circuito bifásico.
- cargas desequilibradas não aterradas.
- abertura de fase em circuitos não aterrados.

Transformadores de corrente com relação de transformação 600 para 5 diminuem a corrente no secundário em relação ao primário em 120 vezes, quando no primário do TC passar uma corrente de 240A teremos no seu secundário uma corrente igual a 2A que possibilita sua utilização com segurança em relés que transformam essa medição em referências reais para a proteção do sistema elétrico.

2.3.5.2 Relé diferencial de corrente.

O relé diferencial é um dispositivo de proteção de um equipamento que se baseia no princípio da comparação de corrente elétrica de entrada e saída. A função fundamenta-se na primeira lei de Kirchhoff aplicada ao equipamento, isto é a diferença de corrente no relé é igual a zero quando a corrente de saída, subtraída da corrente de entrada der como resultado uma corrente nula, atuação.

O dispositivo de proteção atuará na condição que a corrente de entrada menos a corrente de saída for maior que o ajuste do relé, caracterizando assim um defeito no elemento protegido.

Relé diferencial é conhecido pelo número 87 e é aplicado principalmente para:

- proteção de transformadores de potência
- proteção de cabos subterrâneos

- proteção de máquinas síncronas
- proteção de barras
- proteção de cubículos metálicos
- proteção de Linhas de Transmissão curta

A figura 11 mostra um esquema básico de uma proteção diferencial de linha localizada num terminal, enfatizando as demais funções do relé que podem ser ativadas e que desempenham proteções de retaguarda.

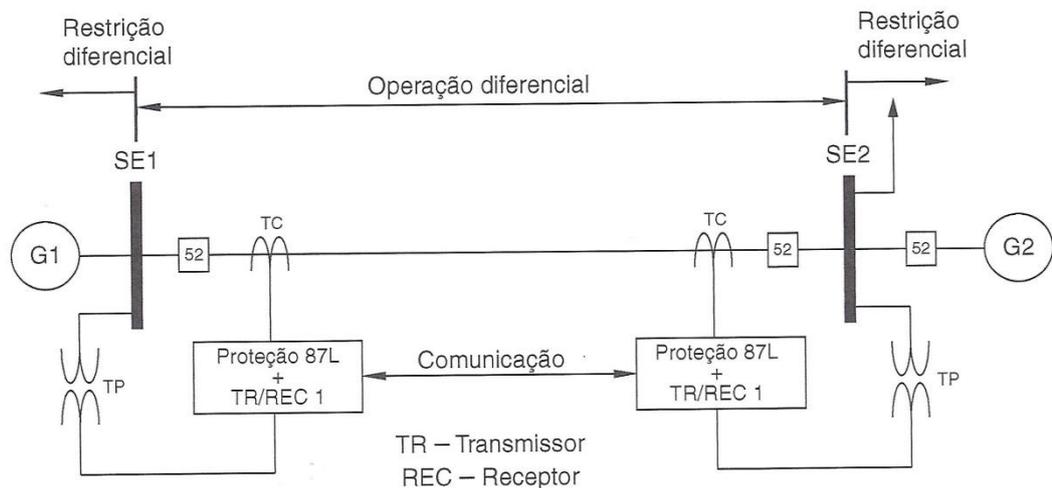


Figura 11 - Esquema básico de uma proteção diferencial (Mamede. Proteção de sistemas elétricos de potência)

Vários são os sistemas de comunicação, fio piloto, rádio, micro-ondas, fibra ótica ou onda portadora exemplo esse de comunicação para o sistema diferencial também conhecido como Sistema Carrier, tem como fundamento a utilização dos próprios condutores da linha de transmissão a ser protegida onde transmite os sinais na banda de frequência entre 30 kHz e 300 kHz. O sinal pode ser transmitido apenas numa fase da linha de transmissão. Para o funcionamento da onda portadora é necessário utilizar os seguintes componentes:

Bobina de bloqueio – é constituída de um filtro passa-faixa que impede que os sinais de rádio frequência, que se deseja transmitir entre subestações que possuem o sistema de onda portadora, trafeguem por outro caminho.

Transmissores / receptores – tem como finalidade de transmitir os sinais de alta frequência oriundos dos equipamentos de proteção do ponto onde estão instalados ao terminal remoto da linha de transmissão.

Capacitores de acoplamento – Seu objetivo é conectar os terminais de baixa tensão do transmissor / receptor ao sistema de alta tensão da linha de transmissão que se quer proteger. Esse equipamento oferece uma alta impedância às ondas de baixa frequência, no caso a corrente de carga que circula na linha de transmissão, e baixa impedância às ondas de alta frequência de que são constituídos os sinais de comunicação.

Reatores de dreno – estão instalados junto aos capacitores de acoplamento. O reator de dreno é o elemento que oferece um caminho de baixa impedância ao fluxo de corrente de 60 Hz para a terra e de alta impedância aos sinais de alta frequência, isolando o circuito de radiofrequência da terra. A figura 12 mostra o TP – Transformador de potencial que recebe o sinal de frequência e a bobina Carrier que filtra o sinal deixando passar para dentro da subestação apenas a frequência de 60 Hz.



Figura 12 - Sistema Carrier, bobina de bloqueio e TP (Subestação de Cunha, entrada de linha 88kV – Elektro)

2.3.5.3 Relé Direcional.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica e as linhas de transmissão radiais são normalmente protegidas por relés de sobre corrente temporizados. Porém quando esses sistemas são alimentados pelas duas extremidades, ou apresentam configuração em anel, há necessidade de implementar relés de sobre corrente temporizados incorporados a elementos direcionais, isto é ou são sensibilizados ou não pelo sentido em que flui a corrente (relés direcionais de corrente) ou a potência (relés direcionais de potência).

Dessa forma, conclui-se que a proteção com relé direcional tem a finalidade de reconhecer em que sentido está fluindo a corrente ou a potência numa determinada parte do sistema. Caso a corrente ou a potência esteja fluindo num sentido inverso ao normal, o relé direcional deve ser capaz de enviar ao disjuntor um sinal de disparo proporcionando uma proteção seletiva de extrema utilidade nos sistemas de potência. (Mamede, Proteção de sistemas elétricos de potência, 160)

O relé direcional é simbolizado pelo número 67, é aplicado normalmente para defeitos entre fases ou entre fase e terra no controle excessivo de potência onde os mais conhecidos são:

- relé direcional de sobre corrente de fase

- relé direcional de sobrecorrente de terra

- relé direcional de potência

2.3.5.4 Relé de Distância

Os relés de distância são responsáveis por promoverem a proteção efetiva das linhas de transmissão. As características destes relés têm sido aplicadas a vários tipos de tensões e correntes, tendo seu alcance definido, utilizando um comparador e direcional, tendo como

vantagem tolerância a resistência e sem sofrer muitos erros de sobre alcance pelo carregamento.

Devido ao grande número de tipos de faltas que podem ocorrer em um circuito trifásico, os relés de distância devem ter a disponibilidade de respostas às diversas tensões e correntes, determinando o ponto onde a perturbação ocorreu.

O relé de distância é representado pelo número 21 existindo vários tipos com características diferentes adequadas às determinadas aplicações, como para a proteção de linhas de transmissão de comprimentos médio. Para o seu nível de tensão utiliza-se o relé de impedância.

O valor da corrente de curto-circuito, como se sabe, varia de acordo com a impedância medida desde a fonte até o ponto de defeito.

Sabe-se, também, que numa linha de transmissão a impedância Z é diretamente proporcional à distância entre o ponto de instalação do relé e o ponto de defeito. Por isso, esses relés são denominados relés de distância, que é um nome genérico dado aos aparelhos que de um modo ou de outro utilizam este princípio para proteger uma linha de transmissão. Existem, na realidade, vários relés baseados neste princípio, a saber:

- Relé de impedância (ohm);

- Relé de reatância;

- Relé de admitância (mho).

