



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ENSAIOS DAS FUNÇÕES DE SOBRECORRENTE E DISTÂNCIA
UTILIZANDO RELÉ DIGITAL DE PROTEÇÃO E APLICAÇÃO DE
SINAIS COM CAIXA DE TESTE**

ABILIO JOSÉ DA ROCHA CARDOSO

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO 2009

**ENSAIOS DAS FUNÇÕES DE SOBRECORRENTE E DISTÂNCIA
UTILIZANDO RELÉ DIGITAL DE PROTEÇÃO E APLICAÇÃO DE
SINAIS COM CAIXA DE TESTE**

ABILIO JOSÉ DA ROCHA CARDOSO

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA

APROVADO POR:

Prof. Sebastião E. M. de Oliveira. D. Sc.
(Orientador)

Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Maria Karla Vervloet Sollero, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO 2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus por toda oportunidade que me deu e pela perseverança que me concedeu nos momentos de maior turbulência em que o desânimo e a tristeza quase conseguiram me vencer.

Agradeço muito aos meus pais que sempre foram e continuam sendo incansáveis na luta para me oferecer o melhor, a fim de me possibilitar uma formação correta. Agradeço também o carinho e a atenção que nunca faltaram durante esta caminhada.

Agradeço a minha namorada Alessandra, que chegou à minha vida para completar uma parte que estava vazia e precisava ser completada para que o caminho fosse vencido. Sem o seu amor, carinho e atenção, nada disso seria possível.

Agradeço ao meu irmão por toda a ajuda principalmente a partir do momento em que fizemos as matérias juntos.

Agradeço a todos os meus parentes e amigos que de alguma forma me ajudaram e torceram por mim nesta caminhada.

Agradeço ao professor Sebastião pela orientação e ao Eng. Geraldo Magela Aoun, Furnas, pela assistência prestada na elaboração dos testes executados.

A todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento o meu obrigado pela ajuda e pelos ensinamentos passados.

Muito Obrigado a todos!

RESUMO

O trabalho foi desenvolvido para mostrar a utilização de mala de teste no ensaio de curto-circuito em relés de proteção. Foi utilizado um relé digital muito adotado na proteção de linhas de transmissão e foram ensaiadas nele as funções de distância (classificada como 21 pela norma ANSI) e sobrecorrente temporizada e instantânea (classificada com 50/51 pela norma ANSI). Os ensaios executados foram realizados no Laboratório de Proteção da UFRJ.

Para embasamento teórico dos ensaios comentados no parágrafo anterior, a teoria de curto-circuito é apresentada, passando pelos conceitos de componentes simétricas, montagem da matriz impedância de barra e tipos de curto-circuitos propriamente dito. São mostrados alguns dos principais relés de proteção existentes, como os relés de sobrecorrente (instantâneo e temporizado), direcional, distância e diferencial, assim como suas filosofias de atuação.

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</u>	1
<u>1.1– O Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN)</u>	2
<u>1.2 - Objetivos</u>	3
<u>1.3 – Visão Geral do texto</u>	4
<u>CAPÍTULO 2 – CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS</u>	6

<u>2.1 – Componentes Simétricas</u>	7
<u>2.2 – Impedâncias de sequência</u>	11
<u>2.3 – Matriz de Impedância de Barra</u>	13
<u>2.3.1 – Montagem da matriz Admitância de Barras (Y_{barra})</u>	13
<u>2.3.2 – Montagem da matriz Impedância de Barra (Z_{barra})</u>	16
<u>2.4 – Tipos de Curto-circuito</u>	17
<u>2.4.1 – Componentes da corrente de curto-circuito</u>	19
<u>2.4.2 – Curto-circuito simétrico</u>	21
<u>2.4.2.1 – Curto-circuito trifásico</u>	22
<u>2.4.3 – Curto-circuito assimétrico</u>	24
<u>2.4.3.1 – Curto-circuito monofásico terra</u>	25
<u>2.4.3.2 – Curto-circuito bifásico</u>	28
<u>2.4.3.3 – Curto-circuito bifásico terra</u>	31
<u>2.4.4 – Aplicação da matriz Z_{barra} para o curto-circuito</u>	33
<u>CAPÍTULO 3 – ESTUDOS DE PROTEÇÃO</u>	35
<u>3.1 - Aspectos Principais Quanto aos Relés de Proteção</u>	36
<u>3.1.1 – Zonas de Proteção</u>	37
<u>3.2 – Relé de Sobrecorrente</u>	38
<u>3.2.1 – Relé de Sobrecorrente Instantâneo</u>	41
<u>3.2.2 – Relé de Sobrecorrente Temporizado</u>	42
<u>3.2.2.1 – Tempo Definido</u>	42
<u>3.2.2.2 – Tempo Inverso</u>	42
<u>3.2.3 – Relé de Sobrecorrente Temporizado com Elemento Instantâneo</u>	44
<u>3.2.4 – Relé de Sobrecorrente de Neutro</u>	46
<u>3.2.5 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente</u>	48
<u>3.2.5.1 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido com Elemento Instantâneo</u>	50
<u>3.2.5.2 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso com Elemento Instantâneo</u>	52
<u>3.3 – Relé de Sobrecorrente Direcional</u>	55
<u>3.3.1 – Proteção com Relé de Sobrecorrente Direcional</u>	56
<u>3.3.2 – Coordenação de Sistema em Anel com Relés de Sobrecorrentes Direcionais</u>	56
<u>3.4 – Relé Direcional de Potência</u>	57
<u>3.5 – Relé de Distância</u>	57
<u>3.5.1 – Relé de Impedância</u>	58
<u>3.5.1.1 – Direcionalidade do Relé de Impedância</u>	59
<u>3.5.1.2 – Zonas de atuação do Relé de Impedância</u>	60
<u>3.5.2 – Relé de Admitância</u>	62
<u>3.5.2.1 – Zonas de atuação do Relé de Admitância</u>	63
<u>3.5.3 – Relé de Reatância</u>	64
<u>3.6 – Relé Diferencial</u>	65
<u>3.6.1 – Relé Diferencial Comum</u>	66
<u>3.6.2 – Relé Diferencial Percentual</u>	67
<u>3.7 – Outros Tipos de Relés e Proteções</u>	68
<u>3.7.1 – Relé de Sobretensão</u>	68
<u>3.7.2 – Relé de Subtensão</u>	68

3.7.3 – Relé de Religamento.....	69
3.7.4 – Proteção de Falha do Disjuntor	69
<u>CAPÍTULO 4 – MALA DE TESTE</u>	<u>70</u>
4.1 – Introdução.....	70
4.2 – Características de teste da Mala Omicron CMC 256-6.....	70
4.2.1 – Introdução.....	70
4.2.2 – Operando a CMC 256-6	71
4.2.3 – Iniciando o sistema de teste.....	72
4.2.4 – Configurações e Funções.....	72
4.2.4.1 – Saídas de Tensão	73
4.2.4.2 – Saídas de Corrente.....	73
4.2.4.3 – Entradas Analógicas e Binárias	73
4.2.4.4 – Saídas Binárias	75
4.2.4.5 – Fonte CC para Objeto de Teste.....	75
4.2.4.6 – Porta Paralela para Conexão.....	76
4.2.4.7 – Saídas de Baixo Nível	76
4.3 – Precisão e Qualidade	77
4.4 – Software Omicron Test Universe	77
4.4.1 – QuickCMC	79
4.4.2 – Ramping.....	80
4.4.3 – State Sequencer.....	80
4.4.4 – Outros módulos de teste	81
<u>CAPÍTULO 5 – TESTE NO RELÉ DIGITAL SEL 421 ATRAVÉS DA MALA TESTE CMC 256-6.....</u>	<u>83</u>
5.1 – Introdução.....	83
5.2 – Teste das funções de sobrecorrente e distância	85
5.2.1 – Teste da função de Sobrecorrente.....	86
5.2.2 – Teste da função de Distância	95
<u>CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO COM PROGRAMAS EXISTENTES.....</u>	<u>102</u>
6.1 – Introdução.....	102
6.2 – Facilidades Disponíveis no Programa ANAFAS	103
6.3 – Facilidades Disponíveis no Programa ASPEN OneLiner.	105
<u>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO.....</u>	<u>107</u>
<u>ANEXO 1</u>	<u>108</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>109</u>

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1 - Fasores de seqüência positiva, negativa e zero respectivamente.....</u>	<u>8</u>
<u>Figura 2 - Composição dos fasores das seqüências positiva, negativa e zero.....</u>	<u>9</u>
<u>Figura 3 – Sistema elétrico composto de três barras</u>	<u>14</u>
<u>Figura 4 – Sistema elétrico representado pelo modelo de rede de cada elemento</u>	<u>14</u>
<u>Figura 5 – Decaimento da corrente de curto-circuito no tempo.....</u>	<u>19</u>
<u>Figura 6 – Forma de onda de corrente simétrica</u>	<u>20</u>

<u>Figura 7 – Forma de onda de corrente com a componente assimétrica.....</u>	21
<u>Figura 8 – Exemplo de dois sistemas interligados por uma linha de transmissão.....</u>	22
<u>Figura 9 – Circuito equivalente de seqüência positiva.....</u>	23
<u>Figura 10 – Circuito equivalente de Thévenin</u>	23
<u>Figura 11 – Circuito equivalente para um curto-circuito monofásico.....</u>	25
<u>Figura 12 – Diagrama de seqüências para um curto-circuito monofásico</u>	26
<u>Figura 13 – Circuito equivalente do diagrama de seqüências para um curto-circuito monofásico.....</u>	27
<u>Figura 14 – Circuito equivalente para um curto-circuito bifásico.....</u>	28
<u>Figura 15 – Diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico</u>	29
<u>Figura 16 – Circuito equivalente do diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico.....</u>	30
<u>Figura 17 - Circuito equivalente para um curto-circuito bifásico terra</u>	31
<u>Figura 18 – Diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico terra</u>	32
<u>Figura 19 - Circuito equivalente do diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico terra</u>	32
<u>Figura 20 – Proteção de um sistema de elétrico em alta-tensão.....</u>	38
<u>Figura 21 – Atuação de proteção para um relé de sobrecorrente de tempo inverso.....</u>	43
<u>Figura 22 – Diferentes inclinações das curvas Tempo x M.....</u>	44
<u>Figura 23 – Gráfico Tempo x Corrente do relé de sobrecorrente 50/51.....</u>	45
<u>Figura 24 – Esquema e atuação do relé de sobrecorrente 50/51</u>	46
<u>Figura 25 - Esquema de ligação para o relé de sobrecorrente de neutro</u>	46
<u>Figura 26 - Esquema de ligação para os relés a jusante e a montante.....</u>	49
<u>Figura 27 – Sistema a ser utilizado como exemplo da coordenação dos relés de sobrecorrente temporizado de tempo definido com elemento instantâneo</u>	51
<u>Figura 28 – Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo definido com elemento instantâneo</u>	51
<u>Figura 29 – Tempo de atuação do relé B</u>	53
<u>Figura 30 – Nova curva para o relé A.....</u>	54
<u>Figura 31 – Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo.....</u>	54
<u>Figura 32 – Ligação de um relé sobrecorrente direcional à barra</u>	55
<u>Figura 33 – Coordenação de um sistema em anel</u>	57
<u>Figura 34 – Característica do Limiar de operação do relé de impedância</u>	59
<u>Figura 35 – Característica do acoplamento do relé de impedância e do relé direcional</u>	60
<u>Figura 36 – Zonas de atuação do relé de impedância acoplado com o relé direcional</u>	61
<u>Figura 37 – Coordenação do sistema elétrico em anel com relés de distância.....</u>	61
<u>Figura 38 – Diagrama jX x R do relé de admitância.....</u>	63
<u>Figura 39 – Zonas de atuação do relé de impedância.....</u>	63
<u>Figura 40 – Regulagem das zonas de atuação com o ângulo natural da linha corrigido.....</u>	64
<u>Figura 41 – Zonas de atuação do relé de reatância.....</u>	65
<u>Figura 42 – Proteção utilizando o relé diferencial comum.....</u>	66
<u>Figura 43 – Proteção utilizando o relé diferencial percentual</u>	67
<u>Figura 44 – Mala de teste CMC 256-6 da Omicron Eletronics</u>	71
<u>Figura 45 – Interface inicial do software Omicron Test Universe.....</u>	78
<u>Figura 46 - Tela para visualização de teste na ferramenta QuickCMC</u>	79
<u>Figura 47 – Tela para visualização de teste na ferramenta State Sequencer.....</u>	82
<u>Figura 48 - Relé digital modelo 421 da SEL (Schweitzer Engineering Laboratories).....</u>	83
<u>Figura 49 – Tela inicial do módulo de teste Overcurrent</u>	87

<u>Figura 50 – Tela para configuração no software do relé a ser testado.....</u>	88
<u>Figura 51 – Tela para ajustes do relé SEL 421</u>	89
<u>Figura 52 – Ajustes do Dispositivo de proteção.....</u>	90
<u>Figura 53 – Definição das características</u>	91
<u>Figura 54 – Curva característica traçada</u>	92
<u>Figura 55 – Configuração das saída de tensão e corrente da mala de teste.....</u>	93
<u>Figura 56 – Configuração das entradas binárias/analógicas da mala de teste</u>	94
<u>Figura 57 – Tela com o ensaio de sobrecorrente executado</u>	94
<u>Figura 58 – Tela inicial do módulo de teste Distance.....</u>	96
<u>Figura 59 - Configuração do equipamento em teste.....</u>	96
<u>Figura 60 – Configuração dos parâmetros do relé.....</u>	97
<u>Figura 61 - Ensaio de distância realizado</u>	99
<u>Figura 62 - Gráfico X x R das zonas de atuação do relé de distância</u>	101

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1 – Frequência de ocorrência dos curtos-circuitos.....</u>	17
<u>Tabela 2 – Resultados do ensaio da função de sobrecorrente do relé SEL 421.....</u>	95
<u>Tabela 3 - Pontos dentro da 1º zona de proteção</u>	99
<u>Tabela 4 - Pontos dentro da 2º zona de proteção</u>	100
<u>Tabela 5 - Pontos fora das zonas de proteção</u>	100

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um aumento de demanda por energia elétrica, impulsionado principalmente pelo grande desenvolvimento industrial no mundo. Para acompanhar este desenvolvimento, foi necessária a busca por novas fontes de energia e a exploração das mesmas para geração principalmente de energia elétrica. Os países mais industrializados passaram a contar com diferentes formas de geração, a fim de garantir o crescimento econômico.

Contudo, além desta busca por novas fontes, foi necessário o aumento da quantidade existente de linhas de transmissão para que diferentes usinas geradoras abasteçam simultaneamente diferentes áreas de consumo, garantindo que elas fiquem o menor tempo possível sem energia, no seguimento a uma perturbação ou ocorrência de curto circuito. Com isto os sistemas elétricos passaram a ser interligados, tornando a operação e o controle destes sistemas uma tarefa complexa.

Os sistemas elétricos de potência passaram a exigir do homem técnicas e estudos cada vez mais precisos e refinados para construção, manutenção e operação de uma forma que atenda ao consumidor final (residencial, comercial e industrial) em suas necessidades.

Os consumidores finais de energia estão cada vez mais sensíveis e exigentes, de modo que, para atender aos anseios deste mercado ascendente, faz-se necessário um aumento nos investimentos de novas técnicas e tecnologias visando melhorar o fornecimento de energia.

Um sistema elétrico é composto de usinas geradoras, que podem ser hidráulicas, térmicas, eólicas ou solares, entre outras, por subestações elevadoras de tensão, por linhas de transmissão, por subestações abaixadoras de tensão e por subestações distribuidoras que irão irradiar a energia recebida até os consumidores finais. Contudo, uma gama de equipamentos está presente em um sistema, entre os quais podemos citar: transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, relés, pára-raios, isoladores, reatores, bancos de capacitores, etc.

Todos estes equipamentos necessários para a operação correta de um sistema de potência estão em contínua evolução e aperfeiçoamento a fim de garantir melhor índice de eficiência na geração e consumo da energia elétrica, assim como garantir os padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade.

1.1– O Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN)

O Sistema Interligado Nacional, também conhecido como SIN, é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas de diferentes proprietários. O SIN interliga todas as regiões do país, permitindo trocas de energia entre elas e garantindo a confiabilidade do sistema. Apenas 3,4 % da energia gerada no país não é processada pelo SIN, estando presente em pequenos sistemas isolados existentes, principalmente, na Amazônia.

Para coordenação e operação do SIN, foi criado em 26 de agosto de 1998 o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que é uma entidade privada, sem fins lucrativos e que atua sob a fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ela tem por objetivo não só a operação do SIN, como já mencionado, como também garantir a segurança, a continuidade do serviço e o correto uso das fontes de energia disponíveis.

Toda a análise da quantidade de energia a ser gerada nas usinas, do carregamento de uma determinada linha de transmissão, da necessidade ou não de inserção de reatores ou banco de capacitores, do sentido do fluxo de potência nas linhas de transmissão, do intercâmbio de energia entre as áreas, entre outras decisões, é de responsabilidade do ONS e cabe aos agentes geradores e agentes transmissores respeitarem estas decisões.

A configuração de um sistema elétrico pode ser classificada como em anel ou radial, a configuração em anel ocorrendo com a evolução e interligação do mesmo a outros sistemas radiais. No Brasil, o Sistema Interligado Nacional pode ser considerado apresentar configuração em anel enquanto os sistemas isolados da Amazônia estão dispostos radialmente. Em um sistema elétrico em anel, a coordenação da proteção é feita de maneira mais cuidadosa e seletiva, pois as perturbações em qualquer parte do sistema podem ocasionar danos em outras partes do sistema.

Em um sistema elétrico as perturbações mais frequentes são os curto-circuitos. Os curto-circuitos são caracterizados como o aumento da intensidade da corrente em um determinado ponto. São extremamente perigosos, pois podem causar dano aos equipamentos (geradores, transformadores...) além de possibilitar a perda de estabilidade.

Para o dimensionamento da proteção, é necessário o conhecimento das correntes de curto-circuito. Para o cálculo das correntes em um sistema interligado, é necessária a utilização de programa computacional que seja capaz de representar todo o sistema (normalmente através da matriz Z_{barra}) e que possa calcular todos os tipos básicos de curto-circuito, em qualquer barra do sistema, e determinar o perfil de tensões ao longo do mesmo durante os defeitos referidos. Com isto, a proteção de cada linha de transmissão, de cada gerador ou de qualquer outro equipamento poderá ser dimensionada de forma a apresentar atuação correta, resultando em proteção efetiva dos equipamentos.

Com a proteção especificada e alocada nas subestações e usinas geradoras, passa a ser necessário realizar a parametrização dos relés de proteção. Para que os mesmos sejam testados e seus ajustes verificados, existem no mercado caixas de testes de diversos fabricantes. Estas malas de teste permitem a simulação da operação ou da não operação dos relés para diferentes tipos de defeitos, fazendo com que os relés sejam testados sob condições muito próximas das verdadeiras que são impostas durante a operação real dos sistemas de potência.

1.2 - Objetivos

O objetivo deste trabalho é mostrar as facilidades existentes em uma mala de teste, assim como sua importância para os ajustes e ensaios dos relés. Será ensaiado um relé digital muito utilizado em proteção de linhas de transmissão, contendo várias funções de proteção, entre elas a de sobrecorrente e a de distância. Este relé será parametrizado com valores previamente estabelecidos e então será visto a atuação das funções de sobrecorrente instantânea e temporizada e distância e estudado o comportamento do relé para alguns tipos de curto-circuitos, aplicados através da mala de teste.

Para a função de sobrecorrente será visualizada a corrente de ajuste do relé, conhecida como corrente de pick-up ($I_{\text{pick-up}}$), assim como a sua característica inversa de operação. Através da mala de teste a curva característica será determinada e os tempos de atuação medidos de acordo com esta curva. Cada tempo de atuação medido através dos terminais de saída do relé é comparado com o tempo parametrizado nele, isto para um ajuste pré-determinado.

Para a função de distância, serão feitos testes para pontos de defeito próximos aos limites internos e externos das zonas de proteção e observados os resultados obtidos.

1.3 – Visão Geral do texto

Para atingir o objetivo principal, foi necessária a divisão do trabalho em capítulos de acordo com os assuntos a serem abordados. Abaixo é feita uma pequena introdução dos capítulos presentes no trabalho.

No capítulo 2 é apresentada análise dos curto-circuitos normalmente desenvolvidos nos sistemas elétricos, incluindo descrição das componentes simétricas necessárias para melhor entendimento dos efeitos dos curtos-circuitos assimétricos. Mas antes da menção aos tipos de curto-circuito simétricos e assimétricos, as impedâncias de seqüência dos equipamentos e a matriz impedância de barra são apresentadas. Através de um exemplo para um sistema de três barras, é mostrado como a matriz admitância de barras Y_{bus} é construída, a matriz impedância de barras sendo obtida por inversão da matriz Y_{bus} . Todos os tipos de curtos-circuitos básicos são apresentados (trifásicos, bifásicos, bifásicos terra e monofásicos), incluindo descrição da montagem dos circuitos de seqüência para cada caso. Para a elaboração deste capítulo foram utilizadas as informações contidas em [1], [2], [4] e [7].

Todas as informações relacionadas aos estudos da proteção estão contidas no capítulo 3. O capítulo começa com uma breve descrição sobre a necessidade de um sistema de proteção para o sistema elétrico e para alguns dos equipamentos que o compõem. São apresentados alguns aspectos importantes relativos às proteções e às suas zonas de atuação e mostrados, de forma resumida, os principais tipos de relés, de sobrecorrente (e suas variações), direcional, de distância e diferencial. Para cada um destes, é mostrado como atuam no sistema elétrico, através de um exemplo que representa um sistema teste de duas linhas e três barras [5], [6].

O capítulo 4 apresenta descrição sobre a caixa de teste utilizada nos ensaios realizados e que se constitui no instrumento principal alvo do presente trabalho. As características técnicas do

equipamento, bem como do software da caixa instalado no computador serão descritas, de acordo com informações contidas em [8], [9] e [10].

O capítulo 5 é o foco do trabalho pois mostra os resultados das simulações feitas no relé digital utilizado. O referido relé digital foi parametrizado para atuação nas funções de sobre-corrente instantânea e temporizada e distância e através da mala de teste foram verificados estes ajustes, a fim de se observar a atuação do relé para as condições de curto-circuito monofásico. Foram usadas as referências [8], [9], [10], juntamente com [11].

No capítulo 6 foi feito um breve descritivo de dois importantes simuladores de defeitos em sistemas de potência existentes no mercado, Anafas e Aspen OneLiner. Foi feita uma comparação das duas ferramentas e mostrado qual se encaixa melhor para qual tipo de estudo [12], [13].

CAPÍTULO 2 – CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Podemos definir o curto-circuito como sendo a passagem de corrente elétrica acima do normal em um circuito devido à redução abrupta da impedância do mesmo. Normalmente o curto-circuito provoca danos tanto no circuito elétrico em que ocorre como no elemento que causou a redução de impedância.

Um sistema elétrico de potência está sujeito a ocorrências de diversos tipos de curto-circuito, que podem ser extremamente prejudiciais aos equipamentos que compõem o sistema.

Os curto-circuitos ocorrem através de impedâncias que podem ou não ser desprezíveis, sendo que esta ligação pode ser metálica, por arco elétrico ou por um galho, entre outros. Em linhas de transmissão, frequentemente ocorre curto-circuito por arco elétrico quando existe uma queimada próxima à linha, ou quando ocorrem descargas atmosféricas.

O estudo de curto-circuito é necessário para que se possa dimensionar e selecionar corretamente os relés de proteção, determinar a capacidade de interrupção dos disjuntores, calcular a máxima corrente de suportabilidade dos equipamentos e realizar a coordenação da proteção entre outros.

Em um sistema trifásico é possível o aparecimento de até quatro tipos de curtos-circuitos singelos com ou sem impedância, sendo eles:

- Monofásico para terra
- Bifásico
- Bifásico para terra
- Trifásico

Para o entendimento das ocorrências dos diversos tipos de curto-circuito, assim como para o cálculo das correntes de defeito em cada caso, é necessária a aplicação das componentes simétricas. De posse desse entendimento, levantaremos as estruturas das redes de seqüência e as impedâncias de seqüência dos equipamentos envolvidos. Apenas no caso do curto-circuito trifásico, pelo fato do mesmo ser equilibrado, utilizaremos apenas a rede de seqüência positiva.

2.1 – Componentes Simétricas

O método das componentes simétricas é uma ferramenta prática que possibilita o entendimento e a análise do sistema de potência durante condições assimétricas de operação, como as geradas pela ocorrência de curto-circuito entre fases e terra ou abertura de circuitos. Além disso, muitos relés são programados para atuar através de componentes simétricas.

O método em questão foi proposto por Charles L. Fortescue, quando o mesmo investigava matematicamente a operação de motores de indução em condições de desequilíbrio no início do

século passado. De acordo com ele, um sistema desequilibrado de n fasores correlacionados pode ser decomposto em n sistemas de fasores equilibrados denominados componentes simétricos dos fasores originais.

Temos então que um sistema trifásico desequilibrado pode ser substituído por três sistemas equilibrados de fasores. Estes sistemas de fasores ou conjuntos equilibrados de fasores são conhecidos como componentes de seqüência positiva, componentes de seqüência negativa e componentes de seqüência zero.

As componentes de seqüência positiva consistem em três fasores iguais em magnitudes, defasados de 120° entre si e tendo a mesma seqüência de fases que os fasores originais. São representados pelo número 1 ou pelo sinal +.

As componentes de seqüência negativa consistem em três fasores iguais em magnitude, defasados de 120° entre si e tendo a seqüência de fases oposta à dos fasores originais. São representados pelo número 2 ou pelo sinal \square .

As componentes de seqüência zero também consistem em três fasores iguais em magnitude, porém sem defasagem entre si (tem a mesma direção e mesmo sentido). São representados pelo número 0.

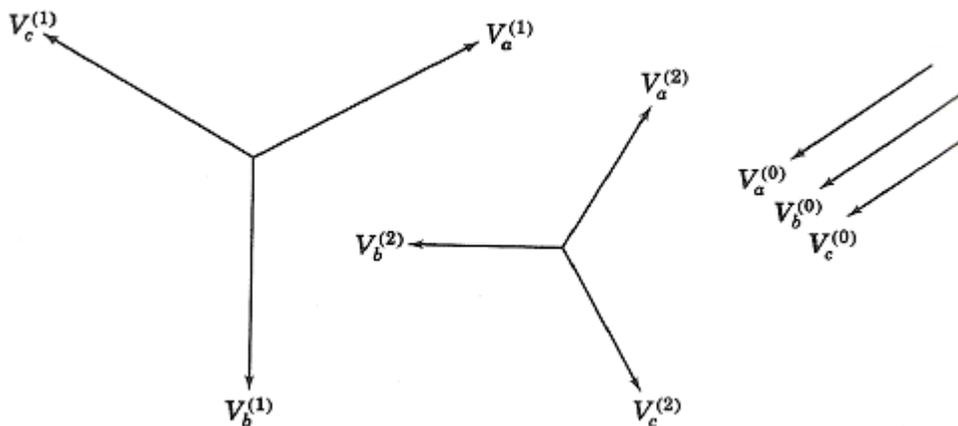


Figura 1 - Fasores de seqüência positiva, negativa e zero respectivamente

Em um sistema desequilibrado temos então a seguinte relação entre os valores de tensão nas fases abc e suas componentes simétricas:

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_a^{(1)} + V_a^{(2)} + V_a^{(0)} \\
 V_b &= V_b^{(1)} + V_b^{(2)} + V_b^{(0)} \\
 V_c &= V_c^{(1)} + V_c^{(2)} + V_c^{(0)}
 \end{aligned}
 \tag{2.1.1}$$

A figura 2 mostra a decomposição de um sistema trifásico equilibrado nas seqüências positiva negativa e zero de acordo com as equações 2.1.1.

Em sistemas trifásicos equilibrados, as tensões de fases b e c (V_b e V_c) podem ser representadas com o módulo da tensão da fase a (V_a), defasadas respectivamente de 120° e 240° da tensão da fase V_a . Esta defasagem entre as tensões das fases, normalmente é representada pela letra a . A letra a indica um número complexo de módulo unitário e fase 120° , definido como:

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j2\pi/3} = \square 0,5 + j0,866
 \tag{2.1.2}$$

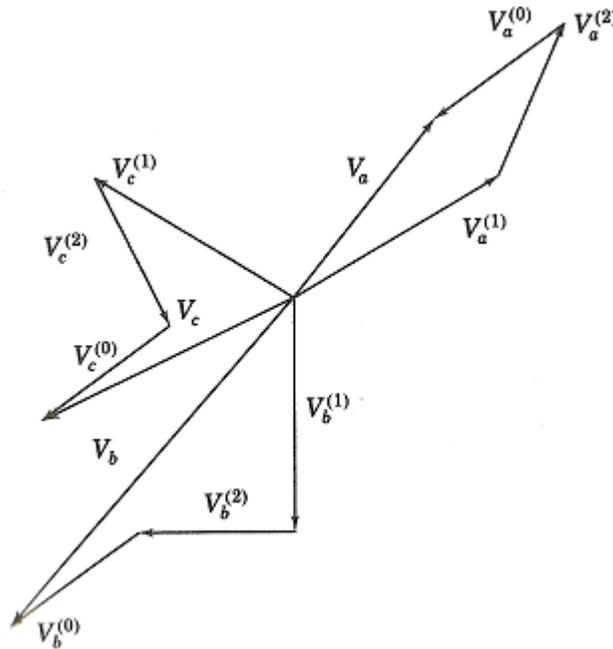


Figura 2 - Composição dos fasores das seqüências positiva, negativa e zero

Caso o operador a seja aplicado duas vezes ao mesmo fasor, teremos uma defasagem de 240° . A equação 2.1.3 representa o número complexo referente a este operador:

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = e^{j4\pi/3} = -0,5 - j0,866 \quad (2.1.3)$$

Multiplicando-se os operadores $a = 1\angle 120^\circ$ e $a^2 = 1\angle 240^\circ$ pelos fasores representativos das componentes de seqüência positiva e negativa da tensões da fase a, teremos:

$$\begin{aligned} V_b^{(0)} &= V_a^{(0)} & V_c^{(0)} &= V_a^{(0)} \\ V_b^{(1)} &= a^2 V_a^{(1)} & V_c^{(1)} &= a V_a^{(1)} \\ V_b^{(2)} &= a V_a^{(2)} & V_c^{(2)} &= a^2 V_a^{(2)} \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

Substituindo-se as equações 2.1.4 em 2.1.1, temos:

$$\begin{aligned} V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\ V_b &= V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \\ V_c &= V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

As equações 2.1.5 podem ser escritas na seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

Definimos então a matriz A como sendo:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.1.7)$$

que é denominada matriz de transformação de componentes simétricas. Invertendo-se a matriz A , obtemos:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

Desta forma, temos:

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

que mostra como ficam decompostos os três fasores representativos de um sistema assimétrico em suas componentes simétricas. Estas relações, escritas separadamente, ficam da seguinte forma:

$$V_a^{(0)} = 1/3(V_a + V_b + V_c) \quad (2.1.10)$$

$$V_a^{(1)} = 1/3(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.1.11)$$

$$V_a^{(2)} = 1/3(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.1.12)$$

A equação 2.1.10 mostra que não haverá componente de seqüência zero se a soma dos fasores desequilibrados for nula.

As equações acima podem ser escritas para qualquer conjunto de fasores, como correntes ao invés de tensões. Para o caso das correntes, as relações entre as correntes nas fases e as correntes nas componentes simétricas são as apresentadas nas equações 2.1.13, 2.1.14, 2.1.15, 2.1.16, 2.1.17 e 2.1.18.

$$I_a = I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} \quad (2.1.13)$$

$$I_b = I_a^{(0)} + a^2I_a^{(1)} + aI_a^{(2)} \quad (2.1.14)$$

$$I_c = I_a^{(0)} + aI_a^{(1)} + a^2I_a^{(2)} \quad (2.1.15)$$

$$I_a^{(0)} = 1/3(I_a + I_b + I_c) \quad (2.1.16)$$

$$I_a^{(1)} = 1/3(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2.1.17)$$

$$I_a^{(2)} = 1/3(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (2.1.18)$$

Em todo o sistema trifásico a soma das correntes de linha é igual à corrente de neutro. Caso não haja um retorno pelo neutro, então as correntes de linha não possuirão componente de seqüência zero. Isto é o que acontece, por exemplo, com as cargas ligadas em delta.

2.2 – Impedâncias de seqüência

Os elementos que compõem um sistema elétrico podem ser representados (para fins de cálculos de curto circuito) através de fontes de tensão em série com impedâncias, como nos casos de geradores e motores, ou através apenas de impedâncias, como as linhas de transmissão e transformadores.

Em cada circuito de seqüência do sistema elétrico, impedâncias representativas do desempenho dos equipamentos para tensões de seqüência positiva, negativa ou zero são incluídas.

Para cada componente de seqüência (positiva, negativa ou zero), é traçado um circuito monofásico equivalente incorporando as impedâncias vistas pelas componentes de seqüência das correntes de curto-circuito. Nestes circuitos são representados todos os elementos da rede, correspondentes a respectiva componente de seqüência.

Em qualquer parte de um circuito, a corrente de uma determinada seqüência provoca uma queda de tensão que depende da impedância do trecho do circuito percorrido. A impedância de um trecho do sistema desequilibrado vista por corrente de uma determinada seqüência é, de uma forma geral, diferente da impedância vista por outra componente de seqüência.

As impedâncias de seqüência positiva e negativa são iguais para as representações de linhas de transmissão, cargas e transformadores e também são consideradas iguais em máquinas síncronas nas representações do modo subtransitário. Já a impedância de seqüência zero é sempre diferente daquelas apresentadas nas outras duas seqüências.

Os geradores e as máquinas são representados através de uma fonte de tensão em série com uma impedância, apenas no circuito de seqüência positiva. Os circuitos de seqüência negativa e zero, são representados apenas através das impedâncias (nas suas respectivas

seqüências), sem fontes de tensão, pois os geradores são projetados para gerarem tensões balanceadas.

As correntes de seqüência positiva e negativa não circulam entre o neutro e a terra. Caso haja alguma impedância entre o neutro e o referencial terra de um sistema aterrado, ela não é incluída nos circuitos de seqüência positiva e negativa, mas são representadas no circuito de seqüência zero por impedância de valor três vezes maior entre o neutro e o terra.

Para cargas equilibradas e ligadas em Y aterrado, as impedâncias são consideradas iguais nas três componentes de seqüências. Já para as cargas ligadas em Δ , a impedância de seqüência zero é considerada infinita.

2.3 – Matriz de Impedância de Barra

Os sistemas elétricos de potência ocupam grandes áreas e envolvem uma grande variedade e quantidade de componentes de rede. Através da matriz de impedância de barra (Z_{barra}), toda a rede elétrica pode ser representada, o que viabiliza o estudo de fluxos de potência em condições normais ou em condições de curto-circuito.

Esta representação não é tão simples, pois para se representar um sistema elétrico, como o SIN (Sistema Interligado Nacional), por exemplo, é necessário um número enorme de linhas e colunas, o que só pode ser calculado pelo uso de métodos iterativos computacionais. Contudo, atualmente existem métodos mais rápidos de montagem da matriz impedância de barras, que diminuíram os esforços computacionais dos primeiros métodos iterativos.

A montagem direta da matriz Z_{barra} é bastante complicada, por isso inicialmente Z_{barra} era obtida através da inversão da matriz de admitância de barra (Y_{barra}).

Será mostrado primeiro o método de obtenção da matriz admitância de barra (Y_{barra}) e posteriormente como é obtida a matriz impedância de barra (Z_{barra}).

2.3.1 – Montagem da matriz Admitância de Barras (Y_{barra})

Iremos utilizar as figura 3 e 4 para mostrar como será obtida a matriz Y_{barra} .

A figura 3 representa um pequeno sistema elétrico com três barras tendo duas usinas e dois transformadores ligados às barras 1 e 2.

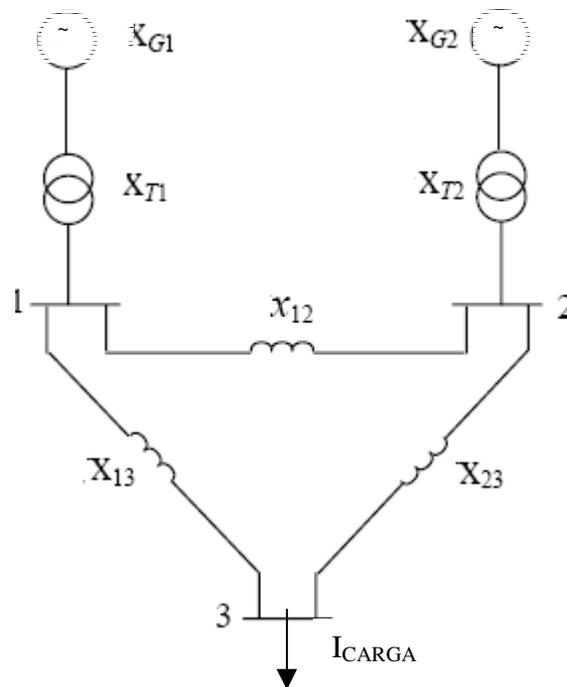


Figura 3 – Sistema elétrico composto de três barras

O sistema representado na figura 3 pode ser representado pelo modelo da figura 4. Neste novo modelo, os geradores que estão em série com os respectivos transformadores, foram representados por uma fonte de corrente em paralelo com uma admitância.

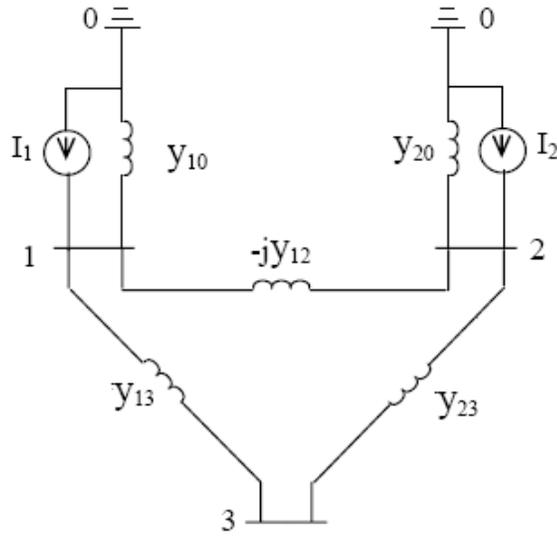


Figura 4 – Sistema elétrico representado pelo modelo de rede de cada elemento

Aplicando-se a lei de Kirchhoff nas barras 1, 2 e 3 respectivamente, teremos:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= y_{10} \times (V_1 - V_0) + y_{12} \times (V_1 - V_2) + y_{13} \times (V_1 - V_3) \\
 I_2 &= y_{20} \times (V_2 - V_0) + y_{12} \times (V_2 - V_1) + y_{23} \times (V_2 - V_3) \\
 0 &= y_{13} \times (V_3 - V_1) + y_{23} \times (V_3 - V_2)
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1.1}$$

Como $V_0 = 0$, teremos:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= y_{10} \times (V_1) + y_{12} \times (V_1 - V_2) + y_{13} \times (V_1 - V_3) \\
 I_2 &= y_{20} \times (V_2) + y_{12} \times (V_2 - V_1) + y_{23} \times (V_2 - V_3) \\
 0 &= y_{13} \times (V_3 - V_1) + y_{23} \times (V_3 - V_2)
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1.2}$$

Fazendo-se a reorganização das equações 2.3.1.2, obteremos:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13}) \times V_1 - y_{12} \times V_2 - y_{13} \times V_3 \\
 I_2 &= -y_{12} \times V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23}) \times V_2 - y_{23} \times V_3 \\
 0 &= -y_{13} \times V_1 - y_{23} \times V_2 + (y_{13} + y_{23}) \times V_3
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1.3}$$

Passando a expressão 2.3.1.3 para a forma matricial, teremos:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} + y_{13} & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{12} & y_{20} + y_{12} + y_{23} & -y_{23} \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{13} + y_{23} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}
 \tag{2.3.1.4}$$

Portanto, a equação 2.3.1.4 é da forma $I = Y_{barra} \times V$, onde I é o vetor das correntes injetadas nas barras, Y_{barra} é a matriz admitância de barra e V é o vetor das tensões nas barras.

A equação matricial acima, do formato 3 x 3 representa um sistema de 3 barras. Para um sistema de n barras, teremos uma matriz $n \times n$. A equação matricial 2.3.1.5 representa este sistema de n barras.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \mathbf{M} \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \Lambda & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \Lambda & Y_{2n} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \Lambda & Y_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \mathbf{M} \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.3.1.5)$$

Podemos observar que cada elemento da diagonal principal, chamado de indutância própria corresponde a um nó. É calculado pela soma das admitâncias conectadas ao respectivo nó. Na matriz 2.3.1.4, podemos observar, por exemplo, que o termo Y_{11} da matriz, corresponde a $y_{10} + y_{12} + y_{13}$, ou seja, a soma de todas as admitâncias conectadas à barra 1 (conforme se pode observar na figura 2.3.1.2).

Cada elemento fora da diagonal principal é igual ao negativo da admitância entre os nós. É conhecido como admitância mútua ou de transferência.

Além das características citadas acima, a matriz Y_{barra} tem outras características como a não singularidade, o que permite que ela seja invertida (possibilitando a obtenção da matriz Z_{barra}). Ela sempre é uma matriz quadrada de dimensão n , além de ser uma matriz esparsa ou seja, mais de 95 % dos seus elementos são nulos, o que facilita nos cálculos. O fato de a matriz Y_{barra} ser esparsa é de fácil justificativa pois, em um sistema de n barras, uma barra está conectada a um número médio de barras inferior a quatro.

2.3.2 – Montagem da matriz Impedância de Barra (Z_{barra})

Conforme dito no parágrafo anterior, a matriz Z_{barra} pode ser obtida através da inversão da matriz Y_{barra} . Esta inversão pode ser feita através de algoritmos de inversões de matrizes ou através de técnicas de montagem sem precisar inverter Y_{barra} .

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \mathbf{M} \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \Lambda & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \Lambda & Z_{2n} \\ \mathbf{K} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ Z_{n1} & Z_{2n} & \Lambda & Z_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \mathbf{M} \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.3.1.6)$$

A matriz Z_{barra} representada pela equação 2.3.1.6 é uma matriz genérica para um sistema de n barras. Ela tem as impedâncias de cada nó com relação a um nó de referência escolhido arbitrariamente.

Na diagonal principal estão as impedâncias no ponto de um nó e a impedância equivalente entre ele a referência. Fora da diagonal principal, a matriz Z_{barra} tem ainda a impedância de transferência (ou mútua) entre duas diferentes barras do sistema, também em relação ao nó de referência.

A matriz Z_{barra} possui ainda outras características comuns a Y_{barra} , como a simetria e o fato de ser sempre uma matriz quadrada de grau n . Contudo apresenta uma característica diferente da matriz Y_{barra} , que é o fato de ser uma matriz cheia.

2.4 – Tipos de Curto-circuito

Na introdução do capítulo 2 foram apresentados os quatro tipos de curto-circuitos singelos. Contudo, a percentagem ou a frequência de ocorrência dos tipos de curto-circuitos em um sistema de potência varia com o tempo e com alguns outros fatores como clima, localização física e construção, entre outros. Dados estatísticos mostram que os tipos de curto-circuitos obedecem à seguinte percentagem em relação ao número de faltas observadas:

Curto-circuito monofásico para terra	70 %
Curto-circuito bifásico	15 %
Curto-circuito bifásico para terra	10 %
Curto-circuito trifásico	5 %

Tabela 1 – Frequência de ocorrência dos curtos-circuitos

Contudo, os curto-circuitos podem evoluir de um tipo para outro, especialmente quando o tempo de atuação da proteção é grande, fazendo com que o defeito continue no sistema por um longo período. Um curto-circuito monofásico que é o mais comum de acontecer, por exemplo, pode evoluir para um curto-circuito bifásico para terra ou até mesmo para um curto-circuito trifásico. Já um curto-circuito bifásico pode evoluir, dependendo do tempo de atuação da proteção, para um curto-circuito bifásico para terra, ou até mesmo para um curto-circuito trifásico.

Normalmente as ocorrências de curto-circuito não resultam em danos permanentes aos equipamentos (transformadores, geradores, por exemplo), desde que a falta seja logo extinguida. A prática mais comum para extinção do defeito é a abertura do circuito e a espera da extinção do arco para posterior fechamento do circuito. Em linhas de transmissão, este tempo é muito curto, da ordem de milisegundos, quando ocorre a atuação do religamento automático.

Um curto-circuito é logo percebido pelas variações nas medições de um sistema de potência. Durante um defeito, temos um aumento de corrente, um aumento ou diminuição da tensão, variação da direção do fluxo de potência e de corrente e variação da frequência entre outros.

O aumento de corrente gerado pelo curto-circuito aumenta os esforços mecânicos entre os condutores ou entre componentes dos equipamentos (são os chamados efeitos mecânicos) e aquecimento dos condutores ou das partes condutoras dos equipamentos (são os chamados efeitos térmicos).

No caso dos curto-circuitos através de arcos elétricos podem ocorrer ainda explosões e incêndios. Se não houver uma pronta atuação da proteção, este curto-circuito dará origem a incêndios e explosões (são denominados efeitos explosivos).

Durante a ocorrência de um curto-circuito, a corrente de defeito sobe rapidamente atingindo o valor de crista (em geral superior em 10 vezes a corrente nominal) e vai em seguida diminuindo passando pelos valores subtransitório e transitório, para enfim atingir o valor em regime permanente.

Os valores das correntes de curto-circuito de um sistema dependem da f.e.m. dos geradores e das impedâncias existentes entre os geradores e o ponto de curto. Estas impedâncias existentes entre os geradores e o ponto de curto podem ser as reatâncias dos condutores e/ou de um transformador. Portanto, as cargas ligadas a estes sistemas não contribuem para a corrente de curto-circuito.

2.4.1 – Componentes da corrente de curto-circuito

Uma corrente de curto-circuito em um sistema elétrico qualquer, tem o seguinte decaimento com o tempo:

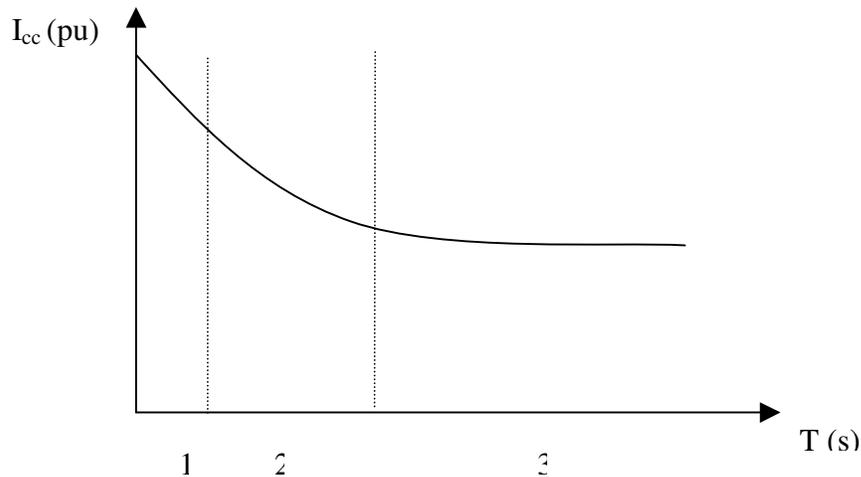


Figura 5 – Decaimento da corrente de curto-circuito no tempo

Onde 1 representa a corrente de curto-circuito imediatamente após o defeito, 2 representa a corrente de curto-circuito alguns ciclos após o defeito e 3 representa a corrente de curto-circuito em regime permanente.

Para o entendimento das componentes da corrente de curto-circuito, suponhamos um circuito composto por uma resistência R e impedância L em série, sendo alimentado por um gerador de tensão $V_{max}sen(\omega t + \alpha)$. A equação diferencial que representa este momento, quando o circuito alimentado é:

$$V_{\max} \text{sen}(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (2.4.1.1)$$

E a solução desta equação é:

$$i = \frac{V_{\max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - \varepsilon^{-\frac{Rt}{L}} \text{sen}(\alpha - \theta) \right], \quad (2.4.1.2)$$

onde $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$.

O primeiro termo da equação 2.4.1.2 varia senoidalmente com o tempo, sendo conhecido como a componente CA da corrente de curto-circuito. Já o segundo termo é conhecido como a componente CC da corrente de curto-circuito e que decai exponencialmente no tempo, com a constante de tempo L/R .

Esta componente CC é responsável pela assimetria presente nas correntes de curto-circuito e depende do valor da tensão no ponto de defeito no instante do curto-circuito. Se a tensão no ponto de defeito for máxima, a componente CC se anula, tornando a forma de onda da corrente de curto-circuito simétrica. Isto pode ser observado fazendo $\alpha - \theta = 0$ ou $\alpha - \theta = \pi$ na expressão 2.4.1.2. A figura 6 mostra esta simetria no curto-circuito. É interessante observar na figura 6 que a corrente inicial de curto-circuito é zero ($I_{cc0} = 0$)

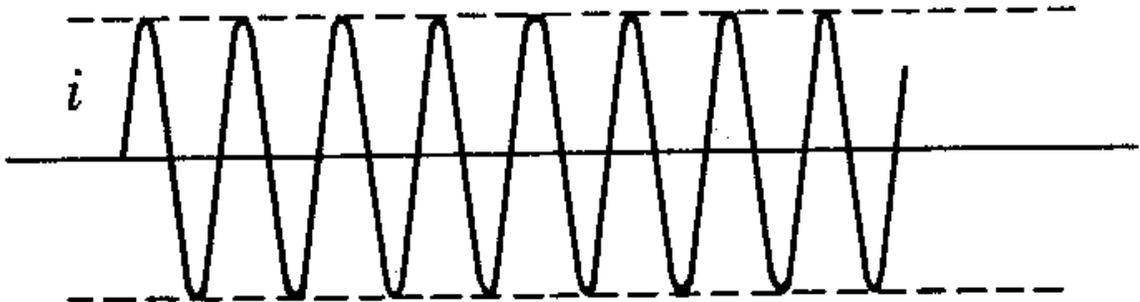


Figura 6 – Forma de onda de corrente simétrica

Já se a tensão no ponto de defeito for zero, teremos uma assimetria máxima. Isto pode ser observado fazendo $\alpha - \theta = \pm\pi/2$ na equação 2.4.1.2. A figura 7 mostra esta assimetria na corrente de curto-circuito. É interessante observar na figura 7, que a corrente inicial do curto-circuito tem a sua componente CC máxima, que é igual ao valor da componente CA da corrente. Por isso no momento inicial a corrente de curto-circuito está deslocada para cima do eixo X.

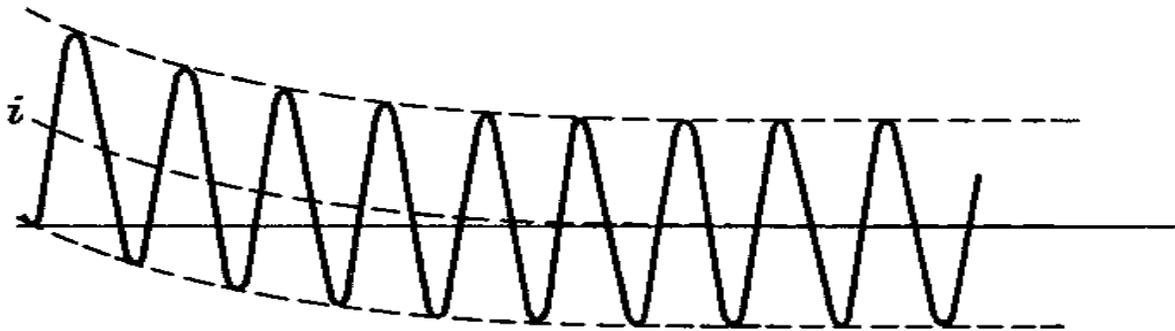


Figura 7 – Forma de onda de corrente com a componente assimétrica

2.4.2 – Curto-circuito simétrico

O curto-circuito simétrico é caracterizado como a ocorrência em que não há desbalanço das fases, pois este curto-circuito afeta os três condutores na mesma intensidade. Isto é possível, pois os geradores conectados a rede geram tensões equilibradas e os condutores em um mesmo sistema têm a mesma impedância. Por isto, neste tipo de ocorrência, não há componente de seqüência negativa e zero nas tensões e correntes. O único caso de ocorrência de curto-circuito simétrico é o curto-circuito trifásico.