A aplicação de um ou outro relé de distância está condicionada à característica do sistema no qual irá operar, ou seja:

O relé de impedância é indicado para a proteção de linhas de transmissão consideradas de comprimento médio para o seu nível de tensão. No caso de uma linha de transmissão de 230 kV, pode-se considerar como média aquela de comprimento igual a 200 km;

O relé de reatância é indicado para a proteção de linhas de transmissão consideradas de comprimento curto para o seu nível de tensão. Foi desenvolvido para reduzir o efeito do arco no ponto de balanço do relé, durante a ocorrência de um defeito;

O relé de admitância é indicado para a proteção de linhas de transmissão consideradas de comprimento longo para o seu nível de tensão.

O ajuste do relé de distância deverá ser realizado de forma a se obter torque positivo para valores de impedância abaixo do valor ajustado, normalmente tomado como percentagem do comprimento da linha de transmissão.

O ajuste dos relés de distância com atuação por distância escalonada deve ser precedido de alguns critérios básicos nomeados de proteções de primeira a quarta zona.

Proteção de primeira zona: esse ajuste é para defeito entre fases onde é considerado a impedância da linha de transmissão correspondente a 80 a 90 % do seu comprimento. Para defeitos monopulares toma-se a impedância da linha de transmissão correspondente a 80 % do seu comprimento.(Mamede, Proteção de sistemas elétricos de potência, 210)

Proteção de segunda zona: essa proteção não deve ser sensível para a condição de carga máxima, devendo ser ajustado o relé de fase para 65 % da impedância de carga máxima referido ao ângulo de maior sensibilidade do relé, essa proteção deve proteger toda a linha de transmissão, alcançando a proteção de fase da segunda zona entre 130 e 150 % do seu comprimento para defeitos bifásicos e trifásicos, enquanto a proteção de neutro deve alcançar 160 % do referido comprimento para defeitos monopulares. O ajuste da segunda zona deve garantir que o relé não seja sensível aos defeitos nos secundários dos transformadores de potência das subestações remotas.

Proteção de terceira zona: tem por finalidade garantir a proteção de backup da segunda zona. Deve ter alcance de no mínimo 120 % para defeitos bifásicos e trifásicos e de 130 % para defeitos monopulares, já considerada impedância de arco voltaico. A proteção de terceira zona não deve ser sensível para a condição de carga máxima, devendo ser ajustado o relé de fase para 65 % da impedância de carga máxima considerando o ângulo de maior sensibilidade do relé. É necessário verificar se o alcance da terceira zona deve atingir o secundário dos transformadores de potência das subestações remotas. Se essa condição ocorrer, deve-se limitar o alcance da proteção da terceira zona a 90 % da impedância de sequência positiva para defeitos bifásicos e trifásicos e a 80 % para defeitos monopulares.

Proteção de quarta zona tem a sua supervisão voltada para o sentido contrário das demais proteções do sistema elétrico. Isso quer dizer que a proteção de quarta zona deve ser sensível aos defeitos para trás, considerando a barra onde está instalado o relé de distância. Deve ser ajustada para proteger a barra da subestação, considerando a resistência de arco. É preciso considerar que o ajuste do relé de distância não deve exceder a 80 % da impedância equivalente dos transformadores da própria subestação onde estão instalados os relés de distância. (Mamede, Proteção de sistemas elétricos de potência, 211)

2.3.5.5 Relé de Religamento

Os relés de religamento conhecido como rele 79 são utilizados em religadores quando a proteção de sobrecorrente atua devido a um curto circuito na rede. Assim, o relé de religamento envia um sinal para fechamento automático do religador que desconectou o circuito, após um tempo predeterminado. Em geral, o relé de religamento pode enviar uma ordem para fechar um circuito até três vezes, sendo que o tempo de cada um dos religamentos pode ser ajustado independentemente. Pode, também, inibir a atuação da função de sobrecorrente instantânea, após a primeira, segunda ou terceira abertura, permitindo, assim, somente a operação da unidade temporizada. Após a quarta abertura do religador, o relé de religamento se autobloqueia e o circuito defeituoso fica desenergizado, somente podendo ser ativado manualmente, após inspeção nas instalações. (Mamede – Proteção de sistemas elétricos de potência, 263)

Os relés de religamento somente devem ser aplicados nas subestações de potência para proteção do alimentador de distribuição ou em linhas de transmissão. Nesses sistemas, é muito grande a porcentagem de defeitos transitórios como, por exemplo, o toque de galhos de árvores nos cabos condutores aéreos durante a passagem de uma onda de vento de maior intensidade. O defeito é logo removido sem a necessidade de deslocamento de uma equipe de manutenção. Caso contrário, sem o emprego do relé de religamento, a equipe de manutenção deveria percorrer o alimentador à procura de anormalidades que geralmente não iria encontrar nesse caso específico, antes de religar o disjuntor na subestação.

Três são os tipos de relé de religamento, o eletromecânico, o de religamento estático e o de religamento digital.

Relé eletromecânico é constituído, basicamente, de um motor síncrono que comanda uma série de pequenas chaves auxiliares. Permite um religamento inicial instantâneo e três religamentos com retardo de tempo. Uma unidade de tempo ajustável em passos de 5s permite a seleção do tempo de religamento. Para ajustes inferiores, o relé dispõe de um seletor que possibilita tempos em passos de 0.50s até 5s, como final de escala. Apresenta-se, na figura 13, um painel contendo o Relé de Religamento Eletromecânico.



Figura 13 - Painel de proteção com Relé de Religamento Eletromecânico (Subestação Francisco Morato, Elektro)

O Relé de religamento estático é constituído dos seguintes elementos básicos:

- unidade de temporização de religamento, que tem a finalidade de controlar os circuitos internos do relé responsáveis pela energização da bobina de fechamento do disjuntor;

- unidade de temporização de rearme, que tem a finalidade de determinar o tempo de espera para que o relé volte ao seu estado de operação inicial após um religamento. Se o disjuntor não dispara durante o período ajustado para o rearme, o relé de religamento considera o defeito removido;

- unidade de registro de religamento, que tem a finalidade de registrar o número de operações enviadas pelo relé.

- unidade de indicação de operação, que é composta por um conjunto de diodos emissores de luz (leds), que visualiza a posição do registrador de operação.

Na figura 14 pode-se observar a foto de um painel contendo um Relé de Religamento Estático.

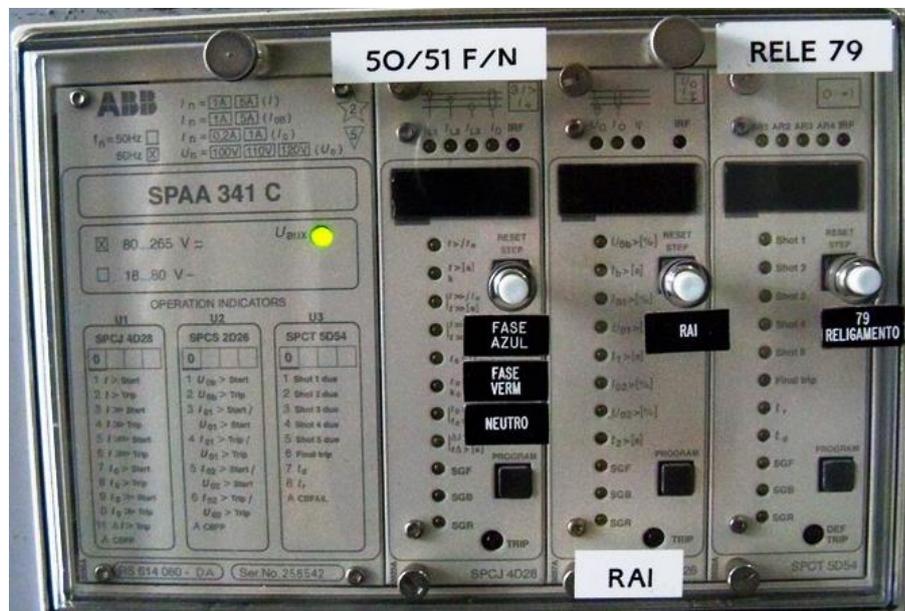


Figura 14 - Relé de Religamento Estático (Subestação Francisco Morato, Elektro)

O Relé de religamento digital é um relé de proteção trifásico mais o condutor neutro, dotado de unidades de sobrecorrente de fase e de neutro nas funções instantâneas e

temporizadas. Ele é dotado de uma lógica necessária para efetuar as sequências de religamento automático com registro do número de operação do disjuntor.