2.4.2.1 – Curto-circuito trifásico

Este tipo de ocorrência não acontece com muita frequência, mas é o tipo mais severo de defeito que pode ocorrer.

A figura 8 representa um sistema em que temos duas unidades geradoras conectadas através de uma linha de transmissão,

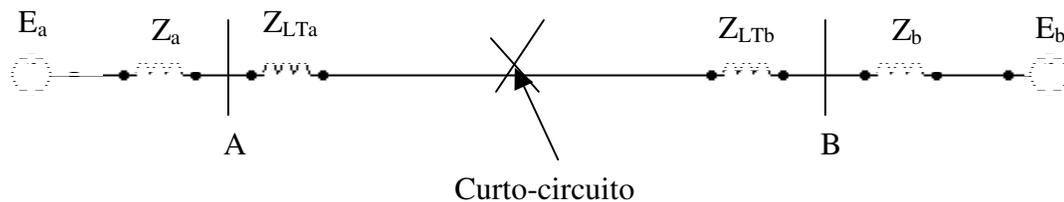


Figura 8 – Exemplo de dois sistemas interligados por uma linha de transmissão.

onde:

E_a – tensão do gerador A.

Z_a – impedância interna do gerador A mais impedância do transformador A.

Z_{LTa} – impedância da linha de transmissão entre o sistema A e o ponto de defeito.

E_b – tensão do gerador B.

Z_b – impedância interna do gerador B mais impedância do transformador B.

Z_{LTb} – impedância da linha de transmissão entre o sistema B e o ponto de defeito.

O circuito representado na figura 8, depois da ocorrência do curto-circuito pode ser representado pelo circuito da figura 9, que é seu circuito equivalente de seqüência positiva.

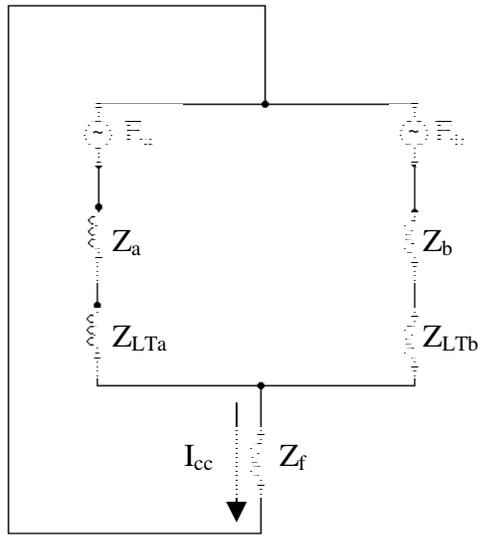


Figura 9 – Circuito equivalente de seqüência positiva

No circuito equivalente acima, foi representada a impedância de defeito Z_f e a corrente de curto-circuito I_{cc} . Esta impedância Z_f , pode ou não estar presente em curtos-circuitos e depende do material condutor que proporcionou o curto-circuito. O circuito acima ainda pode ser simplificado, fazendo o equivalente de Thévenin:

$$Z_{TH} = (Z_a + Z_{LTa}) // (Z_b + Z_{LTb}) \quad (2.4.2.1.1)$$

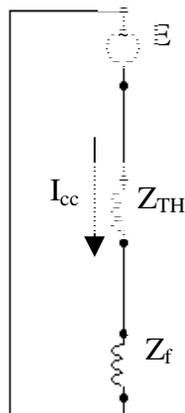


Figura 10 – Circuito equivalente de Thévenin

A figura 10 representa o equivalente de Thévenin do sistema representado na figura 8. Por este modelo obtemos facilmente a corrente de curto-circuito do sistema em questão, fazendo:

$$I_{cc} = \frac{E}{Z_{TH} + Z_f} \quad (2.4.2.1.2)$$

2.4.3 – Curto-circuito assimétrico

A maioria dos defeitos em um sistema de potência é assimétrica, podendo ser curto-circuito (com ou sem impedância) ou abertura de circuito. Os tipos de curto-circuito assimétricos existentes são: monofásico terra, bifásico e bifásico terra.

Quando temos qualquer um dos defeitos citados acima, temos um desbalanço nas correntes e nas tensões do sistema. Nestes casos, o uso das componentes simétricas é muito importante, pois permite a análise das correntes e das tensões em qualquer parte do sistema após a ocorrência de curto-circuito.

Para cada caso de estudo do curto-circuito, iremos desenhar as redes de sequência e conectá-las de acordo com o tipo de curto. É importante ressaltar que as correntes de sequência só causam quedas de tensão nas próprias sequências. Não existem fontes de tensão nas redes de sequência negativa e zero. A fonte de tensão em todos os curto-circuitos será representada apenas na rede de sequência positiva. Cada rede de sequência pode ser resolvida separadamente para cada fase.

Para cada caso continuaremos a utilizar o sistema da figura 8 na análise dos curto-circuitos.

2.4.3.1 – Curto-circuito monofásico terra

Em um curto-circuito monofásico terra temos um contato de uma das fases do sistema trifásico para a terra. Este contato pode ser ou não através de impedância. A figura 11 representa este curto-circuito.

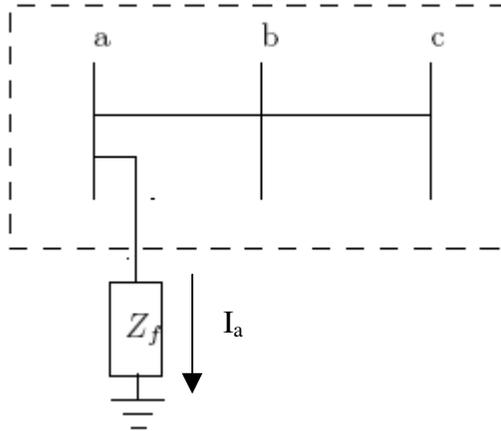


Figura 11 – Circuito equivalente para um curto-circuito monofásico

Como podemos observar, pela figura 11,

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.4.3.1.1) \quad e$$

$$V_a = Z_f I_a \quad (2.4.3.1.2)$$

Passando-se as correntes de fase, para as componentes simétricas, temos:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} I_a \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4.3.1.3)$$

Que nos mostra que: $I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_a$ (2.4.3.1.4)

A figura 12 representa as redes de seqüência interligadas do sistema representado na figura 11, para um curto-circuito monofásico.

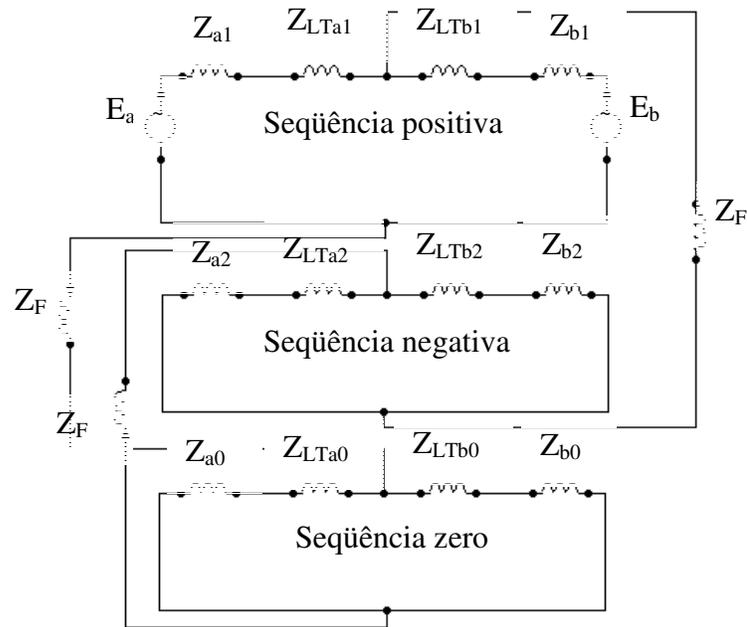


Figura 12 – Diagrama de seqüências para um curto-circuito monofásico

Os índices 0, 1 e 2 nas impedâncias representam as mesmas nas seqüências zero, positiva e negativa. Podemos observar na figura 12 que as redes de seqüência ficam em série, fazendo com que tenhamos a mesma corrente nas componentes simétricas, conforme equação 2.4.3.1.4. Fazendo-se o equivalente de Thévenin no ponto de curto-circuito, para cada rede de seqüência, temos:

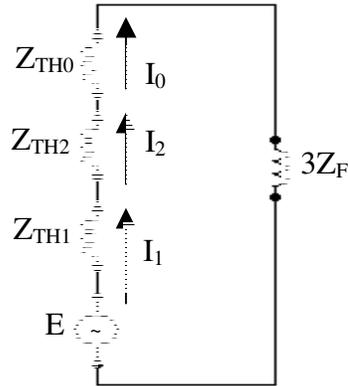


Figura 13 – Circuito equivalente do diagrama de seqüências para um curto-circuito monofásico

Onde:

$$Z_{TH1} = (Z_{a1} + Z_{LTa1}) // (Z_{b1} + Z_{LTb1}); \quad (2.4.3.1.5)$$

$$Z_{TH2} = (Z_{a2} + Z_{LTa2}) // (Z_{b2} + Z_{LTb2}) \quad (2.4.3.1.6)$$

$$Z_{TH0} = (Z_{a0} + Z_{LTa0}) // (Z_{b0} + Z_{LTb0}); \quad (2.4.3.1.7)$$

Pelo circuito equivalente de Thévenin, representada na figura 13, temos que:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E}{Z_{TH1} + Z_{TH2} + Z_{TH0} + 3Z_F}, \quad (2.4.3.1.8)$$

e pela equação 2.4.3.1.4,

$$I_a = 3I_0 = 3I_1 = 3I_2 \quad (2.4.3.1.9)$$

2.4.3.2 – Curto-circuito bifásico

Este tipo de curto-circuito ocorre quando duas fases de um sistema estão em contato. Este contato pode ser ou não através de impedância. A figura 14 representa este curto-circuito.

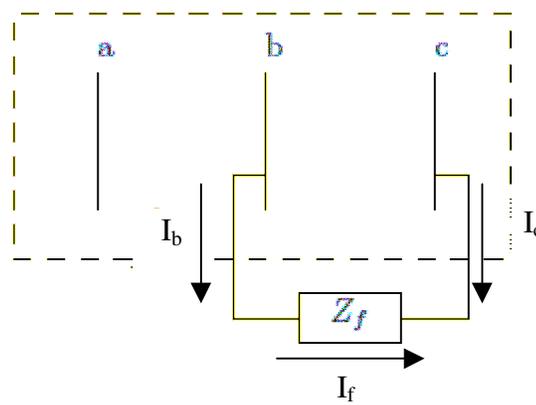


Figura 14 – Circuito equivalente para um curto-circuito bifásico

Como podemos observar, pela figura 14,

$$I_a = 0 \text{ e } I_b = -I_c. \quad (2.4.3.2.1)$$

Se

$$Z_f = 0 \rightarrow V_b = V_c, \quad (2.4.3.2.2)$$

Caso

$$Z_f \neq 0 \rightarrow V_b - V_c = Z_f \times I_f \quad (2.4.3.2.3)$$

Passando as correntes de fase, para as componentes simétricas, teremos:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(a-a^2)}{3} I_b \\ -\frac{(a-a^2)}{3} I_b \end{bmatrix} \quad (2.4.3.2.4)$$

A figura 15 representa as redes de seqüência interligadas do sistema representado na figura 8, para um curto-circuito bifásico.

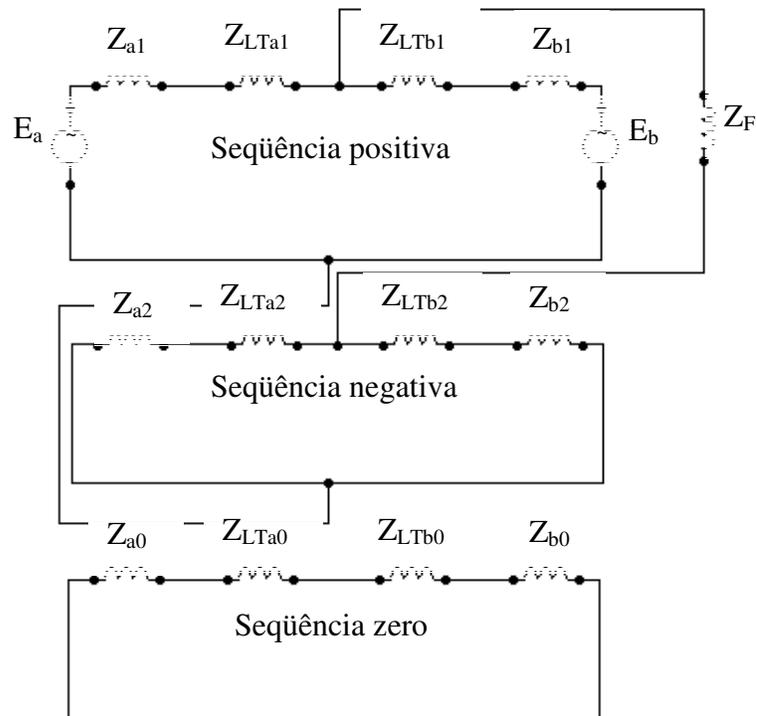


Figura 15 – Diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico

Os índices 0, 1 e 2 nas impedâncias, representam as mesmas nas seqüências zero, positiva e negativa. Podemos observar na figura 15 que as redes de seqüência positiva e negativa ficam em paralelo. Como o curto-circuito não envolve a terra, o circuito de seqüência zero não entra nos cálculos da corrente de curto-circuito. Portanto, a corrente de curto-circuito circula apenas entre os circuitos de seqüência positiva e negativa. Determinando o equivalente visto do ponto de curto-circuito, para cada rede de seqüência, temos:

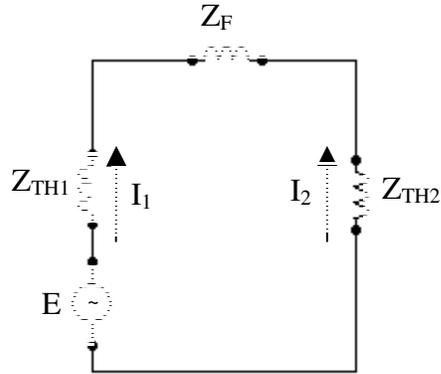


Figura 16 – Circuito equivalente do diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico

Onde:

$$Z_{TH1} = (Z_{a1} + Z_{LTa1}) // (Z_{b1} + Z_{LTb1}); \quad (2.4.3.2.5)$$

$$Z_{TH2} = (Z_{a2} + Z_{LTa2}) // (Z_{b2} + Z_{LTb2}); \quad (2.4.3.2.6)$$

Pelo circuito equivalente de Thévenin, representada na figura 16, temos que:

$$I_1 = -I_2 = \frac{E}{Z_{TH1} + Z_{TH2} + Z_F} \text{ e } I_0 = 0 \quad (2.4.3.2.7)$$

2.4.3.3 – Curto-circuito bifásico terra

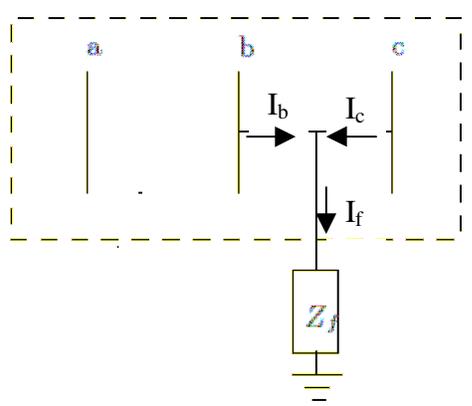


Figura 17 - Circuito equivalente para um curto-circuito bifásico terra

O curto-circuito bifásico terra é uma evolução do curto-circuito bifásico. No curto-circuito em questão, além das duas fases se encontrarem, as mesmas vão a terra. Isto tudo através de impedância ou não. A figura 17 representa este curto-circuito.

Como podemos observar pela figura 17,

$$I_a = 0 \text{ e } I_{curto} = I_b + I_c \quad (2.4.3.3.1)$$

Se

$$Z_f = 0 \rightarrow V_b = V_c = 0, \quad (2.4.3.2.2)$$

$$\text{Caso } Z_f \neq 0 \rightarrow V_b = V_c = Z_f \times (I_b + I_c) \quad (2.4.3.2.3)$$

A figura 18 representa as redes de seqüência interligadas do sistema representado na figura 8, para um curto-circuito bifásico terra.

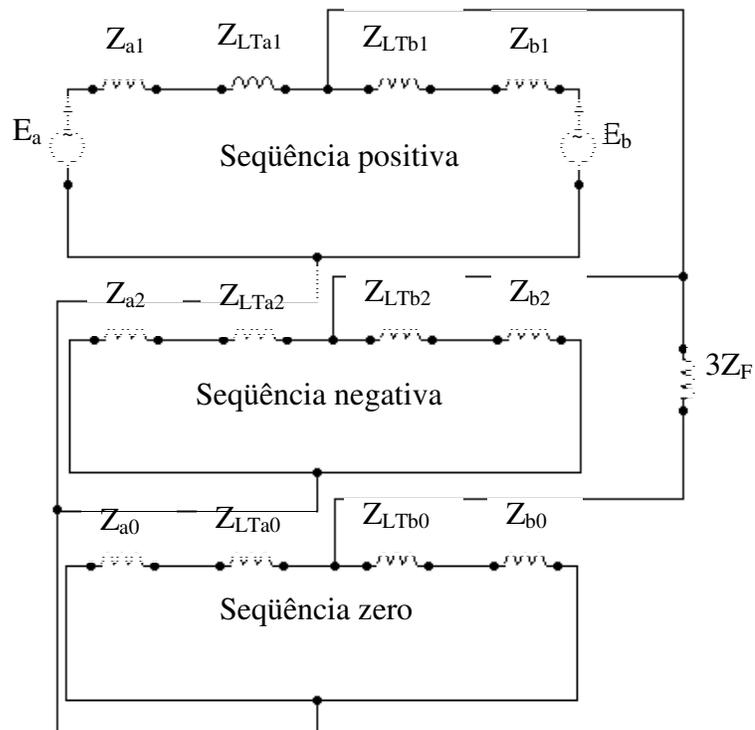


Figura 18 – Diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico terra

Os índices 0, 1 e 2 nas impedâncias representam as mesmas nas seqüências zero, positiva e negativa. Podemos observar na figura 18 que todas as redes de seqüência ficam em paralelo. Como neste caso a corrente de curto-circuito circula para a terra, o circuito de seqüência zero entra nos cálculos da corrente de curto-circuito. Fazendo o equivalente no ponto de curto-circuito, para cada rede de seqüência, temos:

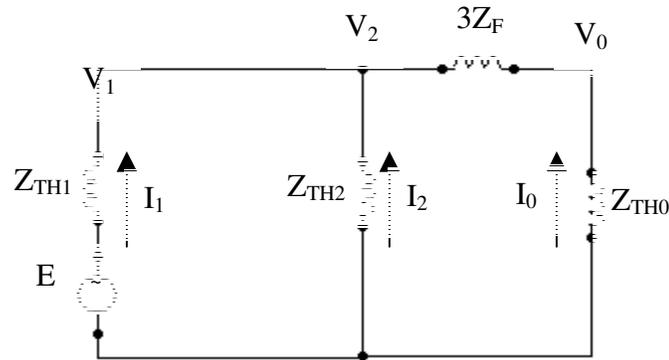


Figura 19 - Circuito equivalente do diagrama de seqüências para um curto-circuito bifásico terra

Onde:

$$Z_{TH1} = (Z_{a1} + Z_{LTa1}) // (Z_{b1} + Z_{LTb1}); \quad (2.4.3.2.4)$$

$$Z_{TH2} = (Z_{a2} + Z_{LTa2}) // (Z_{b2} + Z_{LTb2}); \quad (2.4.3.2.5)$$

$$Z_{TH0} = (Z_{a0} + Z_{LTa0}) // (Z_{b0} + Z_{LTb0}); \quad (2.4.3.2.6)$$

Pelo circuito equivalente de Thévenin representado na figura 19, temos que:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{TH1} + [Z_{TH2} // 3Z_F + Z_{TH0}]} \quad (2.4.3.2.7)$$

$$I_2 = -I_1 \frac{3Z_F + Z_{TH0}}{Z_F + 3Z_F + Z_{TH0}} \quad (2.4.3.2.8)$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_{TH2}}{Z_{TH2} + 3Z_F + Z_{TH0}} \quad (2.4.3.2.9)$$

2.4.4 – Aplicação da matriz Z_{barra} para o curto-circuito

Para um sistema de grande porte é necessária a utilização da matriz Z_{barra} para o cálculo dos diversos tipos de curto-circuito. Conforme vimos no capítulo 2.3, a matriz Z_{barra} pode ser obtidas através da inversão da matriz Y_{barra} . Conforme visto no capítulo 2.3.2, a matriz Z_{barra} é do formato abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \mathbf{M} \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \Lambda & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \Lambda & Z_{2n} \\ \mathbf{K} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \Lambda & Z_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \mathbf{M} \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.4.4.1)$$

Para o cálculo da corrente em um curto-circuito trifásico, em alguma das barras do sistema elétrico genérico, representado pela matriz 2.4.4.1, temos:

$$I_k(F) = \frac{V_k^{pf}}{Z_{kk} + Z_f}, \quad (2.4.4.2)$$

onde:

$I_k(F)$ – é a corrente de defeito na barra k do sistema elétrico,

V_k^{pf} – é a tensão pré defeito na barra k em estudo,

Z_{kk} – é o elemento da diagonal da matriz impedância de barra, da barra k,

Z_f – é a impedância de defeito na barra k.

Para o cálculo da tensão, no mesmo curto-circuito temos:

$$V_k(F) = V_k^{pf} - Z_{kk} I_k(F) \quad (2.4.4.3)$$

CAPÍTULO 3 – ESTUDOS DE PROTEÇÃO

Um sistema de energia elétrica é planejado para operar de maneira segura. Entretanto, diversas causas (naturais ou não) podem acarretar na ocorrência de curtos-circuitos. As descargas atmosféricas são o melhor exemplo de uma causa natural. As falhas de operação decorrentes da queda de condutores, deterioração dos isolamentos ou de manobras erradas dos operadores são outras causas que possibilitam a ocorrência de curto-circuitos. Elas podem ser causadas também por erro de coordenação ou parametrização dos relés de proteção.

Os curtos-circuitos também podem ocasionar danos severos às instalações e equipamentos ou até mesmo colocar a população local em perigo. Portanto, um sistema de proteção corretamente ajustado é parte integral e indispensável do projeto de sistema de energia.

Ao ser feito o planejamento de um empreendimento, deve ser dimensionado seu sistema de proteção, utilizando uma quantidade de disjuntores tal que cada elemento de um circuito (linha, transformador, reator, barra, etc...) possa ser completamente isolado por seus disjuntores na ocorrência de um curto-circuito, protegendo assim o sistema e facilitando a sua remoção sem maiores transtornos aos outros dispositivos.

Um sistema de proteção é composto pelo transformador de corrente (TC), transformador de potencial (TP), relé de proteção e disjuntor.

O transformador de corrente (TC) é um equipamento que deve transformar a corrente elevada do primário em correntes adequadas no secundário para alimentar instrumentos de medição, controle e proteção. Normalmente esta corrente no secundário, é de 5 A. O TC tem a função também de isolar os equipamentos de medição, controle e relés do circuito de alta tensão.

Já o transformador de potencial (TP) é um equipamento que deve transformar a alta tensão do barramento no qual está conectado em tensões adequadas para alimentar instrumentos de medição, controle e proteção. Esta tensão, normalmente é de 115 V.

Os relés são os equipamentos mais importantes de um sistema de proteção, pois são eles que comandam o sistema de proteção. A função de um relé é de identificar o defeito, localizá-los de maneira exata e provocar o desligamento total do elemento defeituoso, a fim de evitar sua destruição e impedir que o resto do sistema também seja afetado. A atuação destes relés faz com que os disjuntores desliguem, interrompendo as correntes de curto circuito do elemento protegido.

Os relés atuam como sensores que vigiam continuamente o sistema elétrico. Havendo alguma anomalia como um curto-circuito, a corrente de curto-circuito sensibiliza o relé que opera enviando um sinal de abertura para o disjuntor. Suas características e tipos serão discutidos mais à frente.

Por fim, o disjuntor pode ser definido como um dispositivo mecânico de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes nas condições normais de circuito, assim como estabelecer, conduzir durante um tempo definido e interromper correntes sob condições anormais especificados do circuito, tais como as de curto-circuito.

3.1 - Aspectos Principais Quanto aos Relés de Proteção

Qualquer equipamento de proteção (relés) deve ser suficientemente sensível para que possa ser quando necessário, operado com confiança. Deve ser capaz de selecionar entre condições para as quais uma imediata operação é exigida e aquelas para as quais nenhuma operação ou operação com retardo é exigida.

Os princípios de funcionamento dos relés evoluem, mas a filosofia de proteção é sempre a mesma. Os relés devem atuar segundo os seguintes critérios:

- Sensibilidade - o equipamento deve operar com segurança, mesmo no caso de defeitos pequenos que provocam correntes reduzidas de desequilíbrio ou de defeito.

- Seletividade - a proteção deve desligar somente os disjuntores necessários para isolar completamente o equipamento defeituoso.
- Rapidez de operação - a velocidade de atuação minimiza o vulto dos defeitos e diminui os riscos de instabilidade.
- Confiabilidade - a configuração do sistema, a qualidade do equipamento utilizado e sua manutenção devem infundir a certeza que a proteção funciona adequadamente em caso de defeito. Zonas de proteção sobrepostas de retaguarda são requisitos indispensáveis num esquema de proteção confiável.

Os relés devem funcionar também segundo outros critérios como robustez, vida útil, estabilidade, operacionalidade e funcionalidade.

3.1.1 – Zonas de Proteção

A proteção contra os curtos é realizada pelos relés da proteção primária, pelos relés da proteção de retaguarda e pelos relés de proteção auxiliar.