O relé é capaz de distinguir entre faltas e operações manuais do sistema de religamento. Possibilita de um a quatro religamentos com quatro contadores de religamento incorporados, possibilitando até mesmo um bloqueio de religamento caso a corrente de curto ultrapasse o valor máximo estipulado. Como exemplo, apresenta-se o relé SEL 351A na figura 15, abaixo.



Figura 15: Relé de Religamento Digital SEL 351A Subestação Guaratinguetá (Elektro)

2.4 Tensões a qual o homem está sujeito

2.4.1 Tensão de passo

Tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa. (NBR 15751, 9)

Quando um indivíduo se encontra no interior de uma malha de terra e através desta está fluindo naquele instante uma determinada corrente de defeito, fica submetido a uma tensão entre os dois pés, conforme se pode observar na figura 16 que representa a de tensão de passo (Mamede, Instalações elétricas Industriais, 395)

Corrente de choque de longa duração (I_{chld}) é a corrente de choque provocada por uma tensão de toque ou passo devido a uma corrente de defeito de longa duração. A corrente de choque de longa duração permissível é o máximo valor de corrente que circula pelo corpo

sem provocar fibrilação, no caso de suportabilidade para um percentual de 99,5 % de homens a corrente limite seria de 9 mA e para as mulheres 6 mA, passando a suportabilidade para 50 % para uma corrente de 16 mA para os homens e 10,6 mA para as mulheres.

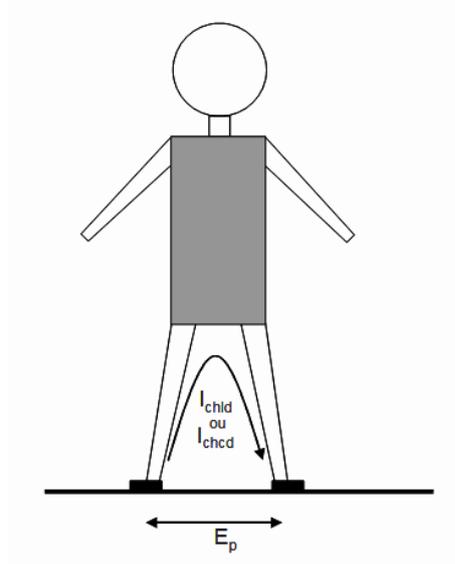


Figura 16 - Tensão de passo (NBR 15751)

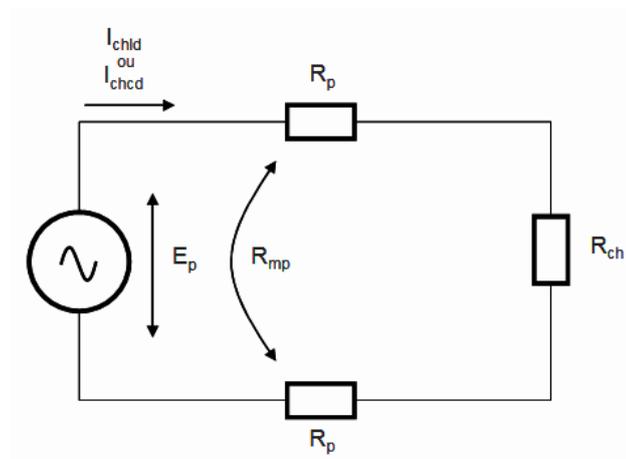


Figura 17 - Esquema elétrico correspondente a Tensão de passo (NBR 15751)

R_{ch} = a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000 ohms;

R_p = a resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, expressa em ohms;

R_{mp} = a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms;

I_{chcd} = a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

A máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pela equação:

$$E_p = [R_{ch} + 2 (R_p - R_{mp})] \times I_{chcd} \text{ (V)}$$

2.4.2 Tensão de toque

Tensão de toque é a diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionalmente igual a 1,0 m. (NBR 15751, 9)

É aquela que está sujeito o corpo humano quando em contato com partes metálicas (massa) acidentalmente energizadas. A figura 18 mostra as condições de um indivíduo submetido a uma tensão de toque. A figura 19 mostra o esquema elétrico correspondente.

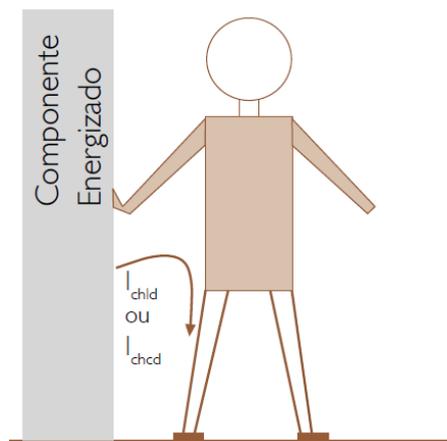


Figura 18 - Tensão de Toque (NBR 15751)

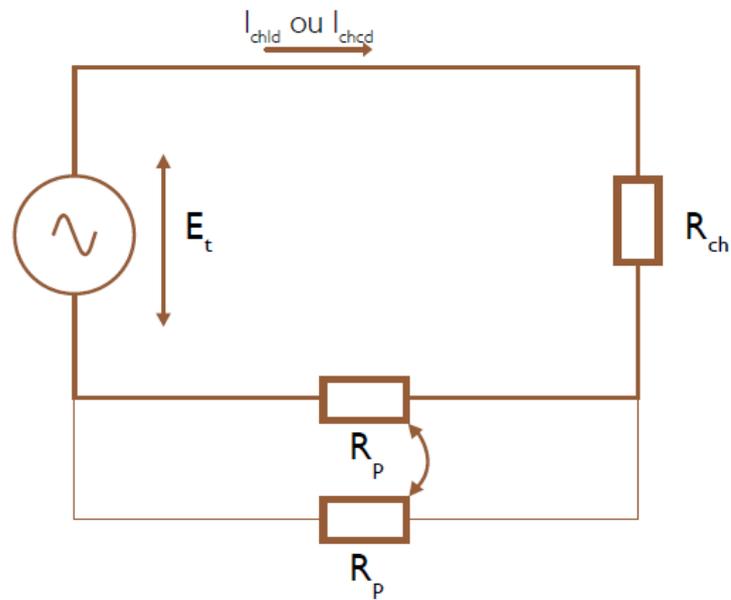


Figura 19 – Esquema elétrico correspondente a Tensão de Toque (NBR 15751)

A máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é dada por:

Em curta duração:

$$E_{tcd} = R_{ch} + [(R_p + R_{mp}) / 2] \times I_{chcd} \text{ (V)}$$

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \times p_s \times C) \times I_{chcd} \text{ (V)}$$

Em longa duração:

$$E_{tld} = R_{ch} + [(R_p + R_{mp}) / 2] \times I_{chld} \text{ (V)}$$

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 \times p_s \times C) \times I_{chld} \text{ (V)}$$

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento desse trabalho se deu devido ao número expressivo de desligamentos na Linha de Transmissão escolhida como objeto de estudo de caso, e a dificuldade de identificar a causa dos desligamentos.