Os relés da proteção primária devem promover uma rápida retirada de serviço do elemento defeituoso, os de retaguarda funcionam somente em caso de falha dos relés da proteção primária e os de proteção auxiliar são constituídos por funções auxiliares das proteções principais e de retaguarda e cujos objetivos são sinalização, alarme, temporização, intertravamento, entre outros.

Na figura 20 pode-se observar os diversos níveis da proteção de um sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição). As zonas de proteção (retângulos tracejados) que se interceptam funcionam como proteção principal ou de retaguarda, a depender da localização do defeito.

É interessante notar, neste esquema de proteção, que caso ocorra um defeito dentro de uma determinada zona, os relés que constituem a proteção principal devem desligar todos os disjuntores dentro de sua zona de atuação. Para um defeito localizado dentro da superposição de

zonas, todos os disjuntores das duas zonas devem ser desligados. O inconveniente deste esquema, é que caso ocorra um defeito dentro da superposição de zonas, alguns disjuntores irão atuar desnecessariamente. Caso ocorra uma falta antes do disjuntor do gerador (dentro da zona de Proteção das barras e da saída do gerador) no sistema da figura 20, o sistema de proteção principal irá comandar a abertura deste disjuntor e dos outros dois disjuntores ligados à barra o que, na prática, não seria necessário. O inconveniente deste sistema de proteção seria a retirada de um elemento não defeituoso do sistema. Contudo, as chances de isso acontecerem são pequenas, pois a zona de superposição entre as zonas de atuação são muito pequenas e estão perto dos disjuntores.

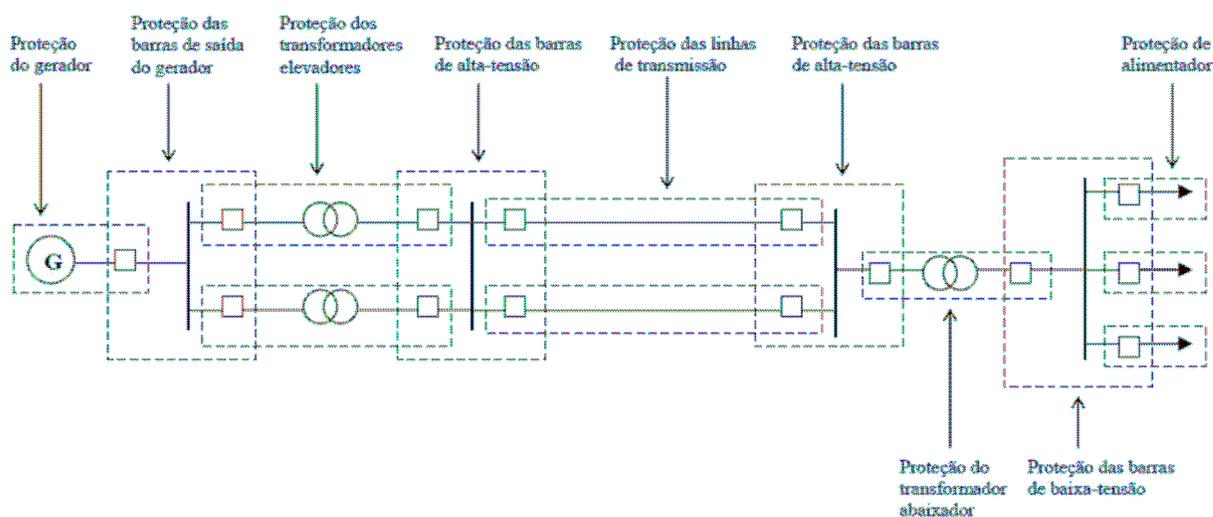


Figura 20 – Proteção de um sistema de elétrico em alta-tensão

Os dispositivos de proteção mais usados em sistema elétricos são:

- Relé de Sobrecorrente – função ANSI 50/51;
- Relé de Sobrecorrente Direcional – função ANSI 67;
- Relé Direcional de Potência – função ANSI 32;
- Relé de Distância – função ANSI 21;
- Relé Diferencial – função ANSI 87.

3.2 – Relé de Sobrecorrente

Conforme o próprio nome sugere, os relés de sobrecorrente têm como grandeza de atuação a corrente elétrica do sistema. Eles atuam para uma corrente maior que a de ajuste.

Os relés de sobrecorrente são os mais simples e baratos, em compensação são os mais difíceis de ajustar para obter seletividade. Eles são usados para proteção contra faltas entre fases e fases a terra.

São classificados quanto ao aspecto construtivo, sendo divididos em:

- Eletromecânicos – toda a atuação do relé é baseada em movimentos mecânicos. Foram os primeiros a serem utilizados, mas estão sendo progressivamente substituídos pelos relés digitais.
- Estáticos – são construídos com dispositivos eletrônicos, próprios e específicos aos objetivos de proteção. Nestes relés não há dispositivo mecânico. Também estão sendo substituídos pelos relés digitais.
- Digitais – são os relés eletrônicos gerenciados por microprocessadores específicos, controlados por um software, onde os dados, registros e calibrações são feitos por esse software. São os relés atualmente mais comercializados no mundo tanto para novos empreendimentos, quanto para substituição dos relés eletromecânicos e estáticos antigos.

São classificados quanto à atuação no circuito a proteger em:

- Atuação direta – quando o próprio relé atua diretamente no dispositivo de destrava do disjuntor.
- Atuação indireta – quando o relé não atua diretamente no dispositivo de destrava do disjuntor. Este disjuntor fecha um contato que transfere para outro circuito a responsabilidade de abertura do disjuntor.

São classificados quanto à instalação:

- Relés primários – são todos os relés conectados diretamente a rede. A corrente de carga ou de curto-circuito passa diretamente pelo relé o que dificulta a manutenção, inspeção e manipulação, além de ser perigoso para a segurança humana.
- Relés secundários – são todos os relés conectados a rede através de TC ou TP. Neste caso, o relé opera com mais segurança humana. É o caso mais comum de utilização em subestações.

São classificados também como tempo de atuação em:

- Instantâneo – os relés atuam de forma imediata para qualquer corrente maior que seu ajuste.
- Temporizado de tempo definido - nos relés de tempo definido, a temporização ou retardo de atuação não depende da intensidade da corrente.
- Temporizado de tempo inverso - Nos relés de tempo inverso, a temporização ou retardo de atuação varia inversamente com a corrente, isto é, quanto maior a corrente de atuação, menor o tempo de retardo.

Nos relés de sobrecorrente, para parametrização dos mesmos, são usados alguns termos como:

- Pick-up – é a menor de todas as correntes que deixam o relé no limiar de operação. Para todas as correntes menores que o $I_{pick-up}$, o relé seguramente não atua.

$I < I_{pick-up}$ – o relé não opera.

$I \geq I_{pick-up}$ – o relé pode operar.

- Drop-out – é a maior corrente que inicia o processo de desativação do relé.

$I > I_{drop-out}$ – o relé continua operado.

$I \leq I_{drop-out}$ – o relé pode desoperar.

A corrente a ser parametrizada no relé para garantir uma correta operação do mesmo é:

$$1,5 \times I_{\text{nominal de carga}} \leq I_{\text{ajuste do relé}} \leq \frac{I_{\text{curto-circuito mínimo no final do circuito protegido}}}{1,5} \quad (3.2.1)$$

Deve-se sempre escolher a corrente de ajuste do relé o mais próximo possível do limite inferior, melhorando a sensibilidade do relé.

O fator 1,5 que multiplica a corrente nominal de carga serve para que o relé não opere em variações de até 50 % na carga do sistema. Esta folga é também uma margem para possibilitar as transferências de carga devida a manobras na configuração da rede do sistema elétrico e permitir uma expansão futura do sistema.

Com relação à corrente de curto-circuito mínimo no final do circuito protegido, se considera sempre o caso de um curto-circuito bifásico que, normalmente, é o curto-circuito mais brando envolvendo duas fases. Além de a análise ser feita na situação menos severa de curto-circuito, ainda assim se divide por 1,5 a corrente de curto, para que se possa garantir a correta operação do relé. A corrente de ajuste ($I_{\text{ajuste do relé}}$) também é conhecida como tap do relé.

$$I_{\text{ajuste do relé}} = \text{Tap do relé} \quad (3.2.2)$$

Para se indicar quantas vezes a corrente de curto-circuito é maior que o limiar de operação de um relé, foi convencionado a utilização de um termo chamado múltiplo do relé. Ou seja, o múltiplo do relé indica quantas vezes a corrente de curto-circuito é maior que seu tap. O cálculo do múltiplo do relé é dado por:

$$M = \frac{I_{\text{secundário do TC}}}{\text{Tap}} = \frac{I_{\text{primário do TC}}}{\text{RTC} \times \text{Tap}} \quad (3.2.3)$$

Onde RTC é a relação de transformação do TC.

3.2.1 – Relé de Sobrecorrente Instantâneo

É o mais simples dos relés de sobrecorrente. A atuação deste relé ocorre quando temos uma corrente passando pelo condutor maior que a parametrizada no relé. Deste modo, temos a

atuação do relé. Embora este relé seja instantâneo, o seu tempo de atuação depende da movimentação dos mecanismos de atuação.

A corrente de ajuste a ser parametrizada no relé obedece a inequação 3.2.1. Podemos dizer que a corrente de ajuste deste relé é a corrente de pick-up.

Pela norma ANSI, é conhecido pelo número 50.

3.2.2 – Relé de Sobrecorrente Temporizado

É o relé que tem a atuação parametrizada para ocorrer após certo tempo, sendo esta a diferença básica para o relé de sobrecorrente instantâneo.

Pela norma ANSI, é conhecido pelo número 51.

Os relés de sobrecorrente temporizado podem ser:

- Tempo definido;
- Tempo inverso.

3.2.2.1 – Tempo Definido

Nos relés de tempo definido, a temporização ou retardo de atuação não depende da intensidade da corrente. O relé dá a partida quando a corrente ultrapassa o múltiplo da corrente nominal ajustado e desliga no tempo previamente ajustado.

Apresenta a desvantagem de a operação ocorrer após um tempo definido o que, dependendo da intensidade do curto-circuito, pode ser extremamente danoso para o sistema.

3.2.2.2 – Tempo Inverso

Nos relés de tempo inverso, a temporização ou retardo de atuação varia inversamente com a corrente, isto é, quanto maior a corrente de atuação menor o tempo de atuação do relé.

Para parametrização do relé, se escolhe a curva de atuação e não o tempo de atuação, como nos relés de tempo definido. Esta curva é escolhida de acordo com a filosofia de proteção existente no sistema. A figura 21 apresenta um gráfico mostrando como ocorre a atuação da proteção, para um relé de sobrecorrente de tempo inverso.

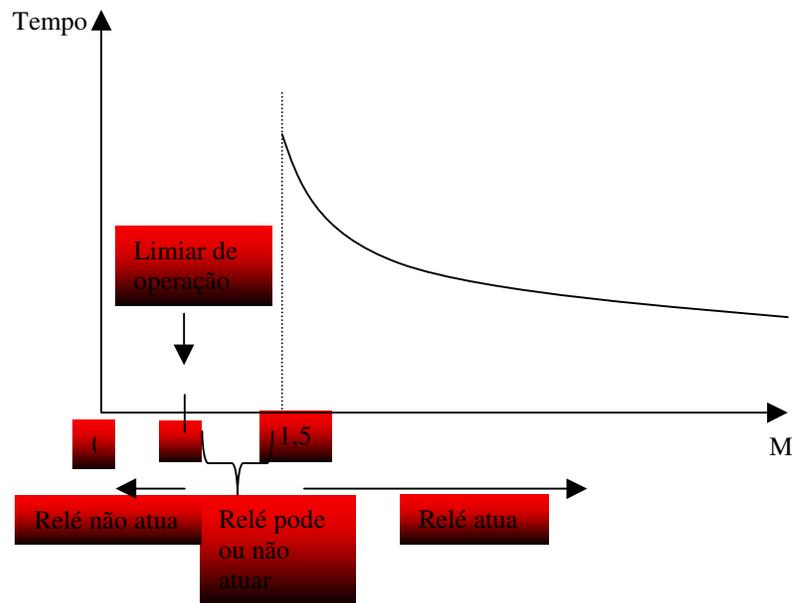


Figura 21 – Atuação de proteção para um relé de sobrecorrente de tempo inverso

O múltiplo do relé 1 ($M=1$) corresponde a uma corrente de operação igual ao seu tap. Entre os múltiplos 1 e 1,5, o relé pode atuar ou não. Para evitar este intervalo, a inequação 3.2.1 é utilizada na definição da corrente de ajuste do relé.

O relé de sobrecorrente de tempo inverso pode ter diversas inclinações nas suas curvas. A figura 22 representa as inclinações mais conhecidas para este relé.

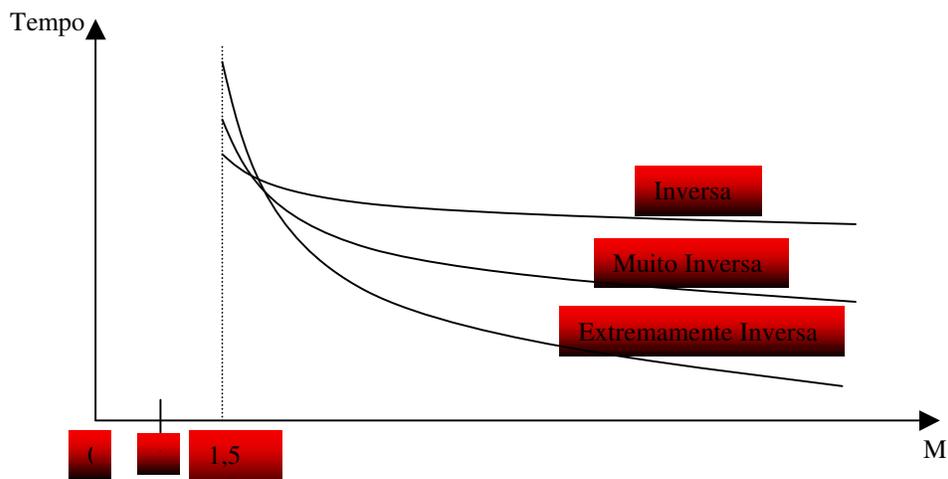


Figura 22 – Diferentes inclinações das curvas Tempo x M

Em um sistema de proteção, o ideal seria que todos os relés de sobrecorrente tivessem a mesma curva inversa. Contudo em um sistema elétrico real, isto não é possível, devido à existência de diferentes relés (eletromecânicos, estáticos e digitais) de diferentes fabricantes e diferentes comprimentos de linhas de transmissão.

Normalmente em linhas de transmissão curta (de até 40 km), onde o nível de curto-circuito é quase o mesmo em qualquer parte da linha, são utilizados relés de tempo definido, a fim de se obter boa margem de coordenação com os relés. Já nas linhas de transmissão de comprimento médio (de até 90 km), é usado relé de sobrecorrente com característica muito inversa. Nas linhas de transmissão longas (acima de 90 km), são usados relés com características inversas.

A corrente de ajuste a ser parametrizada no relé também obedece a inequação 3.2.1.

3.2.3 – Relé de Sobrecorrente Temporizado com Elemento Instantâneo

Neste relé existe tanto a função de sobrecorrente temporizado como a função de sobrecorrente instantânea. Pela norma ANSI é conhecido como o número 50/51.

Neste relé o ajuste da unidade instantânea é feito em relação ao tap escolhido do relé correspondente a sua unidade temporizada. A figura 23 apresenta o desempenho do relé 50/51 em função das curvas de tempo x M.

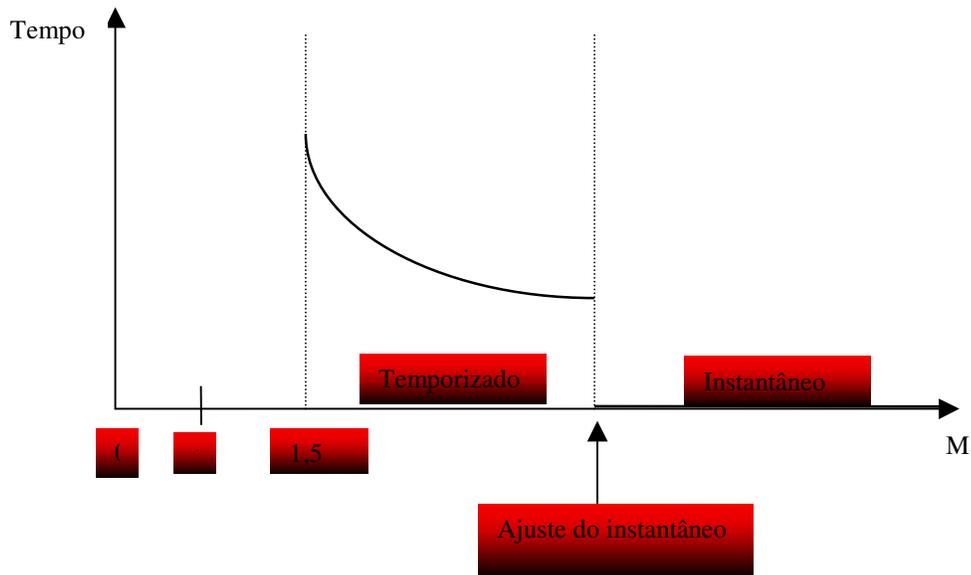


Figura 23 – Gráfico Tempo x Corrente do relé de sobrecorrente 50/51

A atuação da unidade temporizada, ou unidade instantânea, depende da corrente de curto-circuito.

Para atuação apenas da unidade temporizada 51, a corrente de curto-circuito terá que ser maior que o ajuste do relé, mas terá que ser menor que o ajuste para atuação do instantâneo. Portanto a inequação 3.2.3.1 terá que ser respeitada.

$$1,5 \times I_{\text{ajuste do relé}} \leq I_{\text{curto-circuito}} \leq I_{\text{ajuste do ins tan tâneo}} \quad (3.2.3.1)$$

Para a atuação da unidade instantânea 50, a corrente de curto-circuito terá que ser maior que a corrente de ajuste no instantâneo. Portanto a inequação 3.2.3.2, terá que ser obedecida.

$$I_{\text{curto-circuito}} > I_{\text{ajuste do ins tan tâneo}} \quad (3.2.3.2)$$

Este relé 50/51 normalmente é ajustado para operar de forma que, até um trecho referente a 85 % da LT atuará apenas a unidade instantânea. Dessa forma, para o ajuste do instantâneo, é calculada a corrente de curto-circuito no ponto de 85 %. A unidade temporizada irá atuar apenas faltas no restante da linha. Assim, se evita a atuação de dois relés ao mesmo tempo, além de garantir que o defeito mais perto da barra (que é o mais perigoso), seja logo eliminado, atendendo, portanto, a filosofia de proteção.

A figura 24 mostra as zonas de atuação do relé 50/51 para uma linha de transmissão.

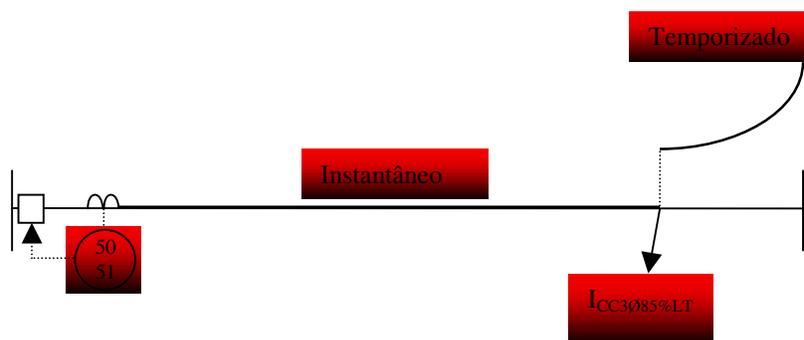


Figura 24 – Esquema e atuação do relé de sobrecorrente 50/51

3.2.4 – Relé de Sobrecorrente de Neutro

Neste relé, todas as ocorrências de curto-circuito para terra são percebidas por este relé. O esquema de proteção que envolve este relé é mostrado na figura 25.

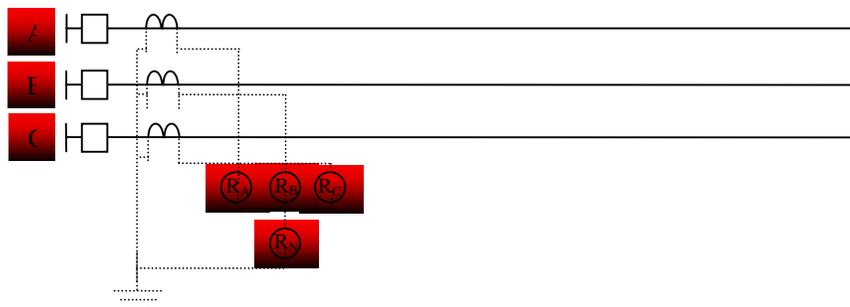


Figura 25 - Esquema de ligação para o relé de sobrecorrente de neutro

Onde,

R_A, R_B, R_C são os relés de fase e R_N é o relé de neutro.

Na figura 25 podemos observar que nos secundários dos três TC's estão conectados os relés de fase (um relé para cada fase). Os três TC's com seu respectivo relé de fase, estão ligados em paralelo. No circuito de neutro comum está ligado o relé de neutro.

Aplicando-se a primeira de Lei de Kirchhoff ao nó do relé R_N , temos:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (3.2.4.1)$$

Como visto na seção 2.1, fazendo a transformação para componentes simétricas,

$$I_N = 3I_0. \quad (3.2.4.2)$$

Podemos observar na figura 3.2.4.1 que os três TC's em paralelo formam um filtro onde só passam as componentes de seqüência zero. Temos então que no relé de neutro só circula a corrente de seqüência zero do sistema já referida ao circuito secundário dos TC's, fazendo com que toda a corrente do sistema elétrico que escoar pela terra, tenha o seu reflexo no relé de neutro.

Somente existe corrente de seqüência zero nas seguintes condições:

- Curto-circuito monofásico à terra;
- Curto-circuito bifásico à terra;
- Cargas desequilibradas aterradas;
- Abertura de fase de sistemas aterrados.

A corrente a ser ajustada no relé de neutro deve obedecer as inequações 3.2.4.3 e 3.2.4.4.

$$I_{\text{ajuste do relé de neutro}} \leq \frac{I_{cc \ 1\phi-T \text{ mínimo no final do trecho protegido}}}{1,5} \quad (3.2.4.3)$$

$$0,1I_{\text{no min al}} \leq I_{\text{ajuste do relé de neutro}} \leq 0,45I_{\text{nomial}} \quad (3.2.4.4)$$

Na inequação 3.2.4.3 a corrente de curto-circuito monofásica para terra mínima no final do trecho protegido é calculada para um carregamento leve no sistema de potência. Já na inequação 3.2.4.4, a corrente nominal considerada é referente ao circuito a ser protegido. Normalmente, só é considerada a inequação 3.2.4.4 para a parametrização de um relé de neutro, pois as correntes nominais quase sempre são menores que as correntes de curto-circuito.

Caso o circuito a ser protegido seja uma linha de transmissão que interliga uma usina geradora ao sistema, faz-se um ajuste no relé com um valor perto dos 10 % da corrente nominal, pois perto das usinas, as correntes têm que ser equilibradas para não danificar o gerador. Qualquer desequilíbrio neste trecho faz o relé de neutro atuar.

Já caso o circuito a ser protegido seja uma linha de distribuição, onde as cargas são extremamente desequilibradas, se faz um ajuste no relé de neutro para até 45 % do valor da corrente nominal, para que o mesmo não atue em pequenos desbalanços.

Para as linhas de transmissão o ajuste do relé de neutro depende da localização da mesma. Caso a linha de transmissão esteja mais perto de uma subestação de distribuição, o relé de neutro será parametrizado perto dos 45 % da corrente nominal. Caso a mesma esteja mais perto de uma fonte de geração, a parametrização será em torno dos 10 % do valor nominal.

3.2.5 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente

Em um sistema elétrico, além da parametrização dos relés, é necessária a coordenação dos mesmos, para que haja uma seqüência na operação destes equipamentos em caso de alguma ocorrência. A coordenação da proteção é então uma estratégia de proteção onde para qualquer corrente de curto-circuito há uma escada de tempo no sentido de qual proteção deve atuar.

Vale lembrar que em um sistema de proteção o objetivo é sempre a eliminação do defeito no menor tempo possível, independentemente de qual proteção atue. Por conta disso, conforme já indicado na introdução na seção 3.1, todo o sistema de proteção engloba as proteções principal e de retaguarda.

Na coordenação da proteção, é necessário que se tenha o menor tempo possível para que os relés mais próximos da cadeia de proteção atuem a fim de garantir a coordenação. Garantia de coordenação significa que a proteção mais próxima do defeito elimine o curto-circuito, com garantia de que o relé localizado na outra barra não ative seu circuito de abertura.

Para que haja coordenação entre dois relés é necessário que a inequação 3.2.5.1 seja satisfeita.

$$t_{relé\ a\ montante} - t_{relé\ a\ jusante} \geq \Delta t \quad (3.2.5.1)$$

Onde:

$t_{relé\ a\ jusante}$ – é o tempo de atuação do relé localizado na subestação mais próxima ao defeito,

$t_{relé\ a\ montante}$ – é o tempo de atuação do relé localizado na subestação mais longe do defeito, para a mesma corrente de curto-circuito,

Δt – tempo de coordenação.

A figura 26, mostra este tempo de coordenação.

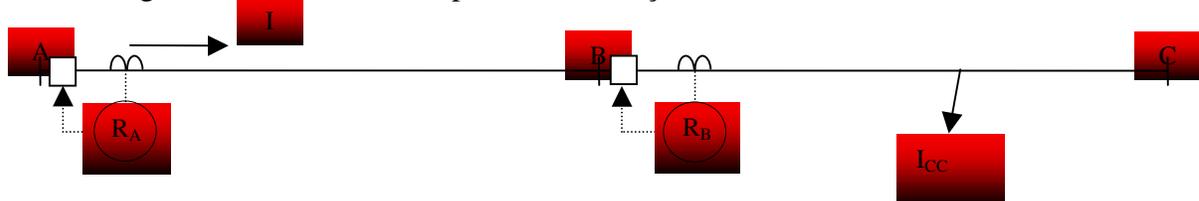


Figura 26 - Esquema de ligação para os relés a jusante e a montante

Pela figura 26, para uma ocorrência após a subestação B, a proteção a atuar terá que ser primeiramente a proteção da subestação a jusante, neste caso a subestação B. Caso esta proteção não atue, será necessária a atuação da proteção da subestação a montante, neste caso a subestação A.