Esse é um tema que deve ser observado pelos estudantes de Graduação de Engenharia Elétrica para que possam entender e assimilar a sua importância no cenário em que vivemos.

Este trabalho conta com pesquisas a livros de Engenharia Elétrica, artigos relacionados com o tema, normas e procedimentos internos à Elektro e a buscas pela internet, a fim de encontrar novidades e curiosidades sobre o tema escolhido.

Nesse trabalho realizou-se estudos sobre os eventos sofridos a partir do ano de 2010 na Linha de Transmissão de 88 kV que interliga, em um circuito único, o lado fonte na Subestação de Guaratinguetá (Elektro) com o lado carga na Subestação de Cunha (Elektro). O lado fonte é abastecido por outra Linha de Transmissão, denominada LT 88 kV Aparecida / Santa Cabeça (Bandeirante Energia) de onde deriva um Ramal com 5 estruturas metálicas tendo como ponto de entrega a cadeia de isolador no pórtico de entrada da Subestação Guaratinguetá (Elektro).

3.1. Descrição da linha de transmissão escolhida para estudo de caso

A linha de transmissão denominada LT 88 kV GUR/CUN iniciou sua construção no ano de 1972 sendo construída em sua totalidade no ano de 1973 com estruturas de madeira e concreto, o departamento responsável pelo projeto e construção da Linha de Transmissão foi o DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). No ano de 1989 já de responsabilidade da CESP (Centrais Elétricas de São Paulo) foi efetuada uma melhoria através da substituição total das estruturas de madeiras e substituição parcial das estruturas de concreto por estruturas

metálica compreendendo o trecho de serra mais agressivo sendo que as novas estruturas foram instaladas nos pontos mais altos, estruturas essas que possuem as seguintes configurações:

O primeiro trecho da Linha de Transmissão compreende 33 estruturas metálicas com cadeias de isoladores compostas por 6 isoladores nas suspenções e 7 isoladores nas ancoragens contendo como material isolante o vidro ou a porcelana. 3 unidades de cabos condutores com a seção nominal de 4 AWG composto por um fio de aço revestido por fios de alumínio eletrolítico por fase e 1 cabo guarda de aço 5/16”.

Para esse primeiro trecho, foram considerados os seguintes dados:

- Relevo: o relevo da região atravessada é ondulado;
- Principais obstáculos atravessados:
 - . Rodovias: vãos 28/29, 29/30 e 32/33;
 - . Linhas de Transmissão 500 kV de Furnas: vãos 06/07 e 07/08;
 - . Gasoduto PETROBRÁS: vão 08/09;
- Altitude máxima e mínima em relação ao mar: 1180 e 560 m respectivamente;
- Nível de poluição da região: baixo;
- Índice cerâmico médio da região: 60 dias trovoadas / ano.

Para o segundo trecho são 77 estruturas de concreto do tipo canadense composta por postes de suspenções com 5 isoladores nas suspenções e 6 isoladores nas ancoragens contendo como material isolante o vidro ou a porcelana. 3 unidades de cabos condutores com a seção nominal de 1 AWG composto por um fio de aço revestido por fios de alumínio eletrolítico nas fases e 1 cabo guarda de aço 5/16”.

Características Elétricas da Linha de Transmissão:

- Tensão nominal entre fases: 88 kV;
- Tensão máxima operativa: 92 kV;
- Nível básico de impulso á seco (NBI): 550 kV;
- Capacidade de transporte de energia, capacidade final: 55 MVA;
- Regulação: 17,61 %;
- Fator de Potência: 95 %;
- Perdas: 7,70 %.
- Constantes elétricas da Linha de Transmissão de energia:

A impedância de sequência positiva será de 20,15 ohms, fase para neutro por circuito; a impedância de sequência zero própria 12,78 ohms, fase para neutro por circuito; e a própria reatância capacitiva $-j 70,54$ ohms por fase, por circuito.

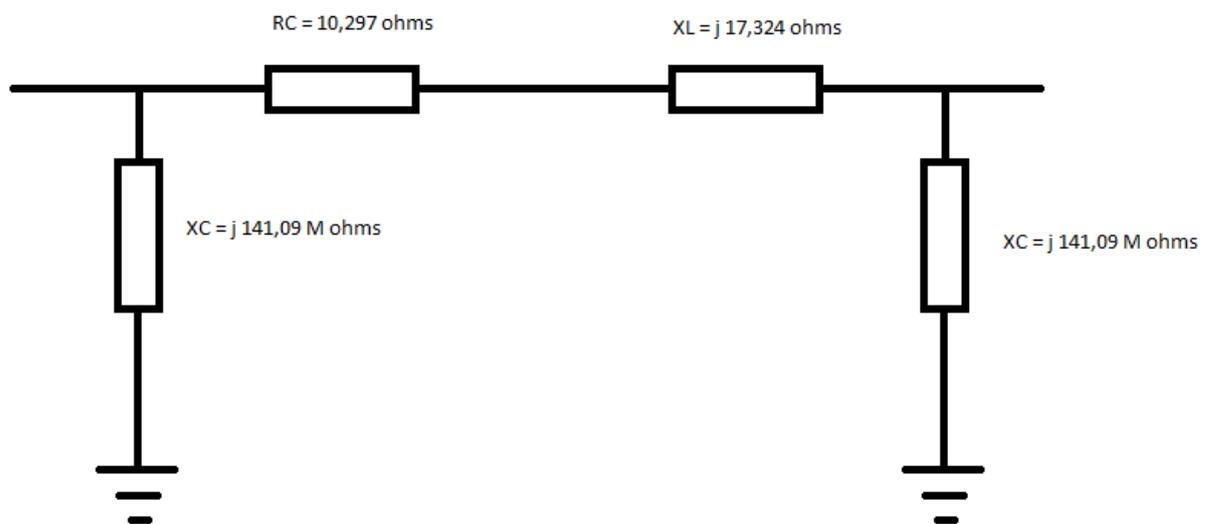


Figura 20 – Representação das constantes elétricas da LT 88 kV Guaratinguetá / Cunha (Elektro)

Na saída da Subestação de Guaratinguetá, Figura 21, existem 3 para raios conectados nos cabos condutores que são ligados a malha de aterramento da Subestação, o mesmo se dá à Subestação de Cunha em sua chegada.



Figura 21- Saída da subestação Guaratinguetá (Elektro)

3.2. Dados levantados pelo relé Schweitzer 351A na Subestação de Guaratinguetá.

A tabela 1 e o gráfico representado pela figura 25 nos mostram os eventos sobre a perturbação em seu tempo e sequência de atuações dos dispositivos de proteção facilitando a visão das grandezas de tensão e corrente com suas reações durante a perturbação.

A linha de transmissão de 88kV Guaratinguetá / Cunha é considerada uma linha de transmissão radial de circuito único onde na ocorrência de um curto circuito em um determinado ponto a corrente de curto circuito terá um valor constante ao longo da linha, enquanto a tensão vai a zero no ponto de curto circuito e cresce em direção à fonte de alimentação.

Desprezando-se o problema da resistência de arco voltaico, a impedância $Z = V / I$ será igual a zero no ponto de defeito e crescerá em direção à fonte de alimentação na Subestação de Guaratinguetá, onde podemos concluir que o relé Schweitzer 351A utiliza-se das impedâncias para o tempo de operação que por sua vez são proporcionais a distância, onde teremos a atuação do relé que por medir a impedância menor dará também um tempo de atuação menor.