Contudo, o tempo de coordenação Δt é composto por outros tempos, sendo eles:

- Tempo de operação de abertura do disjuntor a jusante – é a soma dos tempos de operação da bobina de disparo do disjuntor, do tempo de destrava da trava da liberação da mola de abertura ou da válvula do ar comprimido e do tempo de ação da mola de abertura ou

pistão a ar comprimido que imprime o movimento que processa a abertura mecânica dos contatos elétricos do disjuntor até o seu final. Este tempo varia entre 2 e 6 ciclos.

- Tempo de extinção do arco elétrico do disjuntor a jusante – é a soma dos tempos de extinção do arco elétrico durante o processo de abertura do disjuntor e do arco elétrico existente mesmo com o disjuntor totalmente aberto. Alguns artifícios são usados para auxiliar esta extinção do arco elétrico. São elas: sopro de SF₆ e sopro eletromagnético. O tempo de extinção total do arco elétrico chega a até 5 ciclos.
- Tempo de sobrepercurso do relé a montante – é o tempo existente apenas para os relés eletromecânicos, correspondente ao tempo que a alavanca de tempo gasta até parar o seu movimento devido à sua inércia. Este tempo depende de cada relé e os valores são medidos pelo fabricante.
- Tempo de segurança – é um tempo extra para compensar as imprecisões dos tempos anteriores.

Normalmente são adotados em projetos de coordenação de sistemas elétricos, os seguintes tempos de coordenação Δt :

- 0,4 a 0,5 s → relés eletromecânicos
- 0,15 a 0,25s → relés estáticos e digitais.

3.2.5.1 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente de Tempo Definido com Elemento Instantâneo

Considere a figura 27 representativa de um sistema radial com três subestações (A, B e C) e duas linhas de transmissão interligando respectivamente as subestações A e B e B e C. Dispomos de um relé de sobrecorrente temporizado com elemento instantâneo (50/51) na subestação A e outro igual na subestação B, instalados da seguinte forma.

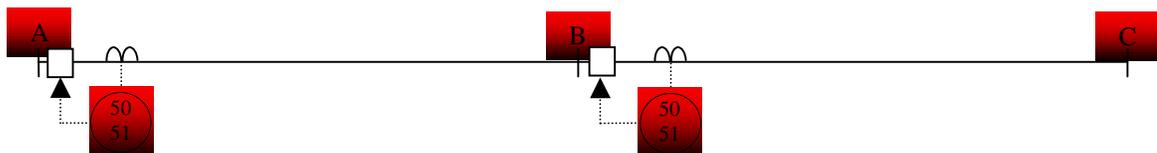


Figura 27 – Sistema a ser utilizado como exemplo da coordenação dos relés de sobrecorrente temporizado de tempo definido com elemento instantâneo

Nesta coordenação, é feito primeiro o ajuste para a unidade instantânea (50). Conforme especificado no item 3.2.3, os relés das subestações A e B são ajustados para que a unidade instantânea atue para um trecho até 85 % das linhas de transmissão AB e BC respectivamente.

Para a coordenação da unidade temporizada (51), a coordenação é feita escolhendo um tempo de atuação t_B para os relés a montante, neste caso o relé localizado na subestação B. Para ajuste do tempo t_A dos relés a jusante (da subestação A), é acrescido um tempo Δt a t_B , tal que $t_A = t_B + \Delta t$. Este tempo Δt foi definido na seção 3.2.5. A coordenação da proteção fica então da seguinte forma.

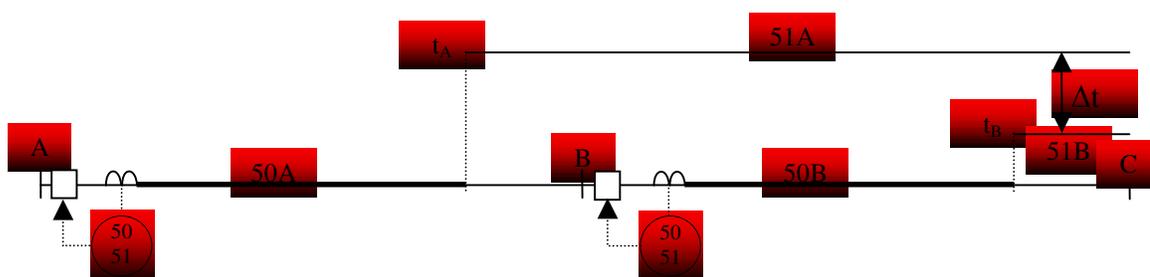


Figura 28 – Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo definido com elemento instantâneo

Caso tenhamos uma falta próxima a subestação B na linha BC, atuará a unidade instantânea do relé instalado nessa subestação. Caso esta proteção falhe, atuará a unidade temporizada 51 do relé de sobrecorrente instalado na subestação A.

Caso o defeito ocorra fora dos 85 % da linha BC, atuará a unidade temporizada 51 do relé instalado na subestação B. Caso esta proteção falhe, atuará em um tempo Δt depois, a unidade temporizada da subestação A.

Portanto nesta coordenação de proteção, temos uma proteção principal e uma proteção de retaguarda, garantindo a eficácia da coordenação.

3.2.5.2 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente de Tempo Inverso com Elemento Instantâneo

Na coordenação usando os relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo, não se escolhe o tempo, mas sim a curva de tempo. Será usado o sistema da figura 27 para montar a coordenação dos relés de sobrecorrente.

Primeiramente, é ajustada a coordenação das unidades instantâneas dos relés das subestações A e B, conforme indicado na seção 3.2.5.1.

Para a coordenação da unidade temporizada (51), é escolhida a menor curva de tempo (por exemplo 1/2) para o relé mais afastado. São calculados os múltiplos de corrente dos relés A e B, usando a corrente de curto-circuito instantânea para 85 % da linha de transmissão BC, conforme respectivamente equações 3.2.5.2.1 e 3.2.5.2.2.

$$M_B = \frac{I_{CC3\phi85\%LTBC}}{RTC_B \times TAP_B} \quad (3.2.5.2.1)$$

$$M_A = \frac{I_{CC3\phi85\%LTBC}}{RTC_A \times TAP_A} \quad (3.2.5.2.2)$$

Nas equações acima, RTC_A e RTC_B são relações de transformação respectivamente dos TC's A e B e TAP_A e TAP_B são respectivamente os taps ajustados dos relés A e B.

Tendo calculado o múltiplo de corrente M_B na equação 3.2.5.2.1 e escolhido a menor curva de atuação (curva 1/2), o tempo de atuação para o relé B é obtido por análise gráfica.

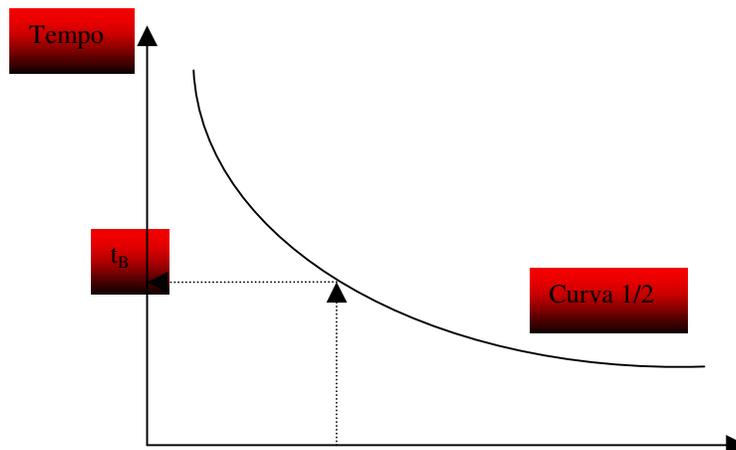




Figura 29 – Tempo de atuação do relé B

Pelo gráfico, observamos que o tempo de atuação do relé B, na Curva 1/2 é t_B . Para que seja escolhido o tempo de atuação do relé A, é feito da mesma forma que na coordenação para tempo definido. Adiciona-se um tempo de atuação Δt a t_B , tal que:

$$t_A = t_B + \Delta t \quad (3.2.5.2.3)$$

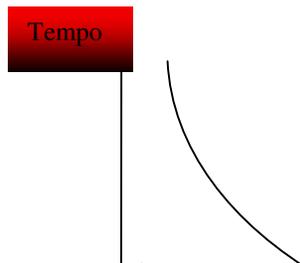
Com o valor de múltiplo de corrente M_A calculado na equação 3.2.5.2.2 e o valor do tempo de atuação t_A calculado na equação 3.2.5.2.3, é escolhida a curva do relé A. Contudo, é necessário que seja feita a certificação se a curva escolhida para o relé A é suficiente para coordenar todo o trecho da linha de transmissão BC junto com o relé B. Para isto, é calculado pela fórmula abaixo, o múltiplo de corrente M'_A , para uma corrente de curto-circuito no TC da subestação B.

$$M'_A = \frac{I_{CC3\phi B}}{RTC_A \times TAP_A} \quad (3.2.5.2.4)$$

Com este novo valor de M'_A e a curva do relé A, especificada acima, obtêm-se o tempo de atuação t'_A do relé A do mesmo jeito como representado na figura 29. Comparando este tempo de atuação t'_A do relé A com o tempo de atuação do relé B no ponto de curto-circuito sobre o TC da subestação B, temos:

$$t'_A - zero \geq \Delta t, \quad (3.2.5.2.5)$$

pois um curto-circuito no sistema, próximo aos TC's da subestação B faz com que atue a unidade de proteção instantânea do relé B. Caso a relação 3.2.5.2.5 seja verdadeira, a curva escolhida para o relé A, coordena a proteção da linha BC com o relé B. Caso esta relação não seja verdadeira, devemos fazer com que t''_A seja igual a Δt e usando o múltiplo de corrente M'_A , obtenhamos no gráfico a nova curva para o relé A.



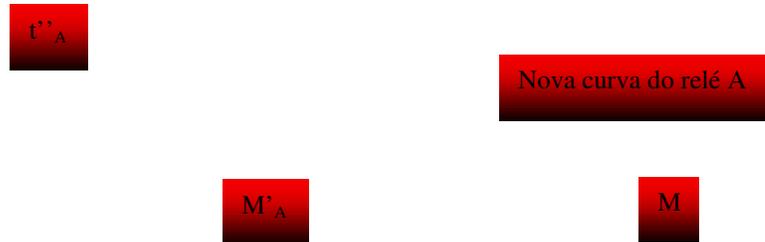


Figura 30 – Nova curva para o relé A

Temos então a coordenação de um sistema composto por três subestações e duas linhas de transmissão através de dois relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo. A figura 31 representa esta coordenação.

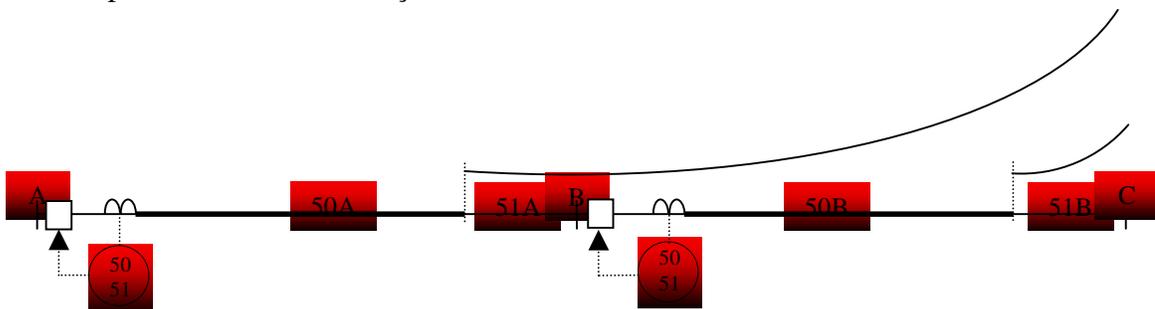


Figura 31 – Coordenação de relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo

3.3 – Relé de Sobrecorrente Direcional

O relé direcional atua com o relé sobrecorrente, para que o mesmo opere apenas no sentido de fluxo de carga. Eles só contribuem para o disparo do disjuntor para um determinado sentido da corrente de defeito. Em geral o sentido de disparo adotado é o da corrente instantânea fluindo da barra para a linha quando a tensão instantânea da barra em relação à terra for positiva.

No item 3.2, foram estudados alguns tipos de relés de sobrecorrentes, contudo todos eles permitem apenas que seja coordenada a proteção de um sistema radial. Para que seja feita a coordenação de um sistema em anel, é necessário que o relé direcional atue em conjunto com o

relé de sobrecorrente. O relé direcional faz com que um sistema em anel se comporte como dois sistemas radiais em sentidos opostos.

Pela norma ANSI é conhecido pelo número 67. Para que este relé atue, é necessário que ele tenha duas grandezas parametrizadas, sendo elas:

- Uma grandeza de polarização que normalmente é a tensão, podendo ser a corrente também.
- Uma grandeza de operação, sendo a corrente normalmente usada.

Este relé atua comparando a corrente de operação com a tensão ou corrente de polarização. Quando temos uma diferença nos sentidos destas grandezas, o relé de sobrecorrente direcional atua, abrindo o disjuntor. A figura 32 mostra como este relé está ligado à barra.

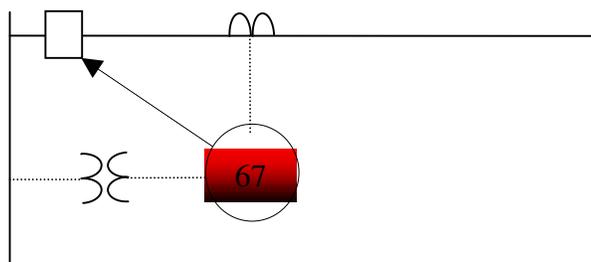


Figura 32 – Ligação de um relé sobrecorrente direcional à barra

Este relé é ligado no sistema através de um TC ligado à linha de transmissão e através de um TP ligado à barra. Pelo TC, via secundário do mesmo, a corrente de operação entra no relé diferencial. Pelo TP, via secundário do mesmo, entra a tensão da barra no relé diferencial. Este relé então fica comparando estas informações e aciona a trava do disjuntor.

3.3.1 – Proteção com Relé de Sobrecorrente Direcional

Como já falado no item anterior, o elemento direcional tem sensibilidade apenas na direção do fluxo de carga passante. A função de proteção do circuito em si, fica sob

responsabilidade do relé de sobrecorrente instantâneo ou temporizado. A coordenação da proteção, então é feita em conjunto pelo relé direcional e pelo relé de sobrecorrente.

Para que esta coordenação seja feita, existem algumas alternativas, sendo que, na maioria delas, há uma interligação entre os circuitos de atuação de ambos os relés, fazendo com que o relé direcional supervise a atuação do relé de sobrecorrente.

3.3.2 – Coordenação de Sistema em Anel com Relés de Sobrecorrentes Direcionais

A coordenação de um sistema elétrico em anel com relés de sobrecorrente direcional é feita da mesma forma que nos itens 3.2.5.1 e 3.2.5.2, sendo que agora, interpretaremos este sistema em anel como apresentando alimentação nos dois extremos, ou seja, se comportando como sistemas radiais em ambas as direções. Os cálculos de tempo de atuação e das curvas inversas são feitas do mesmo modo.

A figura 33 representa a coordenação da proteção com relés direcionais e relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo do sistema da figura 33.

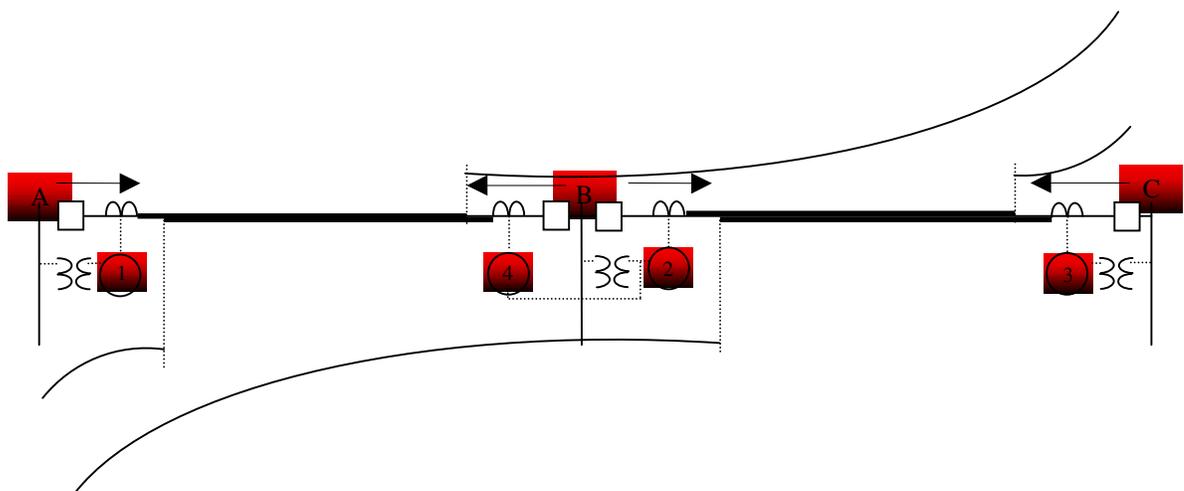


Figura 33 – Coordenação de um sistema em anel

Os relés 1 e 2 atuam para defeitos à direita das barras A e B. Os relés 3 e 4 atuam para faltas à esquerda de C e B.

3.4 – Relé Direcional de Potência

O relé direcional de potência se diferencia do relé direcional de sobrecorrente pelo fato de poder atuar diretamente na proteção, emitindo ordem para abrir o disjuntor. Conforme visto na seção anterior, o relé direcional de sobrecorrente atua monitorando outros relés responsáveis pela proteção. Pela norma ANSI, este relé é conhecido pelo número 32.

Este relé é muito usado em geradores síncronos independentes que operam em sincronismo e em paralelo com o sistema. A parametrização é feita para um corrente de 5% da corrente nominal do gerador, com direção contrária ao fluxo de corrente gerada.

3.5 – Relé de Distância

A proteção de distância é utilizada graças a sua ótima seletividade e grande velocidade de atuação. São sensíveis à relação entre tensão e corrente, isto é, à impedância vista. Como a impedância não deixa de ser uma medida da distância ao longo de uma linha de transmissão, estes relés são de extrema importância num sistema de potência. Ele opera medindo, portanto, o parâmetro impedância da linha de transmissão até o ponto de curto-circuito ou da carga.

O relé de distância recebeu este nome devido a sua filosofia de funcionamento se basear na impedância, admitância ou reatância vista pelo relé. Como esses parâmetros são proporcionais a distância, daí a origem do nome do relé. Na verdade o relé enxerga a impedância da linha e não a distância propriamente dita.

Pela norma ANSI, este relé é conhecido pelo número 21. São divididos em:

- Relé de Impedância;
- Relé de Admitância ou Mho;

- Relé de Reatância.

3.5.1 – Relé de Impedância

No relé de impedância, a proteção atua quando a impedância da linha de transmissão fica menor que a parametrizada no relé. Esta parametrização é feita utilizando os parâmetros R e X da linha de transmissão. A impedância é representada por um número complexo, dado por:

$$Z = R + jX \quad (3.5.1.1)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.5.1.2)$$

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad (3.5.1.3)$$

Observando-se a expressão 3.5.1.3, vemos que a mesma representa a equação de uma circunferência com centro na origem e raio igual a Z. A figura 34 representa esta circunferência.

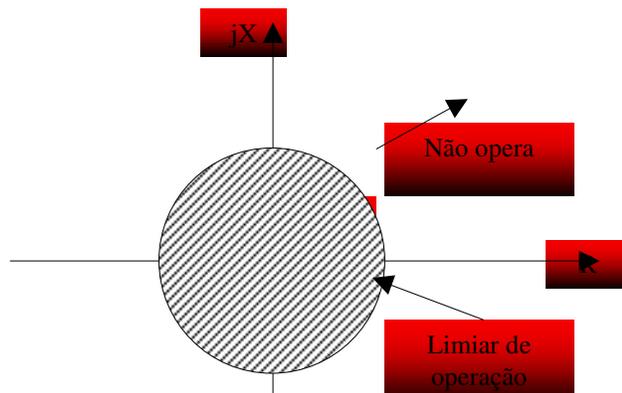


Figura 34 – Característica do Limiar de operação do relé de impedância

Pela figura acima, observamos que o relé atua para todas as impedâncias na região hachurada. Sobre a circunferência, está o limiar de operação. Neste ponto sobre a circunferência está a impedância de ajuste do relé, podendo o mesmo operar ou não. Fora da circunferência, não há atuação do relé de distância.

3.5.1.1 – Direcionalidade do Relé de Impedância

Conforme podemos observar na figura 34, o relé de impedância não é direcional, podendo atuar para frente ou para trás em um sistema elétrico. Por isso, para sua correta utilização, é necessário que o mesmo seja acoplado a um relé direcional (já estudado na seção 3.3).

A figura 35 mostra o efeito do acoplamento do relé direcional com o relé de impedância.

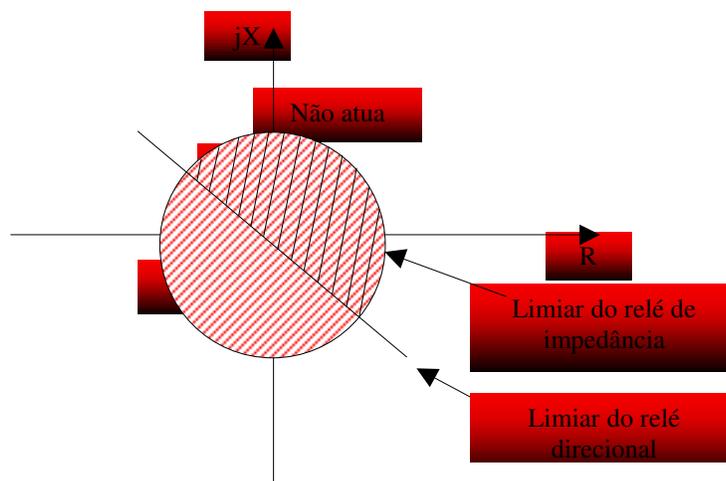


Figura 35 – Característica do acoplamento do relé de impedância e do relé direcional

Pela figura 35, podemos ver que com o acoplamento entre o relé de impedância e o relé direcional, temos direcionalidade na proteção, fazendo com que somente os defeitos a jusante do relé e dentro de sua zona de atuação serão eliminados.

3.5.1.2 – Zonas de atuação do Relé de Impedância

Assim como os relés de sobrecorrente, os relés de impedância também possuem zonas de atuação. Na primeira zona de atuação, que normalmente corresponde a 80% da linha de transmissão, a atuação do relé é instantânea. Já na segunda zona de atuação, o relé atua para 100 % da linha de transmissão em questão, mais 50% da linha de transmissão seguinte mais curta. Contudo a atuação desta segunda zona já é temporizada em um tempo t_1 . A terceira zona atua para 100 % da linha de transmissão em questão, mais 100 % da linha de transmissão seguinte mais longa. Esta zona de atuação também é temporizada em $t_2=t_1+\Delta t$. Desta forma a proteção de segunda zona dá cobertura integral à proteção da linha de transmissão e a proteção da terceira zona confere proteção integral de retaguarda a todas as linhas vizinhas. O relé de impedância pode ter ainda a quarta zona, que muitas vezes é desligada. Esta zona funciona mais como uma proteção de retaguarda. A figura 36 mostra as zonas de atuação do relé de impedância.

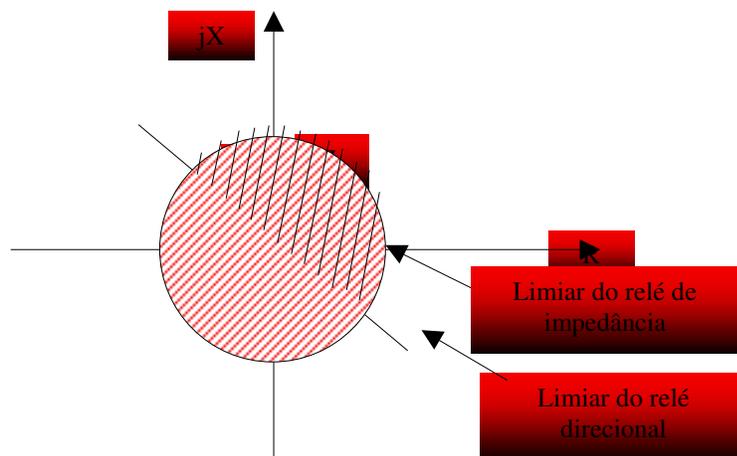


Figura 36 – Zonas de atuação do relé de impedância acoplado com o relé direcional

A coordenação de um sistema em anel com relés de impedância é parecida com a coordenação com relés de sobrecorrente. A figura 37 representa esta coordenação para o sistema representado na figura 36.

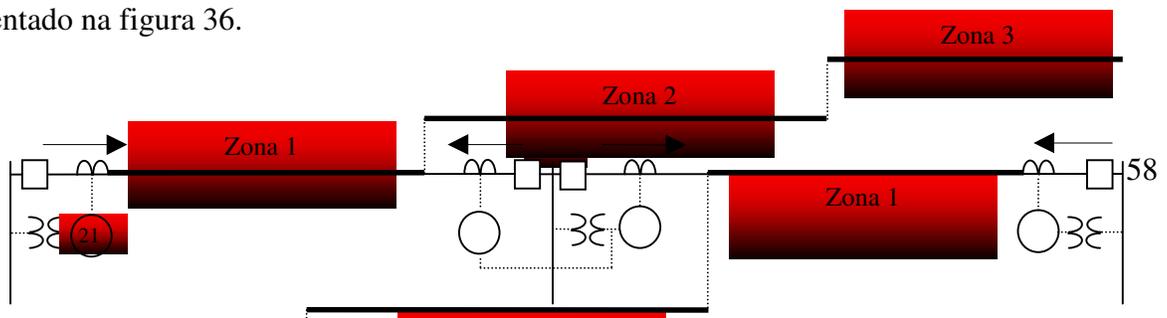


Figura 37 – Coordenação do sistema elétrico em anel com relés de distância

Podemos observar que as zonas de atuação respeitam as informações contidas na introdução desta seção.

3.5.2 – Relé de Admitância

O relé de admitância também conhecido como relé Mho, segue a mesma filosofia do relé de impedância. Este relé do tipo eletromecânico tem um cilindro de indução onde atuam as grandezas de corrente e tensão. A equação que define o conjugado do motor é:

$$T_{motor} = K_d EI \cos(r - \theta) - K_v E^2 \quad (3.5.2.1)$$

Fazendo $T_{motor} = 0$ e depois de algumas operações matemáticas, chegamos à seguinte fórmula que rege a operação deste relé.

$$Y \cos(r - \theta) = \frac{K_v}{K_d} \quad (3.5.2.2)$$

Onde

$$Y = \frac{I}{E} \quad (3.5.2.3)$$

Substituindo-se Y da equação 3.5.2.2 na equação 3.5.2.1 e lembrando que a admitância Y é o inverso da impedância Z .

$$\frac{1}{Z} \cos(r - \theta) = \frac{K_v}{K_d} \quad (3.5.2.4)$$

Fazendo operações matemáticas, temos:

$$Z = \frac{K_d}{K_v} \cos(r - \theta) \quad (3.5.2.5)$$

A circunferência da figura 38 representa o lugar geométrico da equação 3.5.2.5. Diferentemente do relé de impedância, a circunferência passa pela origem, o que permite que este relé já tenha a característica de direcionalidade. Isto facilita, pois permite que não seja necessária a associação de um relé direcional para que seja feita a coordenação dos relés.

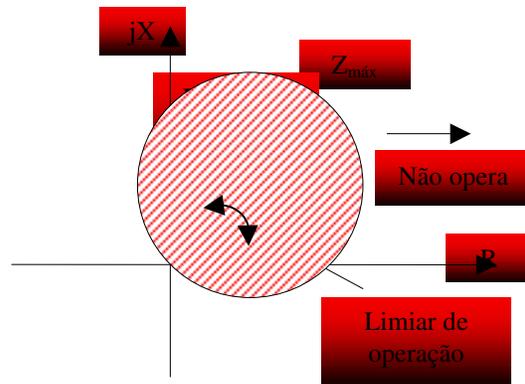


Figura 38 – Diagrama jX x R do relé de admitância

3.5.2.1 – Zonas de atuação do Relé de Admitância

As zonas de atuação do relé de admitância é a mesma que nos relés de impedância, tanto com relação à distância que cada zona protege na linha de transmissão, quanto aos tempos de atuação. A figura 39 mostra as zonas de atuação do relé de impedância.

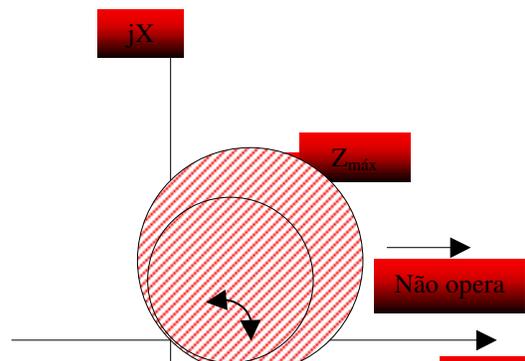


Figura 39 – Zonas de atuação do relé de impedância

Contudo estas regulagens devem ser corrigidas porque a característica da inclinação da circunferência do limiar de operação do relé de admitância, ou seja, o ângulo da inclinação do diâmetro (r) de máximo torque do relé não coincide com o ângulo natural da impedância da linha de transmissão (θ), a qual o relé está protegendo. O real ajuste do relé para proteger uma linha de transmissão deve ser feito como mostrado na figura 40.

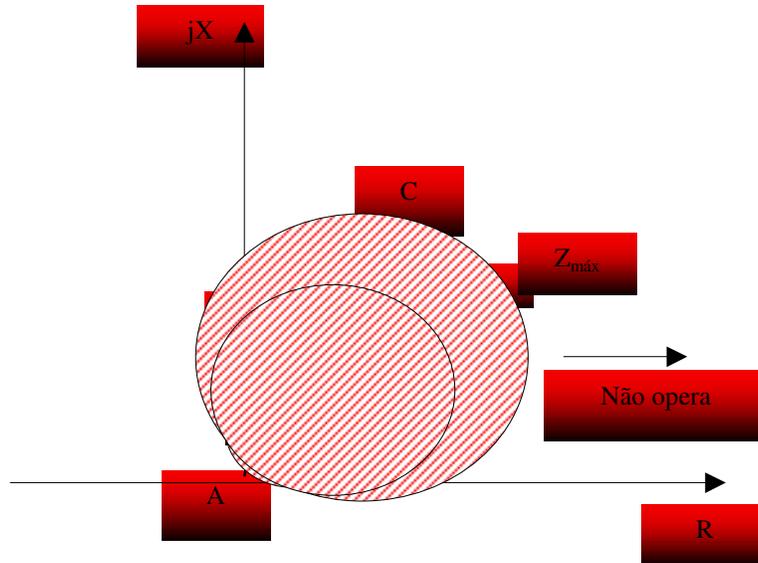


Figura 40 – Regulagem das zonas de atuação com o ângulo natural da linha corrigido

3.5.3 – Relé de Reatância

Este relé tem uma característica de operação somente com sensibilidade na reatância do sistema. Seu conjugado motor é dado pela expressão:

$$T_{motor} = K_I I^2 - K_E E I \text{sen} \theta - K \quad (3.5.3.1)$$

No limiar de operação, se $T_{motor} = 0$, fazendo-se alguma manipulação aritmética, temos:

$$\frac{E}{I} \text{sen} \theta = \frac{K_I}{K_E} - \frac{K}{K_E I^2} \quad (3.5.3.2)$$

No momento do defeito a corrente de curto-circuito é grande, a última parcela da equação

3.5.3.2 fica nula. Temos então:
$$\frac{E}{I} \text{sen} \theta = \frac{K_I}{K_E} \quad (3.5.3.3)$$

$$Z_{sen\theta} = \frac{K_I}{K_E} \quad (3.5.3.4)$$

$$\underline{Z} = Z\angle\theta = Z \cos\theta + jZ_{sen\theta} = R + jX \quad (3.5.3.5)$$

Substituindo-se 3.5.3.4 em 3.5.3.5, vem: $X = \frac{K_I}{K_E}$ (3.5.3.6)

Pela equação 3.5.3.6, temos o seguinte diagrama de atuação do relé de reatância:

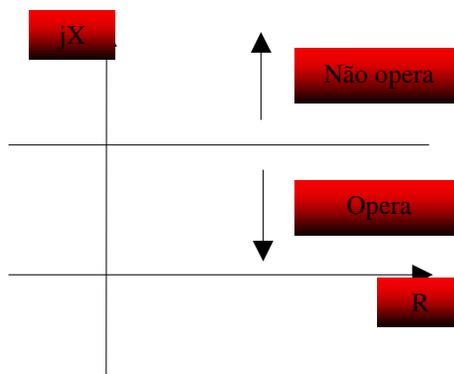


Figura 41 – Zonas de atuação do relé de reatância

Para uma impedância cuja reatância é menor que a reatância ajustada no relé a proteção atua. Para uma reatância maior, não atua.

Os relés de impedância e admitância desligam o disjuntor se a impedância do defeito cair dentro do círculo. Se a impedância do defeito se localiza fora do círculo, os relés não desligam o disjuntor. Para o relé de reatância, ocorre desligamento se a reatância de defeito estiver abaixo da reta paralela ao eixo das resistências. Se a ponta deste vetor estiver acima desta reta não haverá desligamento do disjuntor.

3.6 – Relé Diferencial

O princípio de funcionamento de um relé diferencial se baseia na comparação entre a corrente elétrica que entra e a corrente elétrica que sai em um determinado elemento do sistema. Pela norma ANSI, esta proteção é conhecida pelo número 87.

Esta proteção é empregada na:

- Proteção de transformadores de potência;
- Proteção de máquinas síncronas;
- Proteção de barras;
- Proteção de linhas de transmissão curta.

Para um relé diferencial, temos a seguinte relação:

$$I_{entrada} = I_{saída} + I_{relé} \quad (3.6.1)$$

Quando temos as condições de $I_{entrada} = I_{saída}$ e $I_{entrada} - I_{saída} \leq I_{ajuste\ do\ relé}$, a proteção não atua, pois nestes casos ou a corrente do relé é zero e, portanto não temos um desbalanço na rede ou a diferença das correntes que entram e saem é menor que a ajustada para a atuação do relé.

Caso $I_{entrada} - I_{saída} > I_{ajuste\ do\ relé}$, a proteção atua, pois a diferença das correntes que entram e saem é maior que a ajustada para atuação do relé, fazendo com que o mesmo atue.

O relé diferencial pode ser dividido em:

- Relé Diferencial Comum.
- Relé Diferencial Percentual.

3.6.1 – Relé Diferencial Comum

O esquema da figura 42 representa a proteção utilizando este relé diferencial.

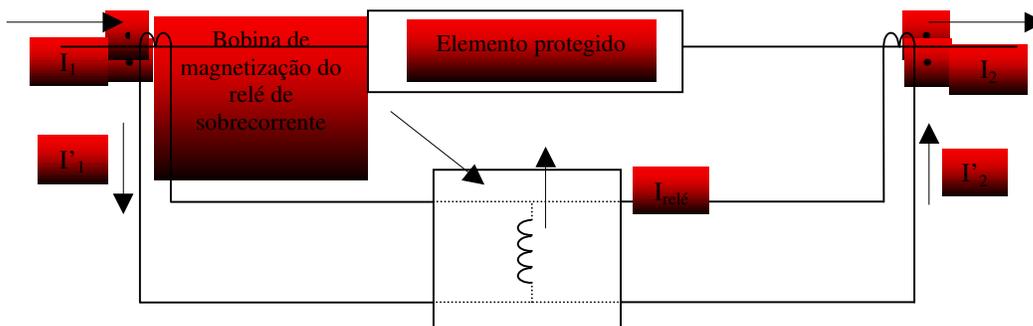


Figura 42 – Proteção utilizando o relé diferencial comum

temporizado.

Haverá atuação da mesma, apenas nos casos em que o curto-circuito ocorrer dentro da região limitada pelos TC's. Este relé não enxerga os curtos-circuitos fora das regiões limitadas pelo TC's, pois esta situação não provoca alteração de I_1 e I_2 .

3.6.2 – Relé Diferencial Percentual

A figura 43 representa a proteção utilizando relé diferencial percentual.

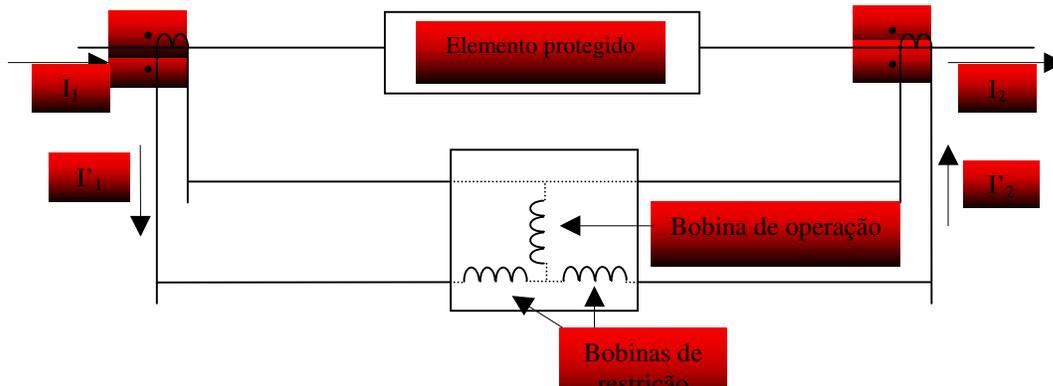


Figura 43 – Proteção utilizando o relé diferencial percentual

Neste relé, o funcionamento se baseia nos conjugados gerados pelas bobinas de restrição e de operação. Na bobina de restrição, o campo magnético gerado atua atraindo um êmbolo produzindo um conjugado negativo, isto é, contrário ao conjugado de operação. Na bobina de operação, o campo magnético atrai um êmbolo que produz o conjugado positivo. A operação do relé acontecerá, se o conjugado positivo (da bobina de operação) for maior que o conjugado negativo (das bobinas de restrição).

Quando temos um defeito fora da região delimitada pelos TC's, as correntes I_1 e I_2 são iguais e provocam um campo magnético igual em cada bobina de restrição. Este campo magnético somado faz com que se tenha um conjugado negativo grande. Já na bobina de operação, fazendo $I_1 - I_2$ teremos uma corrente resultante zero, que produz conjugado zero. Não

temos então neste caso a operação do relé, pois o conjugado positivo não é maior que o conjugado negativo.

Para um defeito, dentro da região delimitada pelos TC's, temos a inversão de I_1 ou I_2 dependendo de onde ocorra o curto-circuito. Supondo-se que as duas correntes tenham o mesmo módulo, teremos um somatório nulo das correntes, o que faz com que se tenha um conjugado zero nas bobinas de restrição. Já na bobina de operação, teremos um valor correspondente a duas vezes o módulo da corrente, fazendo com que o conjugado positivo (na bobina de operação) seja elevado. Neste caso temos a operação do relé, pois o conjugado positivo é maior que o conjugado negativo.

3.7 – Outros Tipos de Relés e Proteções

3.7.1 – Relé de Sobretensão

Estes relés operam quando a tensão elétrica ultrapassa um valor especificado. Pela norma ANSI é classificado pelo número 59. São muito parecidos com os relés de sobrecorrente, tanto no aspecto construtivo quanto no tempo de atuação. No aspecto construtivo podem ser eletromecânicos, estáticos ou digitais. No aspecto do tempo de atuação, podem ser instantâneos ou temporizados (tempo definido ou tempo inverso). Dependendo do porte do sistema elétrico que será protegido, são usados mais de um relé de sobretensão.

3.7.2 – Relé de Subtensão

Este relé tem uma atuação contrária a do relé de sobretensão, operando quando a tensão elétrica diminui de um valor pré-ajustado. Pela norma ANSI é classificado pelo número 27. Construtivamente é idêntico ao relé de sobretensão. Este relé é muito utilizado combinado com outros relés. É utilizado, por exemplo, com o relé de sobrecorrente, de uma forma que o disjuntor só irá disparar quando houver atuação de ambos os relés.

3.7.3 – Relé de Religamento

Relé de religamento é um relé temporizado que efetua o fechamento do disjuntor em um circuito de corrente alternada. É classificado pela norma ANSI pelo número 79. Este relé funciona em série com um contato NF do disjuntor. Quando o referido disjuntor abre, promove a abertura do contato NF em série com o relé e o mesmo fecha o contato NA em série com a bobina de fechamento do disjuntor. O tempo ajustado no relé para que o mesmo provoque o fechamento do disjuntor, é chamado de tempo morto e deve ser o menor possível a fim de eliminar o arco elétrico e deseionizar o ar no caminho do arco. Este tempo fica entre 0,7 e 1,5 segundos.

3.7.4 – Proteção de Falha do Disjuntor

Em um sistema de proteção podem ocorrer casos em que o relé comanda a abertura do disjuntor, mas o mesmo falha e não faz a abertura. Para estes casos, existe a proteção de falha do disjuntor, que é executada pelo relé de sobrecorrente (50) associado com o relé de tempo (62). Esta associação é denominada pela norma ANSI de 50/62BF. Neste sistema de proteção, caso um disjuntor falhe na sua abertura, outros disjuntores irão atuar para que o defeito no determinado ponto seja extinto.

CAPÍTULO 4 – MALA DE TESTE

4.1 – Introdução

Com a evolução dos equipamentos e principalmente dos relés, que passaram dos eletromecânicos para os digitais, as proteções ficaram melhores e mais confiáveis. Os tempos de atuação dos relés ficaram menores ainda como o tempo de guarda e o tempo de abertura e fechamento dos disjuntores, proporcionando uma maior confiabilidade ao sistema elétrico.

Existem no mercado modernas malas de testes para relés, que permitem testar todas as funções (sobrecorrente, direcional, distância...) sob qualquer condição de curto (tipo de curto, intensidade, impedância de curto, harmônicos...).

Estas malas de testes permitem que sejam observados e estudados os comportamentos de determinado relé sob determinadas condições de curto-circuito. Permitem ainda a verificação dos ajustes parametrizados dos relés além da identificação de problemas funcionais nos mesmos.

No mercado existem alguns fabricantes de malas de testes, sendo que alguns são mais conhecidos que outros e produzem equipamentos com mais funções que outros. Alguns dos fabricantes existentes no mercado são Omicron Electronics (fabricante da mala que iremos utilizar), Doble Engineering Company e Conprove Engenharia, Indústria e Comércio.

No nosso caso foi utilizada a Mala de Teste modelo CMC 256-6 do fabricante Omicron Electronics. Os itens a seguir irão demonstrar as características físicas da mala.

4.2 – Características de teste da Mala Omicron CMC 256-6

4.2.1 – Introdução

O equipamento CMC 256-6 é a parte do sistema de testes que possui não somente um dispositivo de teste, mas também um software de teste denominado Omicron test Universe. Este programa é a interface responsável pelas configurações e controles dos equipamentos. Podem ser usados amplificadores de corrente e tensão externos como extensão do equipamento de teste.

As seguintes opções estão disponíveis para o equipamento de teste CMC 256-6:

- EnerLyser: Módulo de software para medida e análise de tensões AC e DC;
- EP (Precisão Estendida): A CMC 256-6 com precisão de potência de saída estendida;
- NET1: A CMC 256-6 com duas interfaces ethernet substituindo a porta paralela.

A figura 44 mostra esta mala de teste.



Figura 44 – Mala de teste CMC 256-6 da Omicron Eletronics

4.2.2 – Operando a CMC 256-6

Os seguintes elementos estão presentes no equipamento e são necessários para a operação da mala de teste CMC 256-6:

- Cabo de alimentação;
- Cabo de conexão CMC 256-6 ↔ computador;
- Cabo de conexão CMC 256-6 ↔ Objeto sob teste;
- Computador com software de teste instalado e porta paralela ou Ethernet.

4.2.3 – Iniciando o sistema de teste

Para fazer a utilização da mala de teste, é necessário conectar a mesma ao computador, através de um conector localizado na parte traseira do equipamento. Já no computador, a conexão é feita através da porta paralela ou ethernet. Após ligar a mala de teste e o computador o programa Omicron Test Universe deverá ser inicializado. Neste momento, um teste de hardware geral é realizado e durante a execução do mesmo, um som de chaveamento de reles será ouvido. Se ocorrer alguma irregularidade durante o curso deste auto-teste, o software mostra uma mensagem de erro.

4.2.4 – Configurações e Funções

O programa de teste rodando no computador apresenta entre outras características:

- Controle dos sinais de teste;
- Processar dados de medida;
- Gerar relatórios;
- Gerar entrada de dados.

Já a mala de teste é responsável por:

- Criar sinais de teste (correntes, tensões, sinais binários);
- Medir a reação (analógica e binária) do objeto sob teste;
- Fornecer corrente DC ao objeto sob teste.

4.2.4.1 – Saídas de Tensão

A mala de teste tem quatro saídas de tensão referenciadas ao neutro N e são galvanicamente separados de todas as outras saídas. Têm dois soquetes pretos, chamados de “N”

galvanicamente conectados um ao outro. Os amplificadores de tensão e corrente são amplificadores lineares com acoplamento CC.

As tensões de saída possuem duas faixas de tensão:

- Faixa 1: 4 x 0 ... 150 V
- Faixa 2: 4 x 0 ... 300 V

4.2.4.2 – Saídas de Corrente

As saídas de corrente são galvanicamente separadas de todas as outras conexões. Os amplificadores de corrente são amplificadores lineares com acoplamento CC. Com esta tecnologia, ocorrências especiais de distorções harmônicas e banda de frequência podem ser testadas em uma composição extremamente compacta. Por meio do acoplamento CC, qualquer transitório com offset CC pode ser reproduzido com precisão.

As saídas de corrente são equipadas com duas faixas de corrente de forma a acrescentar sua faixa dinâmica:

- Faixa 1: 6 x 1,25 A
- Faixa 2: 6 x 12,5 A

4.2.4.3 – Entradas Analógicas e Binárias

Na mala de teste há dez entradas binárias, que são divididas em cinco grupos de duas. Cada grupo é galvanicamente separado um dos outros. As entradas binárias são configuradas no módulo de configuração de hardware, e podem ser especificadas como contatos com potencial (molhado) ou sem potencial (seco). Quando especificadas como contato com tensão, a tensão nominal esperada e o limiar de operação podem ser ajustados para cada entrada binária. Dessa

forma, as entradas binárias de 1 – 10 podem ser usadas com entradas de contador para frequência de entrada até 3 kHz.

As entradas binárias da CMC 256-6 podem ser configuradas através do programa como sendo entradas de medida binária ou analógica. A adaptação das entradas para serem de medidas analógicas podem ser feitos para uso com a opção EnerLyser (visto com na seção 4.3.1).

Os sinais de entrada 1-10 podem ser capturados numa faixa de frequência de 0 Hz (DC) até aproximadamente 10 kHz. Os valores medidos passam por um amplificador de isolamento na unidade de medida e são digitalizados por um conversor A/D. O método consecutivo utiliza um processador com tecnologia DSP (Processador Digital de Sinal com Ponto Flutuante) de alta performance. As potências aparente, reativa e real, podem ser fornecidas em tempo real e enviadas ao computador.

As entradas são praticadas como entradas de tensão, e têm cinco faixas de medida: 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V e 600 V. As entradas estão resguardadas em cada faixa de medida até 600 V rms. Para medir uma corrente, um clamp de corrente é utilizado para valores até 80 A (10m V/A). Em medições com clamp de corrente, o canal de medição é galvanicamente separado dos canais de medida adjacentes. A precisão da medida da corrente é limitada pela exatidão do clamp de corrente.

Em benefício à captura síncrona de 10 canais de medida, a opção EnerLyser oferece combinações matemáticas e avaliações dos canais de medida de forma a executar:

- Avaliação dos componentes CC (Tensão ou Corrente);
- Valores efetivos (RMS), de todos os sinais de medida em tempo real;
- Valores de pico (V_{pico} , I_{pico});
- Ângulos de fase com referência ao sinal de entrada dado;
- Cálculo de potência aparente, reativa e real (em qualquer configuração) em tempo real;
- Frequência e espectro (diagrama de harmônicos) dos sinais periódicos;

- Captura de sinais de entrada transitórios com varias taxas de amostragem;
- Diferentes opções de trigger para captura de sinais transitórios.

Os sinais analógicos CC são implementados para teste de transdutores e consistem de:

- Tensão de referencia de alta precisão;
- Um conversor análogo digital para cada entrada;
- Os respectivos circuitos de entrada.

Os sinais de entrada V_{CC} e I_{CC} são medidos. Para a entrada I_{CC} existem duas faixas disponíveis: $0... \pm 20$ mA e $0... \pm 1$ mA. Para isso, um fusível de entrada reversível é usado para a proteção da entrada I_{CC} . A avaliação e envio dos valores medidos acontecem na unidade de medida, as entradas V_{CC} e I_{CC} são referenciadas ao neutro comum N e a unidade de medida CC é galvanicamente separada de todas as conexões do painel frontal.

4.2.4.4 – Saídas Binárias

São disponíveis quatro saídas binárias para utilização como contatos sem potencial de relé.

4.2.4.5 – Fonte CC para Objeto de Teste

Existe na mala de teste uma saída AUX DC que funciona como uma fonte CC para o objeto sob teste.

Utilizando a opção AUX DC no programa, a tensão pode ser definida para saída do AUX DC na mala de teste e os valores são gravados em memória não volátil da CMC 256.

Alguns segundos após ligar a CMC 256-6, os valores definidos de tensão são disponibilizados na saída AUX DC. Sempre que a fonte AUX DC fornece uma tensão perigosa, maior que 42 V, um led indicador de advertência aparece.

4.2.4.6 – Porta Paralela para Conexão

A mala de teste possui ainda uma porta paralela de impressora que permite a conexão entre o computador e a mala de teste, permitindo uma significativa taxa de transferência. Quando o programa é iniciado, ele faz automaticamente uma busca pela interface (LPTx) no computador.

4.2.4.7 – Saídas de Baixo Nível

Existem seis fontes de sinais analógicos de precisão disponíveis para serem usados. Em acréscimo, uma interface serial digital é disponível para transmitir funções de controle e monitoramento entre a CMC 256-6 e os amplificadores externos. Os sinais de baixo nível têm um nível de saída nominal de 0 a $\pm 10 V_{\text{pico}}$. Todas as saídas de baixo nível são protegidas contra curto-circuito e continuamente monitorados quanto à sobrecarga.

Quando uma saída de baixo nível é sobrecarregada, uma mensagem de advertência aparece na interface de usuário do software.

A geração das formas de onda senoidais com alta precisão de fase e amplitude é necessária para conseguir sinais de saída com precisão especificada. Para cumprir a exigência por fontes de sinal de fases acopladas, a geração de sinal é implementada digitalmente. Por isso, a CMC 256-6 emprega um processador digital de sinal.

Com a geração de sinal digital, o sistema fica muito mais flexível, a correção exata da amplitude, offset e fase, pode ser feita de forma digital com o uso de parâmetros especificados no dispositivo e a correção digital assegura um comportamento melhor, possível a longo prazo, acrescentando à onda senoidal, qualquer outro sinal periódico ou sinal transitório, pode ser gerado.

4.3 – Precisão e Qualidade

A mala de teste CMC 256-6 é um equipamento de teste preciso e com excelente comportamento em relação à temperatura a longo prazo. Em acréscimo à precisão para altas amplitudes, a CMC 256-6 é especialmente conhecida pela precisão na fase. Para ter esta precisão, a filosofia não foi somente resolver a geração de sinal digital, mas também implementar a distribuição dos sinais para os vários módulos, utilizando métodos digitais. Dessa forma, o objetivo da separação galvânica dos grupos de geradores individuais é alcançado sem perda da precisão.

As tensões e correntes dos geradores são continuamente e independentemente ajustáveis em amplitude, fase e frequência. As saídas de corrente e tensão são completamente garantidas contra curto-circuito e sobrecarga, e protegidos contra sinais transitórios de alta tensão e sobretemperatura.