Os ajustes para a excitação ou partida do relé de distância são feitos ou através da sobrecorrente, ou pela subimpedância onde existe atuação quando a impedância cai abaixo do valor ajustado no relé.

O relé Schweitzer 351A compila os dados dos valores recebidos pelos secundários dos Transformadores de Corrente e pelos Transformadores de Potencial conforme mostra as figuras 22 e 23 tornando assim possível o monitoramento das correntes e das tensões em cada fase da linha de transmissão, possibilitando assim o envio do sinal de desligamento para o disjuntor.



Figura 22 - Transformador de corrente (Subestação Guaratinguetá Elektro)



Figura 23 - Transformador de Potencial (Subestação Guaratinguetá Elektro)

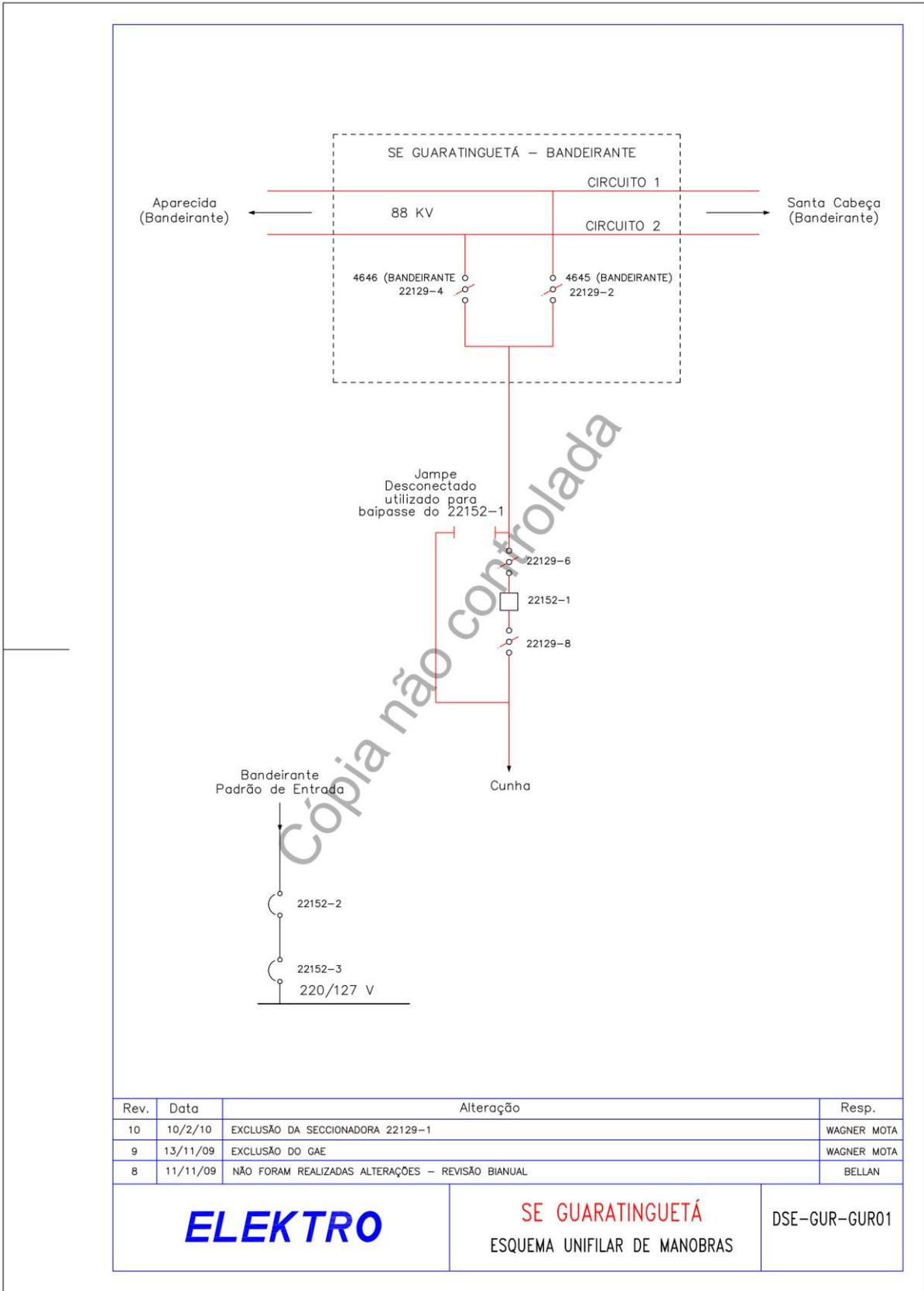


Figura 24 – Esquema unifilar de manobras (Subestação Guaratinguetá Elektro)

Analisando a perturbação ocorrida no dia 11 de agosto de 2013 verificamos através da tabela e do gráfico extraídos do relé Schweitzer 351A tabela 1 o início de um curto circuito com habilitação das proteções 51N temporizado de neutro e na sequência 50N instantâneo de neutro entre os passos 55 e 51 onde se habilitou a função de religamento 79 sendo enviado sinal de abertura para o disjuntor 52-1 pela porta OUT107 do relé Schweitzer 351A.

Após a confirmação de abertura do disjuntor 52-1 no passo 49 em um tempo de trinta e quatro milissegundos foi enviado pelos contatos auxiliares do disjuntor a confirmação da sua abertura constatada na porta de entrada IN101 do relé, na sequência após varredura das proteções entre os passos 48 e 44 foi enviado o comando de fechamento em um tempo de 613 milissegundos conforme o passo 42 habilitado pela porta OUT102 sendo confirmado o fechamento do disjuntor 52-1 no passo 41 através da porta IN101 do relé em um tempo de 92 milissegundos após o envio do sinal para fechamento do disjuntor.

Pode-se observar, na Tabela 1, os passos ocorridos durante a falta analisada no estudo de caso, bem como os detalhes dos acontecimentos. O passo 43 mostra a queda de tensão no sistema de comando da subestação no momento do envio de religamento do disjuntor 52-1 pela porta IN103 do relé.

No passo 38 houve o reset remoto das proteções efetuadas através do operador do sistema que supervisiona as subestações através da central de operações da Elektro localizado no município de Campinas reconhecendo a perturbação, sendo constatado um defeito transitório com uma única atuação, no momento o tempo estava aberto sem chuvas e sem descargas atmosféricas.