4.4 – Software Omicron Test Universe

O software é projetado para realizar testes em dispositivos de proteção e medida, tanto para companhias elétricas, quanto para companhias fabricante de relés. É um hardware sofisticado e software fácil de usar baseado no ambiente do Windows, o que proporciona flexibilidade e completa adaptabilidade a diferentes aplicações de testes.

No software existem os “Módulos de Teste” que permitem que os relés sejam operados de modo autônomo para testes simples. Para a execução destes testes, existem ferramentas que permitem que sejam feitas várias análises e testes nos relés, de acordo com suas funções.

No software, existem ainda outros pacotes como o “Control Center”, que permite que seja criado ou acessado documentos que mostram como se executam os testes nos relés, “Administração de Teste”, que funciona como um banco de dados dos relés, “Ferramentas de Teste”, que possui aplicações adicionais que permitem que sejam criados harmônicos por exemplo. Por fim, também estão presentes no software outros pacotes de configuração e ou

instalação do sistema como o “Setup”, “Suporte” e “Usuário”. A figura 45 mostra como é esta interface inicial do software, como seus pacotes de utilização.

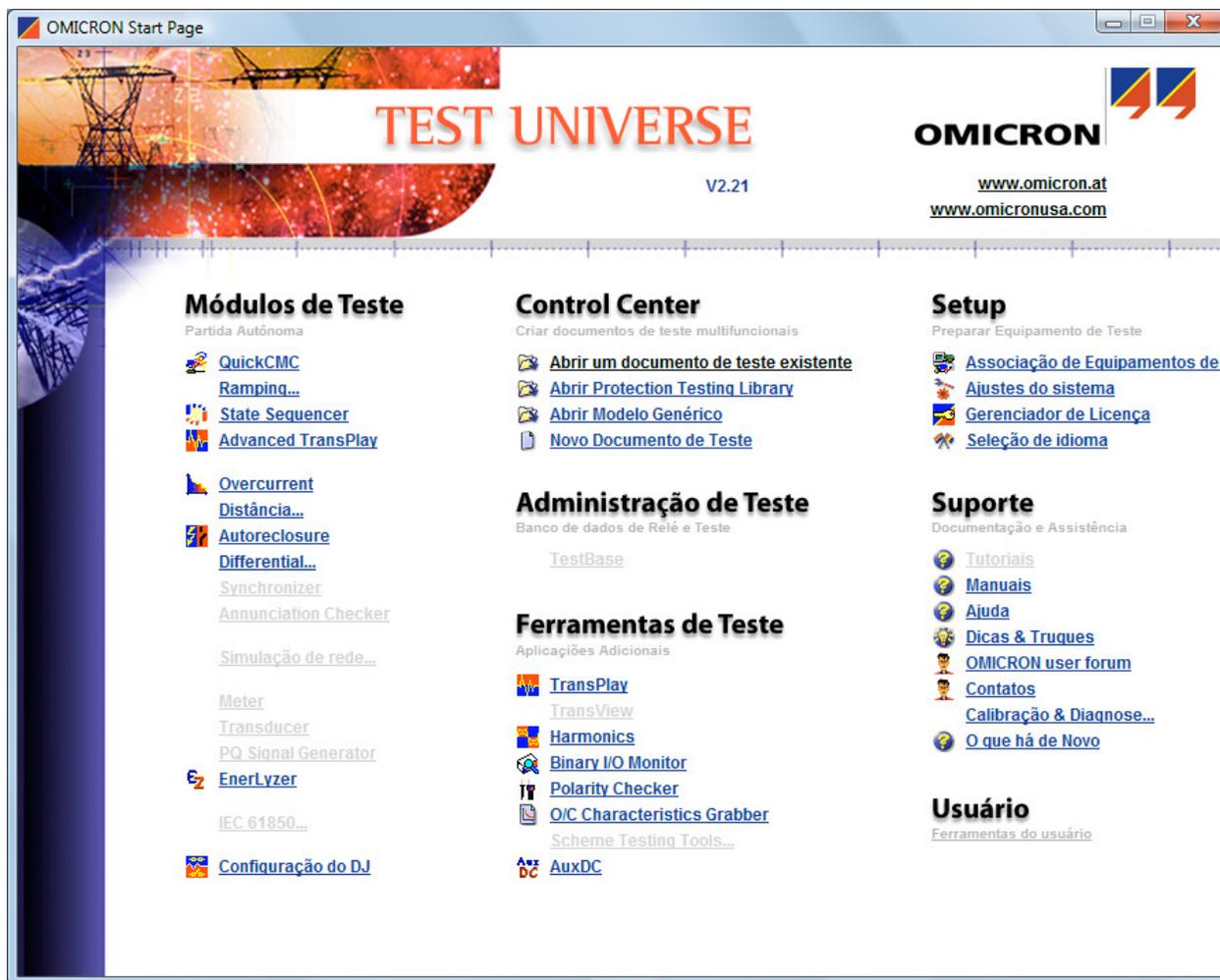


Figura 45 – Interface inicial do software Omicron Test Universe

Vamos estudar agora as características das ferramentas de teste presentes nos “Módulos de Testes”.

4.4.1 – QuickCMC

Esta é uma ferramenta simples de se usar, pois funciona como um painel de controle manual para a mala de teste, mas com uma maior flexibilidade. Todas as opções existentes na mala são acessíveis através desta ferramenta. Os ajustes das tensões e correntes dos geradores de

sinais podem ser feitos através da introdução de valores numéricos nos campos especificados ou através de um clique sobre o diagrama fasorial, possibilitando a geração de sinais assimétricos.

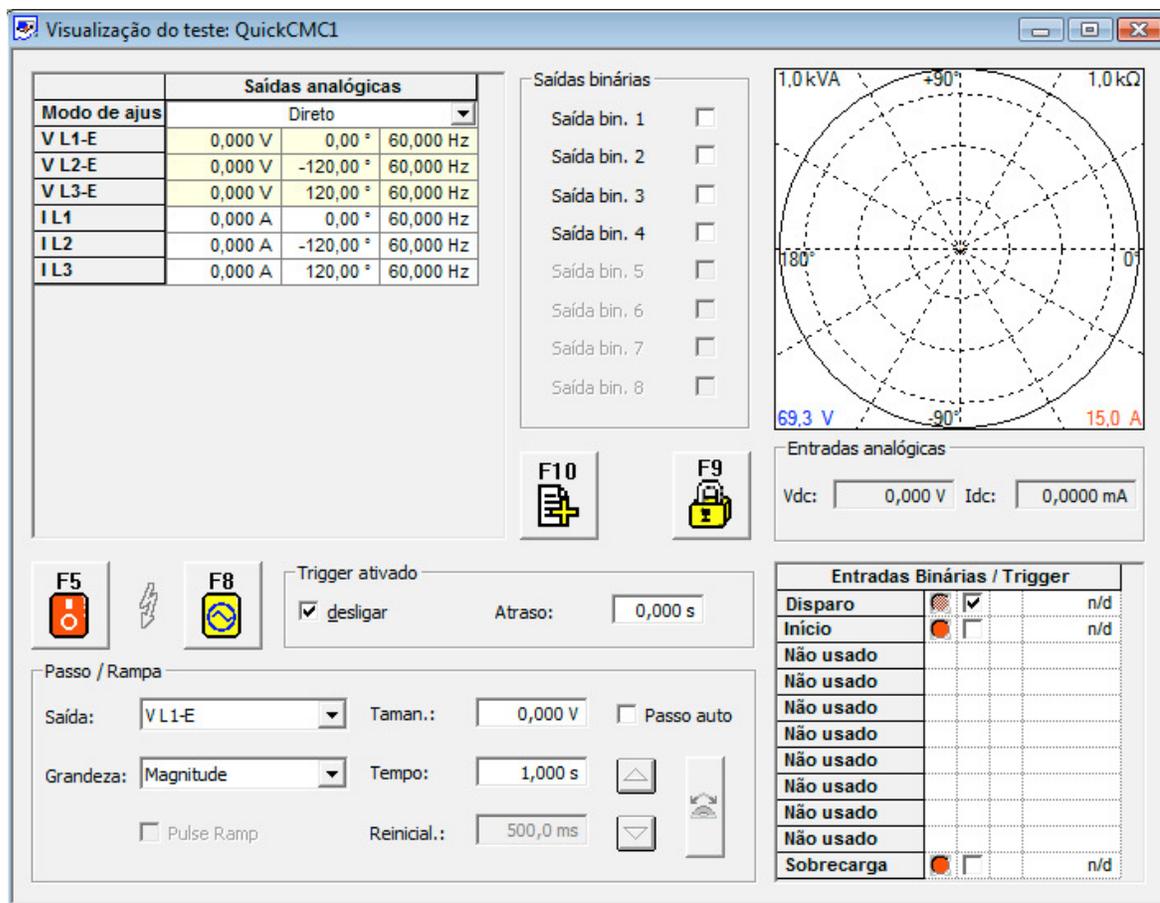


Figura 46 - Tela para visualização de teste na ferramenta QuickCMC

Esta ferramenta permite também que sejam associadas às saídas de corrente em paralelo para aumentar a capacidade de injeção das mesmas na mala de teste, ou que sejam associadas de forma a definir qual curto será testado no relé. Os ajustes e os controles dos 12 amplificadores podem ser individualmente executados.

Permite que sejam executados os ensaios para o cálculo das correntes de pick up ($I_{pick-up}$) e pick up instantâneo, correntes de drop out ($I_{drop-out}$), teste da curva de corrente x tempo, tempos de trip e de abertura do disjuntor.

Todos os resultados dos testes ficam armazenados através de um relatório de testes gerados automaticamente.

É muito utilizado na execução de testes para as funções de sobrecorrente (instantâneo ou temporizado) do relé. A figura 46 mostra a tela de visualização do teste na ferramenta QuickCMC.

4.4.2 – Ramping

Permite que sejam executados os mesmos testes que os executados na ferramenta QuickCMC, com a diferença, que podem ser definidas e geradas rampas de amplitude, fase ou frequência para as saídas de corrente e tensão (que é a grande vantagem desta ferramenta). Permite, por exemplo, que duas rampas com variáveis diferentes sejam executadas simultaneamente, de forma sincronizada, assim como a execução de uma seqüência de até cinco segmentos consecutivos de rampa.

4.4.3 – State Sequencer

Esta ferramenta é um seqüenciador de estados que permite que seja simulado qualquer tipo de curto-circuito ou perturbação, para testar o relé sob as condições especificadas. É muito utilizado na determinação de tempos de operação para sucessivas ocorrências no sistema. É possível que seja construído e simulado qualquer tipo de defeito e perturbação e testar o relé sob estas condições.

O State Sequencer permite que vários estados sejam correlacionados entre si para que seja definida uma seqüência de testes no relé. Podemos definir um estado como as condições de saídas (tensões, correntes e saída binárias) e uma condição de finalização de estado. As transições entre os estados podem ocorrer depois de um tempo determinado ou depois de uma condição de disparo nas entradas binárias do CMC.

Entre os estados, pode-se ajustar até 12 sinais com amplitude, fase e frequência independentes. Em cada estado pode ser adicionada uma seqüência de condições de pré-defeito, defeito e pós-defeito para que se possa testar os relés de distância. É possível ainda que sejam informados os tempos de atuação de um relé, a partir do momento em que foi observada o

defeito. Com isto, é possível verificar se os relés de campo atuaram de forma correta, dependendo das parametrizações informadas. Esta função dispõe de diagramas vetoriais e oscilografia que auxilia para uma análise mais detalhada do teste.

A figura 47 mostra a tela de visualização desta ferramenta.

4.4.4 – Outros módulos de teste

A mala de teste possui ainda outras funções, que já são específicas para testar determinadas funções do relé. O módulo de teste Overcurrent permite que sejam testadas as funções de sobrecorrente instantânea ou temporizada (50/51). Para isto basta que seja descarregado na mala de teste todas as parametrizações do relé a ser estudado.

Do mesmo jeito existem os módulos de teste Distância e Differential, que permitem que sejam testados respectivamente as funções de distância (21) e diferencial (87).

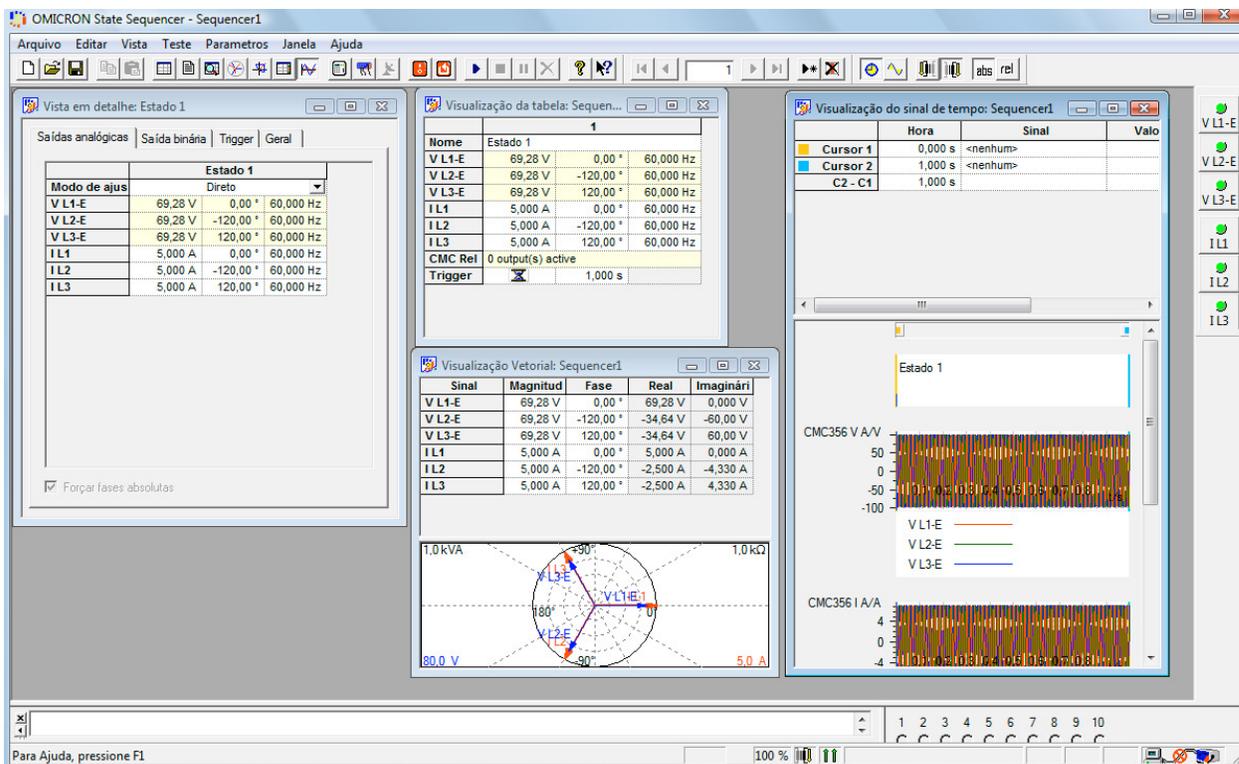


Figura 47 – Tela para visualização de teste na ferramenta State Sequencer

CAPÍTULO 5 – TESTE NO RELÉ DIGITAL SEL 421 ATRAVÉS DA MALA TESTE CMC 256-6

5.1 – Introdução

Os ensaios descritos no presente trabalho foram realizados com o relé modelo 421 do fabricante SEL (Schweitzer Engineering Laboratories). Este é um relé digital moderno muito utilizado em indústrias, redes de distribuição e principalmente em linhas de transmissão onde até dois disjuntores de uma mesma linha podem ser conectados ao mesmo relé.

Este equipamento permite a proteção de uma linha de transmissão usando uma combinação de cinco zonas de elementos de distância de fase e terra e elementos de sobrecorrente direcionais. Para parametrização deste relé, existe um software chamado de AcSELeRator QuickSet SEL-5030 que facilita e agiliza a execução dos ajustes. Vale lembrar que a parametrização também é possível ser feita no painel frontal do equipamento.

A figura 48 mostra o painel frontal deste relé digital.

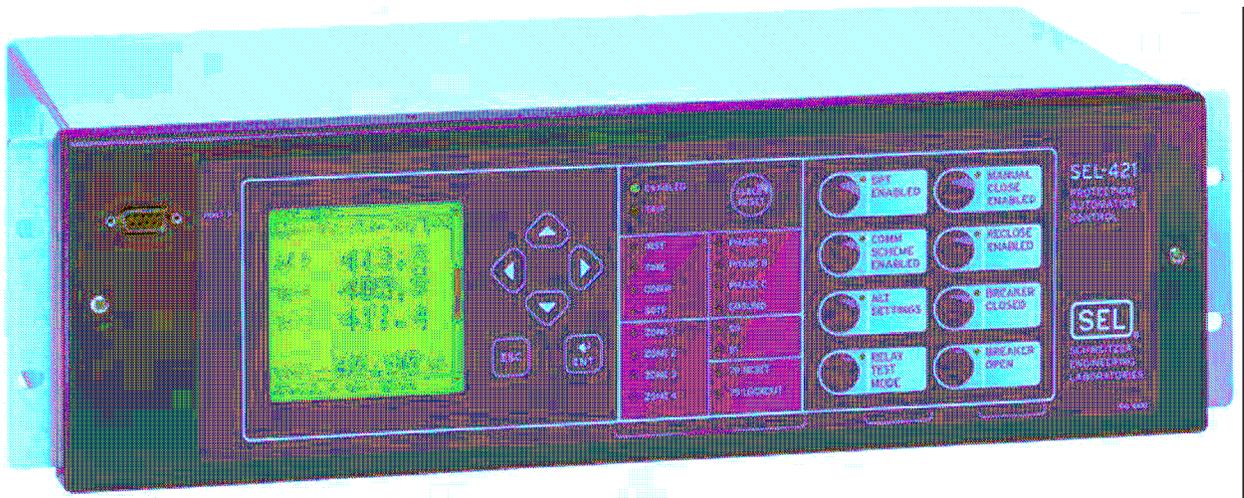


Figura 48 - Relé digital modelo 421 da SEL (Schweitzer Engineering Laboratories)

Este relé possui as seguintes funções de proteções:

- 50/51 – sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - sobrecorrente residual instantânea e temporizada;

- 50/51Q (46) - sobrecorrente instantânea e temporizada de seqüência negativa;
- 21 - distância de fase, cinco zonas tipo Mho;
- 21G - distância de neutro, cinco zonas tipo Mho e cinco zonas tipo quadrilateral;
- 67G - sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente e tensão);
- 67Q - direcional de seqüência negativa (polarizado por tensão);
- 85 - esquemas de controle ou teleproteção.;
- 78/68 - disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79 – religamento automático monopolar (2 tentativas) ou tripolar (quatro tentativas) para até dois disjuntores;
- 25 - verificação de sincronismo para até dois disjuntores;
- 27/59 - subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G - sobretensão de neutro;
- 59Q - sobretensão de seqüência negativa;
- 50/62BF - falha de disjuntor para até dois disjuntores;
- 60 - perda de potencial;
- 81 - sub/Sobrefrequência, taxa de variação de frequência df/dt ;
- 49 – sobrecarga por imagem térmica;
- 49T – elemento térmico com medição de temperatura através de RTD's - SEL 2600A (opcional).
- 87V – diferencial de tensão para banco de capacitores de AT (por lógica)

Além das funções de proteção, o relé possui outras características e benefícios na área de automação, como a existência de um display que permite a medição local, eliminando a necessidade de instalação de outros medidores no painel. Possui também links Ethernet e seriais que permitem a transmissão com precisão de informações essenciais como dados de medição, estados dos elementos, contatos de entrada e saída da proteção, monitor do disjuntor, relatórios de eventos do relé e sincronização de tempo.

Possui também um localizador de defeitos em quilômetros ou em porcentagem, que facilita a equipe de manutenção de linhas de transmissão na hora de fazer alguma inspeção em decorrência de algum defeito, além de possuir recurso de oscilografia que permite o registro de tensões, correntes e pontos internos com uma taxa de amostragem de até 8kHz.

5.2 – Teste das funções de sobrecorrente e distância

Antes de iniciarmos os ensaios, foram feitas as seguintes parametrizações no relé digital:

- $I_{\text{pick-up}} = 1 \text{ A}$
- Curva escolhida: IEC muito inversa, curva 0,6 (conforme Anexo I)
- $Z_{\text{LINHA}} = 4,94 \ \Omega$
- $\Theta_{\text{LINHA}} = 86,52^\circ$
- $K_0 = 1,080$
- $\Theta_{K_0} = - 5,04^\circ$
- $Z_{\text{LINHA } 1^\circ \text{ ZONA}} = 3,96 \ \Omega \text{ (80\% LT)}$
- $Z_{\text{LINHA } 2^\circ \text{ ZONA}} = 5,93 \ \Omega \text{ (120 \% LT)}$
- $Z_{\text{LINHA } 3^\circ \text{ ZONA (REVERSA)}} = 1,98 \ \Omega \text{ (40 \% LT)}$
- Tempo de atuação zona 1 = 30 ms

- Tempo de atuação zona 2 = 500 ms
- Tempo de atuação zona 3 (reversa) = 30 ms

Para estas parametrizações, foram feitos os testes das funções de sobrecorrente e distância do relé digital. No teste de sobrecorrente, foi aplicado um curto-circuito monofásico e observado o tempo de atuação do relé para diferentes taps numa mesma curva inversa. No teste de distância, foi dado um curto-circuito bifásico e foram escolhidos alguns pontos próximos aos limites das zonas de proteção e observados se ocorria atuação e os tempos associados.

Para que isto fosse medido, a saída do relé (que iria para o contato de abertura do disjuntor) foi ligada à mala de teste, através de uma entrada binária da mesma. Assim, foi possível verificar, para cada caso de proteção, se as parametrizações acima seriam satisfatórias.

Para cada teste é necessário que se sigam três passos para que haja sucesso no trabalho. O primeiro passo corresponde a inserir os dados do relé que será testado no software. No caso do teste de sobrecorrente, por exemplo, é necessária que seja escolhida a mesma curva inversa do relé, assim como o $I_{pick-up}$. No caso do teste do relé de distância, é onde se coloca a impedância e o ângulo de impedância da linha (Z_{LINHA} e Θ_{LINHA}), além das zonas de atuação para o qual o relé está parametrizado.

O segundo passo corresponde a configurar a mala de teste para aplicação dos sinais de entrada e recepção dos sinais de saída do relé.

O terceiro e último passo corresponde à execução do teste em si.

Seguem os testes executados no Laboratório de Proteção da UFRJ.

5.2.1 – Teste da função de Sobrecorrente

Para execução deste teste, é necessário que seja utilizado o módulo de teste Overcurrent, que pode ser acessado através da tela inicial do software de teste da mala, conforme figura 45.

No **primeiro passo**, conforme descrito acima, devemos informar à mala de teste todas as parametrizações do relé a ser testado. A figura 49 representa a tela inicial do módulo de teste Overcurrent, antes de qualquer configuração.

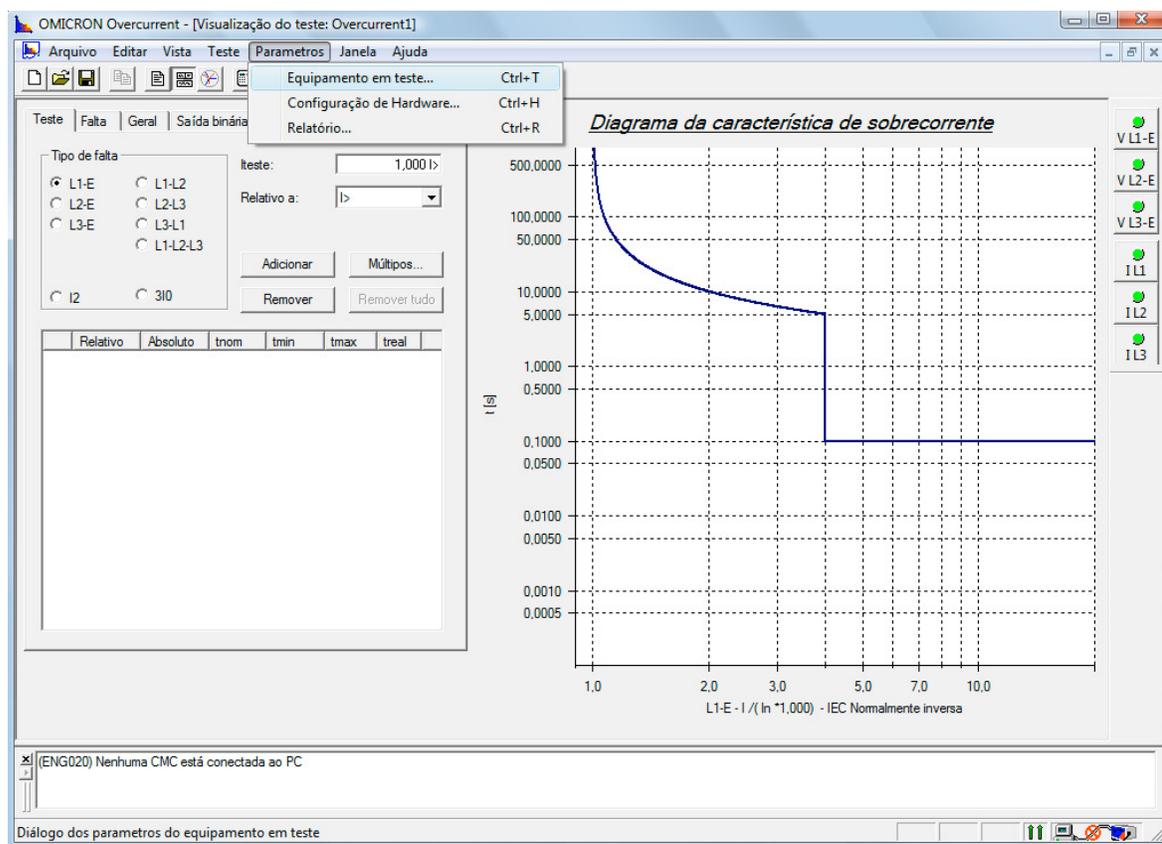


Figura 49 – Tela inicial do módulo de teste Overcurrent

Clicando em “Parâmetros” e depois em “Equipamento em teste...”, abrirá outra tela, conforme figura 50.