Passo	Data e horário	Função	Estado
55	08/11/13 06:36:28.299	51N	Asserted
54	08/11/13 06:36:28.299	51P	Asserted
53	08/11/13 06:36:28.303	50N1	Asserted
52	08/11/13 06:36:28.303	79CY	Asserted
51	08/11/13 06:36:28.303	OUT107	Asserted
50	08/11/13 06:36:28.312	50P1	Asserted (COMANDO ABRIR 52-1)
49	08/11/13 06:36:28.337	IN101	Asserted
48	08/11/13 06:36:28.382	50P1	Deasserted
47	08/11/13 06:36:28.391	50N1	Deasserted
46	08/11/13 06:36:28.395	51P	Deasserted
45	08/11/13 06:36:28.399	51N	Deasserted
44	08/11/13 06:36:28.453	OUT107	Deasserted
43	08/11/13 06:36:28.474	IN103	Asserted (FALTA VCC/VCA)
42	08/11/13 06:36:28.950	OUT102	Asserted (COMANDO FECHAMENTO)
41	08/11/13 06:36:29.142	IN101	Asserted (DISJUNTOR FECHADO)
40	08/11/13 06:36:29.142	OUT102	Deasserted
39	08/11/13 06:36:59.165	79CY	Deasserted
38	08/11/13 06:54:05.920	OUT101	Asserted (RESET ALARMES)
37	08/11/13 06:54:05.949	IN103	Deasserted
36	08/11/13 06:54:06.425	OUT101	Deasserted

Tabela 1 - Eventos do relé SCHWEIRZER 351A subestação Guaratinguetá (Elektro)

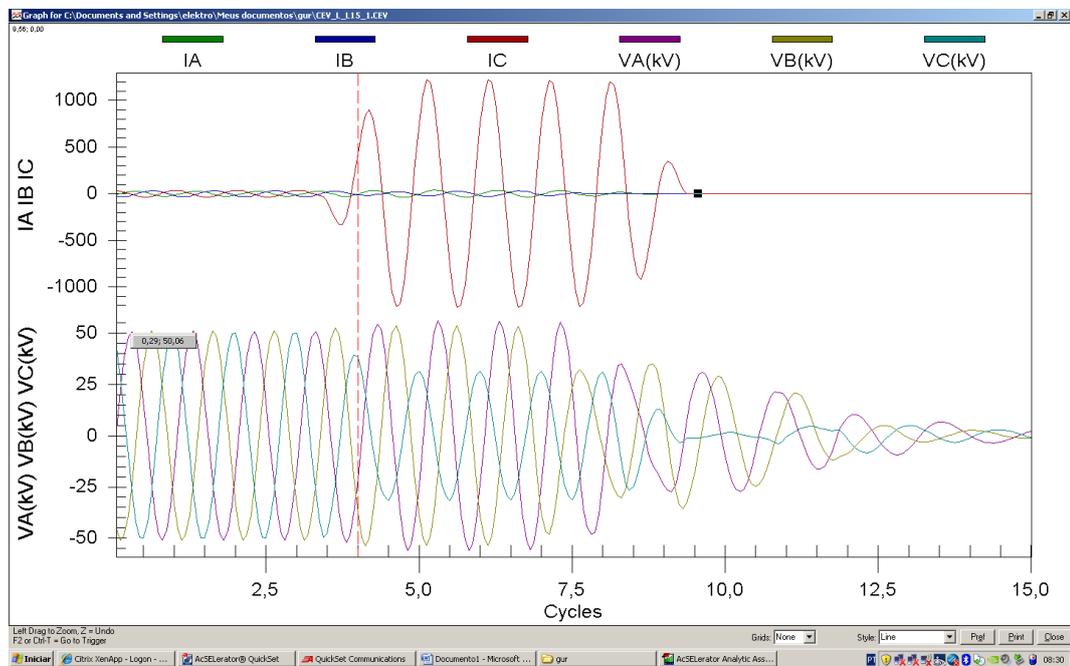


Figura 25 – Gráfico de Perturbação da Linha de Transmissão 88 kV Guaratinguetá / Cunha relé SCHWEIRZER 351A

Conforme análise efetuada sobre os gráficos da figura 25, podemos verificar a representação das correntes de cada fase representadas pelas cores verde na fase A, cor azul na fase B e a cor vermelha na fase C. As correntes se encontram em sua normalidade com a carga nominal da Linha de Transmissão até o ciclo de 2,5 a partir desse ponto podemos observar a elevação da corrente na fase C representada pela cor vermelha atingindo uma corrente acima de 1.200 A, mantendo as fases A e B com o nível de corrente normal até a abertura do circuito em definitivo próximo do ciclo 10.

No momento da elevação da corrente representada pela fase C, na cor vermelha do primeiro gráfico, nota-se o afundamento de tensão causado na mesma fase representada no segundo gráfico pela cor azul claro seguidos pelas cores lilás para a fase A e a cor amarelo para a fase B.

O tempo desse afundamento de tensão e a elevação da corrente possibilitam a indicação através do relé Schweitzer 351A figura 26 mostrar a distância aproximada do ponto responsável pela perturbação ao longo da Linha de Transmissão, ponto esse que foi estimado em 20 km a partir da subestação de Guaratinguetá.

Através da tabela da progressiva (anexo 1) podemos identificar o ponto da perturbação próximo da estrutura 52, facilitando assim a inspeção pelos técnicos e a identificação da avaria.

Resumidamente a Figura 26 nos fornece além da data e horário do início da perturbação os parâmetros para a localização do defeito com os dados do relé. Evidenciando o evento na fase C para terra na localização a 20,14 km a uma frequência de 59,99 Hz com atuação do relé instantâneo (50) destacando as correntes na fase A = 38A, fase B = 24A, fase C = 1235A, em relação ao Neutro = 1241A, ao terra = 1238A e Q = 1208A.

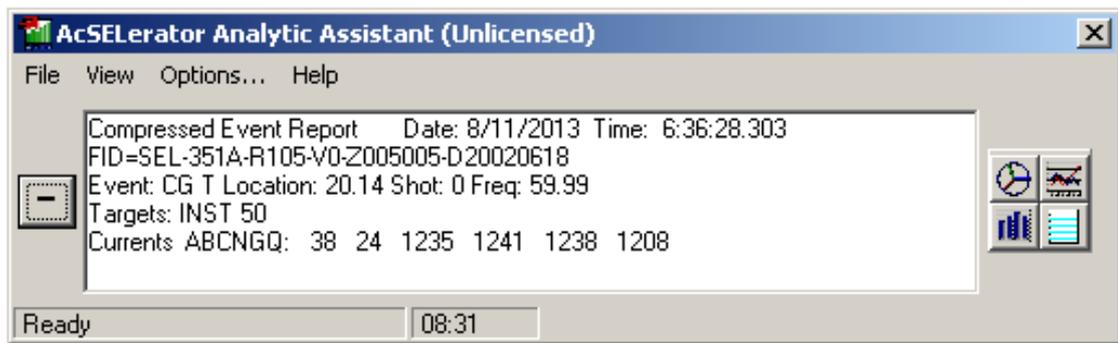


Figura 26 – Assistente Analítico da Perturbação da Linha de Transmissão relé Schweitzer 351A

Comprovação através do calculo efetuado pelo relé quanto à distância da fonte até o ponto da perturbação.

- Tensão trifásica: 88.000 volts

- Tensão monofásica: 50.806 volts

- Corrente na fase Terra: 1238 Amperes

- Rc da Linha de Transmissão: 10,297 Ohms

- Impedância a considerar do ponto do curto: $Z = V / I$

$$Z = 50.806 / 1238$$

$$Z = 41,04 \text{ Ohms}$$

- Distância da perturbação considerada na primeira zona, sem considerar a resistência do material que fechou o curto circuito: $L = (Rc / Z) \times 80$

$$L = (10,297 / 41,04) \times 80$$

$$L = 0,2509 \times 80$$

$$L = 20,07 \text{ Km}$$

Informações levantadas através da inspeção aérea realizada com helicóptero e inspeção terrestre efetuada pelos eletricitistas com escalada em todas as estruturas da Linha de Transmissão Guaratinguetá / Cunha foram identificadas as seguintes avarias:

- Plantação de eucaliptos invadindo a faixa de segurança apresentando riscos de tocar os cabos condutores na condição de ventos médios á fortes.

- Presença de fragmentos de balão próximo da estrutura 48 pendurados no cabo condutor da fase “C” e cabo guarda.

- Isoladores de vidro quebrados por vandalismo.

A avaria mais próxima da perturbação do dia 08/11/2013 foi a dos fragmentos do balão próximo à estrutura 48 e que se aproxima das características dos registros efetuados pelo relé Schweitzer 351A da subestação de Guaratinguetá (Elektro), representando apenas mais um defeito transitório.

Quando existe uma perturbação de fase com referência a terra o relé nos fornece uma informação da proximidade da possível avaria, pois devemos levar também em consideração as propriedades do material que está conduzindo a fase para terra, para isso as concessionárias de energia elétrica solicitam aos seus profissionais que inspecionem prioritariamente 2,5 km antes e 2,5 km após a distância informada pelo relé.

Para o relé fornecer com maior precisão a distância da perturbação, a perturbação deve ser trifásica, pois nesse caso as impedâncias da linha já são parametrizadas no relé, não existindo interferências de outros materiais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido aos dados levantados com a revisão bibliográfica e o estudo das proteções da linha de transmissão Guaratinguetá / Cunha na subestação de Guaratinguetá, através do relé Schweitzer 351A, pode-se concluir que a utilização de sistemas de proteção nas linhas de transmissão é de grande importância para proteção de possíveis descargas e perturbações, e ainda auxilia na rapidez para determinar o ponto onde ocorreu o evento.

Para a Elektro ou qualquer outra concessionária de energia elétrica reunir um conjunto de informações e dados após um desligamento possibilita um restabelecimento mais rápido de uma linha de transmissão favorecendo a condição de estudo para se evitar novas ocorrências.

Com os dados estudados e o resultado das inspeções aéreas e terrestres as perturbações relacionadas nos desligamentos tiveram como causa atos de vandalismo com quebras de isoladores, vegetação como plantações de eucaliptos que tocavam os cabos condutores, indícios de balão com corda de sisal queimada penduradas no cabo guarda e cabo condutor e a condição de para raios antigos ainda instalados nas subestações.

Nos pontos de vandalismo os isoladores de vidro foram substituídos por isoladores de porcelana, nas plantações, foi negociada a abertura da faixa de servidão com proprietários das áreas para uma largura onde os eucaliptos não correriam o risco de atingir os cabos condutores.

Os para raios de porcelana da subestação de Cunha foram substituídos por para raios poliméricos e quanto a substituição dos para raios da Subestação de Guaratinguetá, está previsto para o primeiro trimestre de 2014, a substituição dos mesmos. Com essa condição, porém, pode acontecer de outro balão atingir a linha de transmissão, o que necessitará da atuação dos relés de proteção e religamento para transformar o balão em mais um defeito transitório.

Com a realização da análise contida nesse trabalho, vem à tona, a importância do estudo da proteção dos sistemas elétricos de potência. Já o fato de estarem aqui incluídos,

dados reais, cedidos pela empresa Elektro, torna o Trabalho de Conclusão de Curso extremamente valioso, uma vez que no meio acadêmico, é de grande valia, os exemplos práticos de estudos de caso.

As informações contidas nesse trabalho de conclusão de curso abre caminho para novos trabalhos que possam utilizar esses dados reais aqui disponibilizados.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RUIZ, Eliana Maria Severino Donoio, **Manual para normalização de trabalhos acadêmicos**. Bragança Paulista: Editora Universitária São Francisco, 2010. 254 p.:il.

CAMINHA, Amadeu C., **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 211p.

MAMEDE, João Filho; Daniel R., **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MAMEDE, João Filho. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MAMEDE, João Filho. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

SENAI, **Riscos Elétricos**. Brasília, 2005.

WARRINGTON, A. R. Van C., **Protective Relays**, Chapman-Hall, 1962-69. 102p.

THE ENGLISH ELETRIC CO. LIMITED, **Protective Relays Application Guide**, 1996. 46p.

NBR 15237, **Esfera de sinalização diurna para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. São Paulo: ABNT, 2005.

<http://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-5.pdf>, consulta realizada em 12/11/2013

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgMI0AD/modulo-13-reles-distancia>, consulta realizada em 8/11/2013

http://www.selinc.com.br/tab_ansi.aspx, consultado em 12/10/2013

6 ANEXOS

Anexo 1: Locação de Estruturas e Progressiva da LT 88 kV GUR/CUN (Elektro)

A tabela a seguir descreve o ponto onde ocorreram as perturbações, na primeira coluna está o número da torre, a segunda o tipo de torre, na terceira a distância entre cada torre, na quarta coluna a distância progressiva das torres, e na quinta coluna descreve a fase onde houve a alteração, data, horário e distância em km.

LOCAÇÃO DE ESTRUTURAS E PROGRESSIVA DA LT. 88 kV GUR/CUN				
Número da Torre	Tipo de Torre	Distância entre as Torres (m)	Distância (m) Acumulada	Descrição Detalhada da Alteração na Linha
1		210,29	210,29	
2		547,48	757,77	
3		576,15	1333,92	
4		286,28	1620,2	
5		443,55	2063,75	Fase C e N, 28/03/2011, hora: 19:04, 2,77 km.
6		727,27	2791,02	
7		464,63	3255,65	
8		418,62	3674,27	
9		388,49	4062,76	
10		886,65	4949,41	
11		481,13	5430,54	
12		558,43	5988,97	
13		661,21	6650,18	
14		268,56	6918,74	
15		720,22	7638,96	
16		506,35	8145,31	
17		280,72	8426,03	
18		663,08	9089,11	
19		618,87	9707,98	

20		421,33	10129,31	
21		440,55	10569,86	
22		325,34	10895,2	
23		466,21	11361,41	
24		582,02	11943,43	
25		801,53	12744,96	
26		410,17	13155,13	
27		432,84	13587,97	
28		418,57	14006,54	
29		334,87	14341,41	
30		433,89	14775,3	
31		327,8	15103,1	
32		300,44	15403,54	
33		78,64	15482,18	
34	SUSP 20M	490,62	15972,8	Atuação 50F, instantâneo A/B/C, 14/03/2011, hora: 17:02, 16 km
35	ANC 22M	397,3	16370,1	
36		368,79	16738,89	
37		91,96	16830,85	
38		86,8	16917,65	
39	SUSP 24M	109,83	17027,48	Fase B, 01/07/2013, hora 16:27, 17,46 km Fase A, 08/12/2011, hora: 17:35, 17,6 km.
40	ANC 18M	508,41	17535,89	
41	SUSP 22M	79,56	17615,45	
42	SUSP 20M	168,41	17783,86	Fase C, 08/12/2012, hora: 17:34, 17,9 km
43	SUSP 18M	415,38	18199,24	
44		227,99	18427,23	
45		463,08	18890,31	
46	SUSP 21M	164,67	19054,98	Vestígio de balão
47		138,44	19193,42	
48	SUSP 21M	100,5	19293,92	Fase B, 09/08/2013, hora: 6:55, 19,41 km
49	SUSP 20M	435,82	19729,74	
50		104,91	19834,65	

51	SUSP 21M	129,94	19964,59	Fase C,08/11/2013, hora: 6:36, 20,14 km
52	SUSP 20M	359,74	20324,33	
53		213,77	20538,1	
54		104,9	20643	
55		391,61	21034,61	
56		381,3	21415,91	
57		164	21579,91	
58		169,51	21749,42	
59		95,22	21844,64	
60	SUSP 18M	297,07	22141,71	Fase A, 17/02/2011, hora: 15:21, 22,33 km
61	SUSP 21M	448,67	22590,38	
62		334,26	22924,64	
63		101,81	23026,45	
64		431,35	23457,8	
65		111,23	23569,03	
66		222,6	23791,63	
67		124,05	23915,68	
68		439,15	24354,83	
69		269,94	24624,77	
70		274,41	24899,18	
71		328,96	25228,14	
72		333,16	25561,3	
73		106,85	25668,15	
74		149,34	25817,49	
75		249,25	26066,74	
76		201,22	26267,96	
77		425,73	26693,69	
78		287,91	26981,6	
79		150,77	27132,37	
80	SUSP 21M	350,29	27482,66	Fases A/B/V, 08/12/2012, hora: 16:11, 27,8 km
81	SUSP 18M	351,94	27834,6	

82		276,35	28110,95	
83		370,01	28480,96	
84	SUSP 20M	189,87	28670,83	Fase C e N, 22/02/2011, hora: 21:29, 28,66 km
85	SUSP 18M	161,58	28832,41	
86		324,32	29156,73	
87		93,22	29249,95	
88		449,36	29699,31	
89		110,69	29810	
90		59,78	29869,78	
91		242,53	30112,31	
92		135,18	30247,49	
93		235,88	30483,37	
94		171,66	30655,03	
95		106,5	30761,53	
96		74,46	30835,99	
97		497,74	31333,73	
98		80,16	31413,89	
99		79,84	31493,73	
100	SUSP 21M	454,58	31948,31	Fase A/B/V, 01/07/2013, hora: 17:19, 32,31 km
101	SUSP 21M	500,81	32449,12	
102		444,72	32893,84	
103		468,09	33361,93	
104		77,93	33439,86	
105		228,11	33667,97	
106		82,83	33750,8	
107		467,99	34218,79	
108		142,41	34361,2	
109		107,8	34469	
110		42,69	34511,69	

Anexo 2: Nomenclatura dos aparelhos de proteção e manobra - Elektro

Nr	Denominação
1	Elemento Principal
2	Relé de partida/ fechamento temporizado
3	Relé de verificação ou intertravamento
4	Contator principal
5	Dispositivo de desligamento
6	Disjuntor de partida
7	Relé de taxa de variação
8	Dispositivo de desconexão de controle de energia
9	Dispositivo de reversão
10	Chave de sequência unitária
11	Dispositivo multifunção
12	Dispositivo de sobrevelocidade
13	Dispositivo de rotação síncrona
14	Dispositivo de subvelocidade
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade ou frequência
16	Reservado para futura aplicação
17	Chave de derivação ou descarga
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
19	Contator de transição partida-marcha
20	Válvula operada eletricamente
21	Relé de distância
22	Disjuntor equalizador
23	Dispositivo de controle de temperatura
24	Relé de sobre excitação ou V/ Hz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Relé de subtensão
28	Detetor de chama
29	Contator de isolamento

30	Relé anunciador
31	Dispositivo de excitação
32	Relé direcional de potência
33	Chave de posicionamento
34	Dispositivo master de sequência
35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores
36	Dispositivo de polaridade de tensão
37	Relé de subcorrente ou subpotência
38	Dispositivo de proteção de mancal
39	Monitor de condições mecânicas
40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo
41	Disjuntor ou chave de campo
42	Disjuntor/ chave de operação normal
43	Dispositivo de transferência ou seleção manual
44	Relé de sequência de partida
45	Monitor de condições atmosféricas
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente
47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
48	Relé de sequência incompleta/ partida longa
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
52	Disjuntor de corrente alternada
53	Relé para excitatriz ou gerador CC
54	Dispositivo de acoplamento
55	Relé de fator de potência
56	Relé de aplicação de campo
57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito
58	Relé de falha de retificação
59	Relé de sobretensão
60	Relé de balanço de corrente ou tensão
61	Sensor de densidade

62	Relé temporizador
63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
64	Relé detetor de terra
65	Regulador
66	Relé de supervisão do número de partidas
67	Relé direcional de sobrecorrente
68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
69	Dispositivo de controle permissivo
70	Reostato
71	Dispositivo de detecção de nível
72	Disjuntor de corrente contínua
73	Contator de resistência de carga
74	Relé de alarme
75	Mecanismo de mudança de posição
76	Relé de sobrecorrente CC
77	Dispositivo de telemedição
78	Relé de medição de ângulo de fase/ proteção contra falta de sincronismo
79	Relé de religamento
80	Chave de fluxo
81	Relé de frequência (sub ou sobre)
82	Relé de religamento de carga de CC
83	Relé de seleção/ transferência automática
84	Mecanismo de operação
85	Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial
88	Motor auxiliar ou motor gerador
89	Chave seccionadora
90	Dispositivo de regulação (regulador de tensão)
91	Relé direcional de tensão
92	Relé direcional de tensão e potência
93	Contator de variação de campo

94	Relé de desligamento
95 à 99	Usado para aplicações específicas

Anexo 3: Complementação da Tabela ANSI:

50N - sobrecorrente instantâneo de neutro

51N - sobrecorrente temporizado de neutro (tempo definido ou curvas inversas)

50G - sobrecorrente instantâneo de terra (comumente chamado 50GS)

51G - sobrecorrente temporizado de terra (comumente chamado 51GS e com tempo definido ou curvas inversas)

50BF - relé de proteção contra falha de disjuntor (também chamado de 50/62 BF)

51Q - relé de sobrecorrente temporizado de seqüência negativa com tempo definido ou curvas inversas

51V - relé de sobrecorrente com restrição de tensão

51C - relé de sobrecorrente com controle de torque

50PAF - sobrecorrente de fase instantânea de alta velocidade para detecção de arco voltaico

50PAF - sobrecorrente de neutro instantânea de alta velocidade para detecção de arco voltaico

59Q - relé de sobretensão de seqüência negativa

59N - relé de sobretensão residual ou sobretensão de neutro (também chamado de 64G)

64 - relé de proteção de terra pode ser por corrente ou por tensão. Os diagramas unifilares devem indicar se este elemento é alimentado por TC ou por TP, para que se possa definir corretamente. Se for alimentado por TC, também pode ser utilizado como uma unidade 51 ou 61. Se for alimentado por TP, pode-se utilizar uma unidade 59N ou 64G. A função 64 também pode ser encontrada como proteção de carcaça, massa-cuba ou tanque, sendo aplicada em transformadores de força até 5 MVA.

67N - relé de sobrecorrente direcional de neutro (instantâneo ou temporizado)

67G - relé de sobrecorrente direcional de terra (instantâneo ou temporizado)

67Q - relé de sobrecorrente direcional de seqüência negativa

78 - Salto vetorial (Vector Shift)

Anexo 4: Proteção Diferencial - ANSI 87

O relé diferencial 87 pode ser de diversas maneiras:

87T - diferencial de transformador (pode ter 2 ou 3 enrolamentos)

87T - diferencial de transformador (pode ter 2 ou 3 enrolamentos)

87N - diferencial de neutro

87Q - diferencial de sequência negativa (aplicado para detecção de faltas entre espiras em transformadores)

87G - diferencial de geradores

87GT - proteção diferencial do grupo gerador-transformador

87SP - proteção diferencial de fase dividida de geradores

87V – Diferencial de tensão de fase

87VN – Diferencial de tensão de neutro

87B - diferencial de barras. Pode ser de alta, média ou baixa impedância

Pode-se encontrar em circuitos industriais elementos de sobrecorrente ligados num esquema diferencial, onde os TC's de fases são somados e ligados ao relé de sobrecorrente.

Também encontra-se um esquema de seletividade lógica para realizar a função diferencial de barras.

Pode-se encontrar em algumas documentações o relé 68 sendo referido à função de seletividade lógica.

87M - diferencial de motores - Neste caso pode ser do tipo percentual ou do tipo autobalanceado.

O percentual utiliza um circuito diferencial através de 3 TC's de fases e 3 TC's no neutro do motor.

O tipo autobalanceado utiliza um jogo de 3 TC's nos terminais do motor, conectados de forma à obter a somatória das correntes de cada fase e neutro. Na realidade, trata-se de um elemento de sobrecorrente, onde o esquema é diferencial e não o relé.