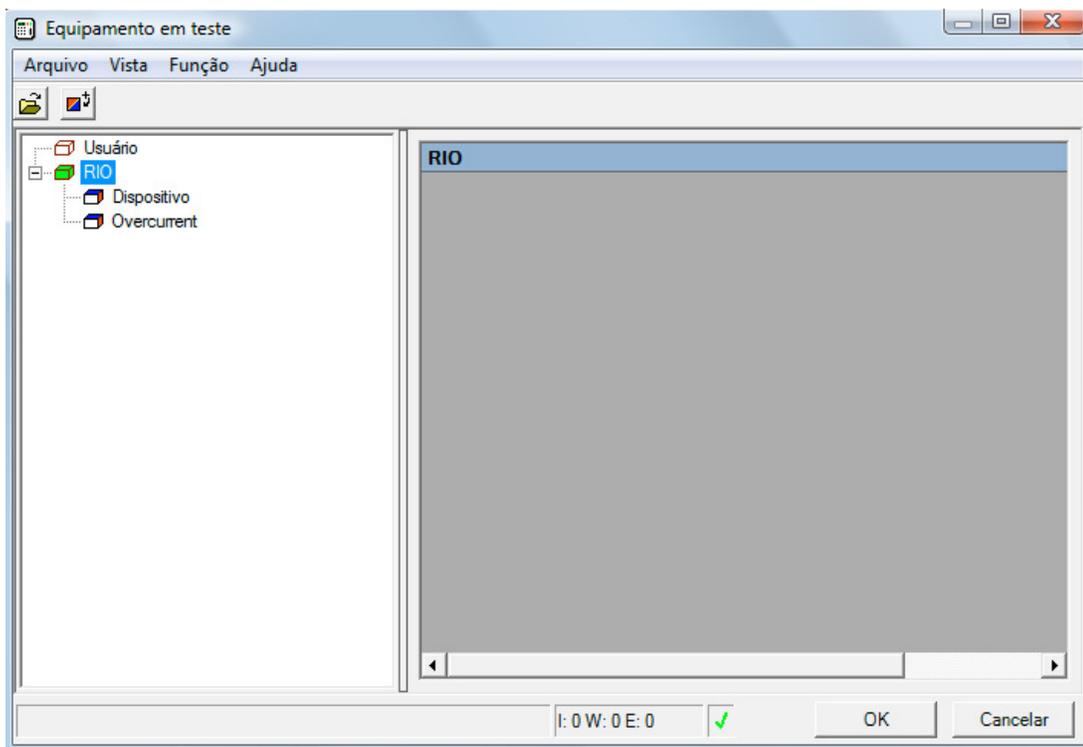


Figura 50 – Tela para configuração no software do relé a ser testado

Na tela, representada pela figura 50, clicando em dispositivo, poderemos definir algumas informações a respeito do relé como modelo e fabricante, subestação e bay a qual pertence (quando houver), valores nominais de tensão (primária e secundária), corrente (primária e secundária), frequência e número de fases. A figura 51 mostra a tela em que são feitos estes ajustes.

Clicando-se na opção Overcurrent da figura 50, definiremos de fato na mala as parametrizações existentes no relé. A figura 52 mostra a tela na qual definiremos a tolerância de corrente, que pode ser relativa ou absoluta. A tolerância relativa é definida em % e foi escolhida como sendo 5%. Já a tolerância absoluta é dada em pu e foi definida em nosso caso como sendo 0,1 pu.

The image shows a software window titled "Ajustes do dispositivo" (Device Settings) for a SEL 421 relay. The window is organized into several sections:

- Dispositivo (Device):**
 - Nome/descrição: SEL 421
 - Fabricante: SEL
 - Tipo de dispositivo: 51
 - Endereço do dispositivo: [Empty]
 - Número de série/modelo: [Empty]
 - Informação adicional 1: CURSO UFRJ 2008
 - Informação adicional 2: [Empty]
- Valores nominais (Nominal values):**
 - Número de fases: 2
 - f nom: 60,000 Hz
 - V nom (secundária): 115,000 V (L-L), 66,395 V (L-N)
 - V primária: 110,000 kV (L-L), 63,508 kV (L-N)
 - I nom (secundário): 5,000 A
 - I primária: 1,000 kA
- Subestação (Substation):**
 - Nome: [Empty]
 - Endereço: [Empty]
- Bay:**
 - Nome: [Empty]
 - Endereço: [Empty]
- Sensibilidade de Detecção de Sobrecarga (Overload Detection Sensitivity):**
 - Alto (selected)
 - Usuário (50,000 ms)
 - Baixo
 - Off
- Filtros Debounce/degitch (Filters):**
 - Tempo de debounce: 3,000 ms
 - Tempo de deglitch: 4,000 ms

Buttons for "OK", "Cancelar", and "Ajuda" are located at the bottom of the window.

Figura 51 – Tela para ajustes do relé SEL 421

Será necessária também a definição da tolerância de tempo, que também pode ser relativa ou absoluta. Em nossa análise, definimos a tolerância de tempo relativa como sendo 10 % e a absoluta em 0,1 s. No item “seleção de grupo de falta”, foi marcada a opção Fase-neutro.

O próximo passo será ajustar na caixa “Parâmetros I/t do grupo de falta selecionado”, os parâmetros do grupo de falta ajustado no relé. Foi assinalado apenas I_D e escolhido I_{pick} = 0,2 pu (1 A) e o tempo de atuação como sendo 0,6 s. Vale lembrar que estes foram os mesmo valores parametrizados no relé.

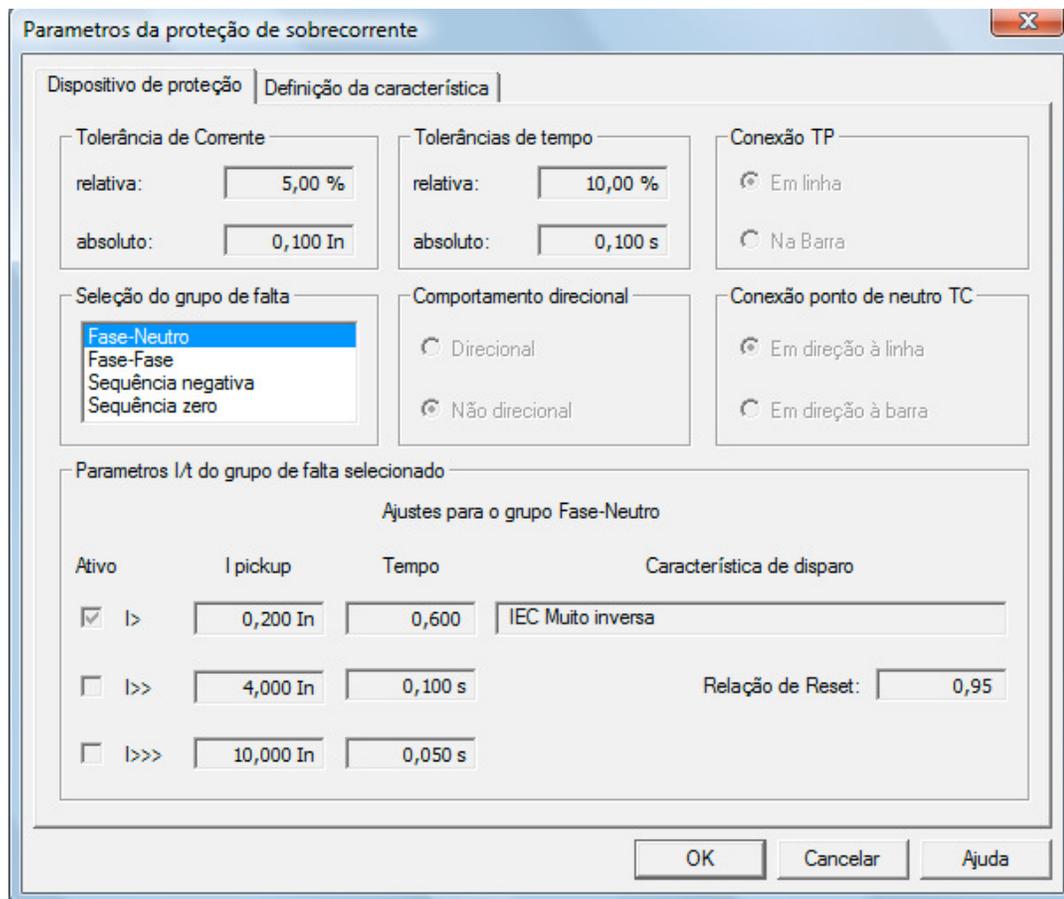


Figura 52 – Ajustes do Dispositivo de proteção

O último ajuste necessário é a definição da característica da curva inversa. Neste item, conforme figura 53, existem quatro formas de se definir a equação característica correspondente a curva inversa a ser utilizada.

Na opção Copiar, a característica de diferentes grupos de falta poderá ser copiada para o grupo de falta selecionado. Na opção Novo, poderá ser criada uma nova curva inversa. Na opção Pré-definido, será aberta uma caixa de diálogo onde já existem as curvas inversa, muito inversa, extremamente inversa e tempo definido, todas da família IEC. Já na opção Importar existem outras curvas definidas por outras normas como a US, a IEEE e a ANSI. Em nosso caso, foi escolhido, conforme parametrização do relé, a curva muito inversa da norma IEC (anexo 1). Esta curva já estava pré-definida no software.

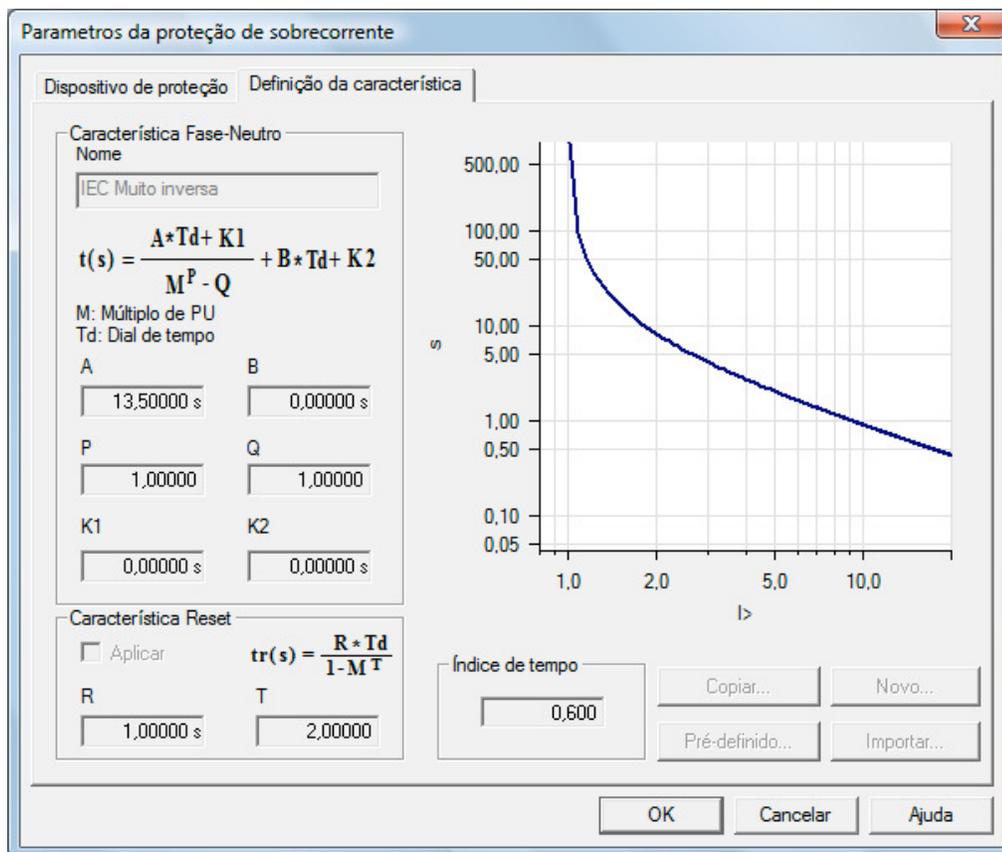


Figura 53 – Definição das características

A equação que rege este gráfico é:

$$t(s) = \frac{A \times Td}{M^P - Q} + B \times Td + K2 \quad (5.2.1.1)$$

De acordo com os valores das constantes na figura 53, a curva muito inversa parametrizada no relé e agora também inserida no software de teste obedece à seguinte equação:

$$t(s) = \frac{13,5 \times Td}{M - 1}, \quad (5.2.1.2)$$

Onde M corresponde ao tap (eixo X) e Td é a curva escolhida, em nosso caso 0,6.

Depois de implementadas todas essas configurações, a curva a ser estudada foi traçada (conforme figura 54) assim como as características do relé a ser testado (SEL 421) foram

repassadas ao software. Para confirmar que a curva foi alterada conforme os nossos ajustes, basta comparar a figura 54 com a 49.

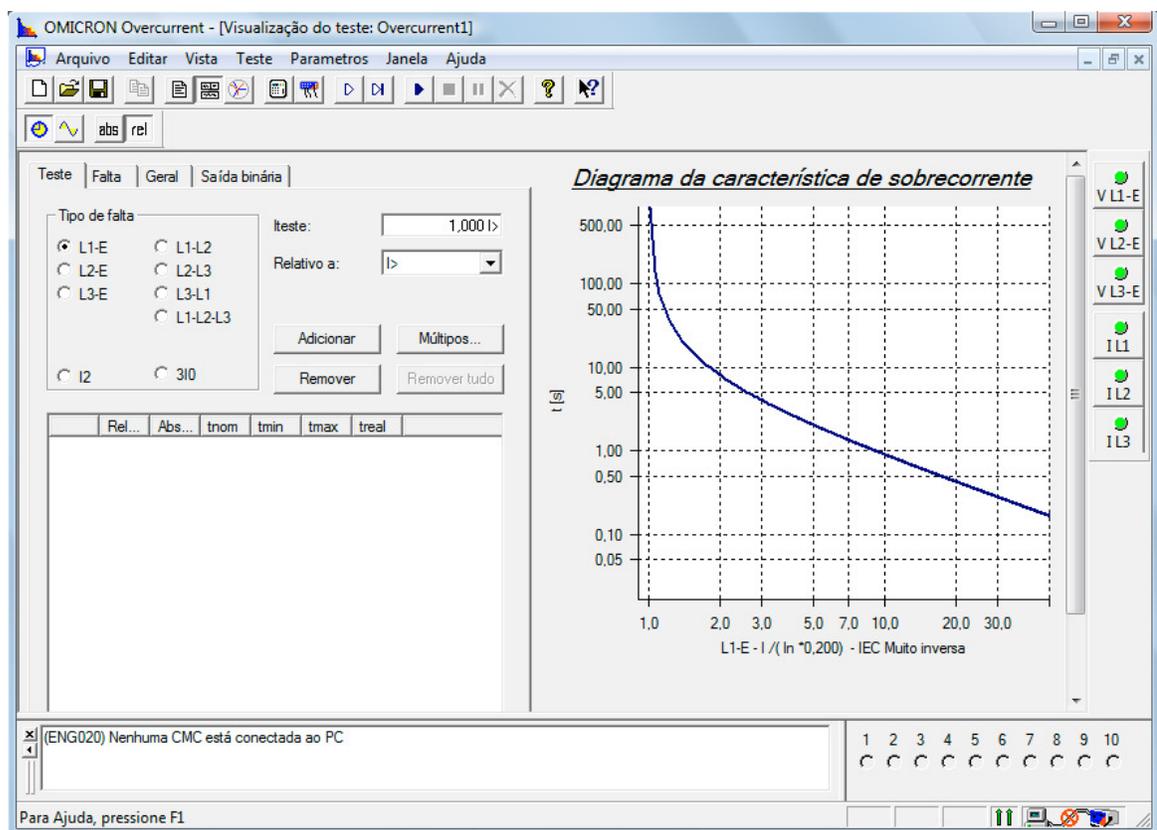


Figura 54 – Curva característica traçada

Será necessário agora passar para o **segundo passo**, que corresponde às configurações de hardware. Para que estas configurações sejam feitas, é necessário que seja clicado em “Parametros” opção existente na barra superior do programa, conforme figura 49 e, posteriormente, em “Configuração de Hardware”. Dentro deste item são ativadas apenas as saídas de corrente, pois estamos interessado neste momento apenas na função de sobrecorrente. A figura 55 mostra como é escolhida esta configuração. Foi escolhida a opção que fornecer três entradas de corrente com no máximo 12,5 A cada uma delas, com uma potência de 70 VA. A saída de tensão não está sendo utilizada, pois não será necessária neste teste.

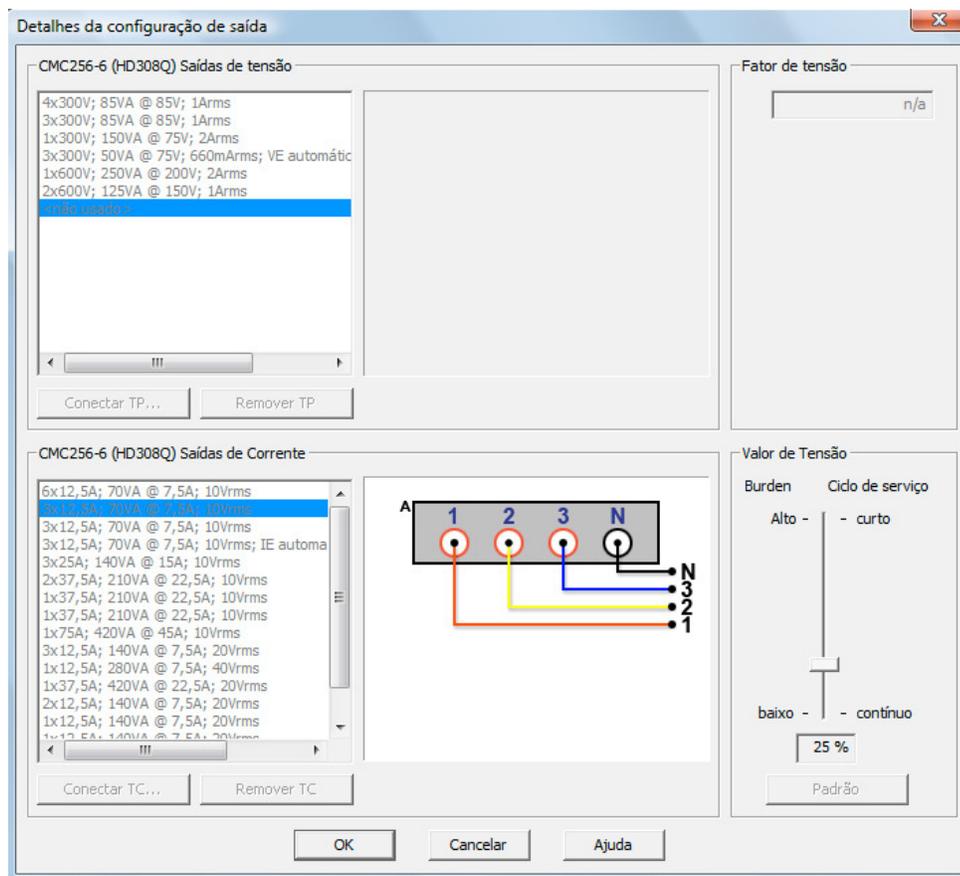


Figura 55 – Configuração das saída de tensão e corrente da mala de teste

O disparo do relé através da entrada binária 1 também é ativada, conforme figura 56. Neste campo podem ser monitoradas até 10 entradas, tanto analógicas quanto binárias.

Implementadas todas as configurações de hardware, será dado o **terceiro passo**, necessário para definir o que queremos que seja feito no teste. É definido então o tipo de defeito, que em nosso caso é monofásica (L1-E). Em seguida, através da opção Múltiplos, foi definido que iríamos analisar as atuações do relé para os taps $M = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$ e $5,0$. As respostas com os tempos de atuação são mostradas na figura 57.

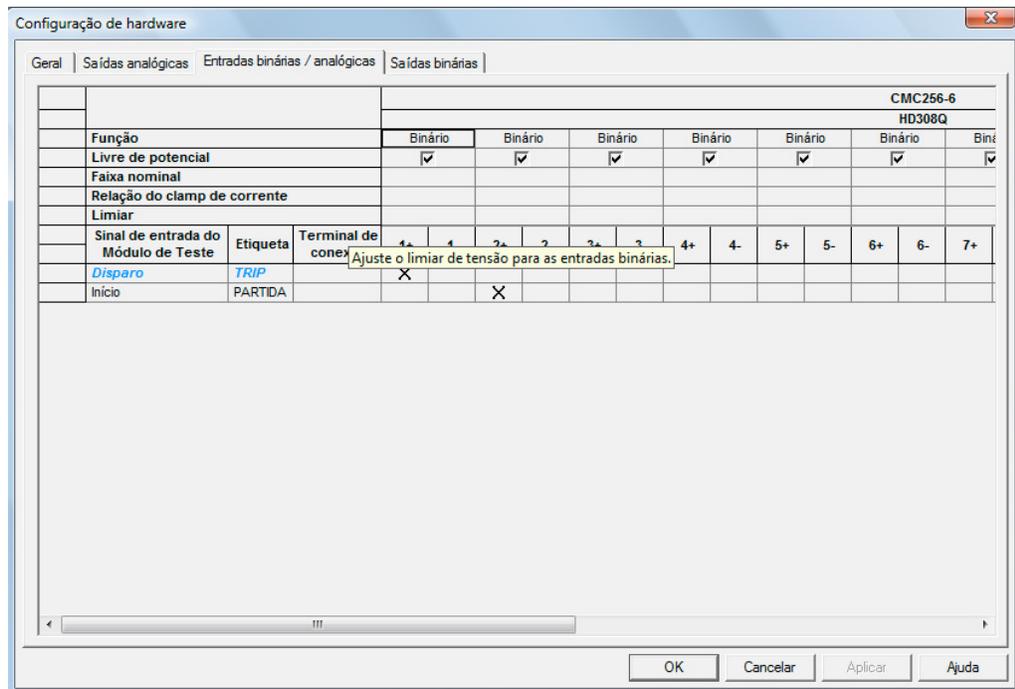


Figura 56 – Configuração das entradas binárias/analógicas da mala de teste

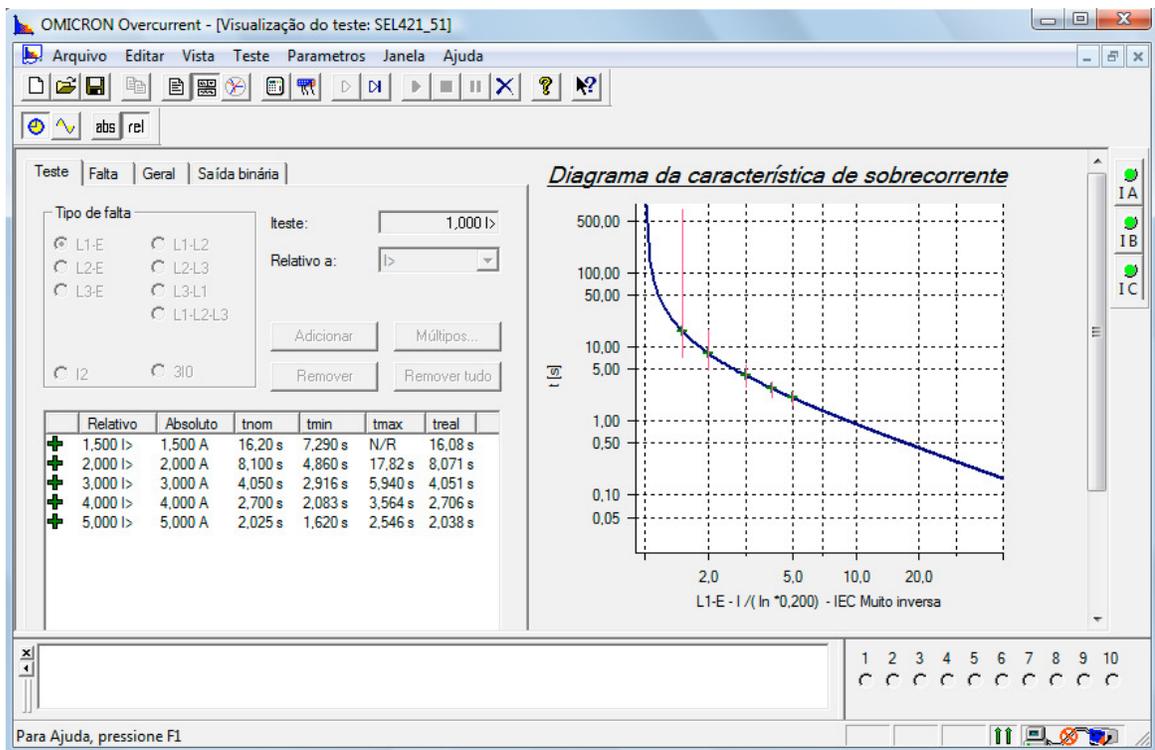


Figura 57 – Tela com o ensaio de sobrecorrente executado

Para uma melhor visualização, a tabela 2 apresenta os resultados dos testes executados. Pode ser observado pelo desvio padrão que os valores de tempo de atuação (t) parametrizados no relé estão satisfatórios, visto que uma tolerância de tempo aceitável é de 10 % e no caso estudado o erro do tempo não passou de 0,77 %.

Tap (A)	t nominal do relé (s)	t medido no ensaio (s)	Desvio (%)
1,5	16,200	16,08	- 0,77
2,0	8,100	8,071	- 0,36
3,0	4,050	4,051	0,01
4,0	2,700	2,706	0,21
5,0	2,025	2,038	0,64

Tabela 2 – Resultados do ensaio da função de sobrecorrente do relé SEL 421

O longo tempo de atuação, para os taps mais baixos, está relacionado ao posicionamento do relé dentro do sistema de proteção. Para este curto-circuito, devido ao baixo valor de corrente e o tempo elevado de atuação, só irá resultar em atuação do relé caso algum dos relés a jusante não atue.

5.2.2 – Teste da função de Distância

Para execução deste teste, é necessária a utilização de outro módulo de teste existente no software de teste da mala chamada de Distância, conforme figura 45.

No **primeiro passo**, conforme feito para o teste de sobrecorrente, é necessário informar à mala de teste todas as parametrizações do relé SEL 421. A figura 58 representa a tela inicial do módulo de teste Distância, antes de qualquer configuração.

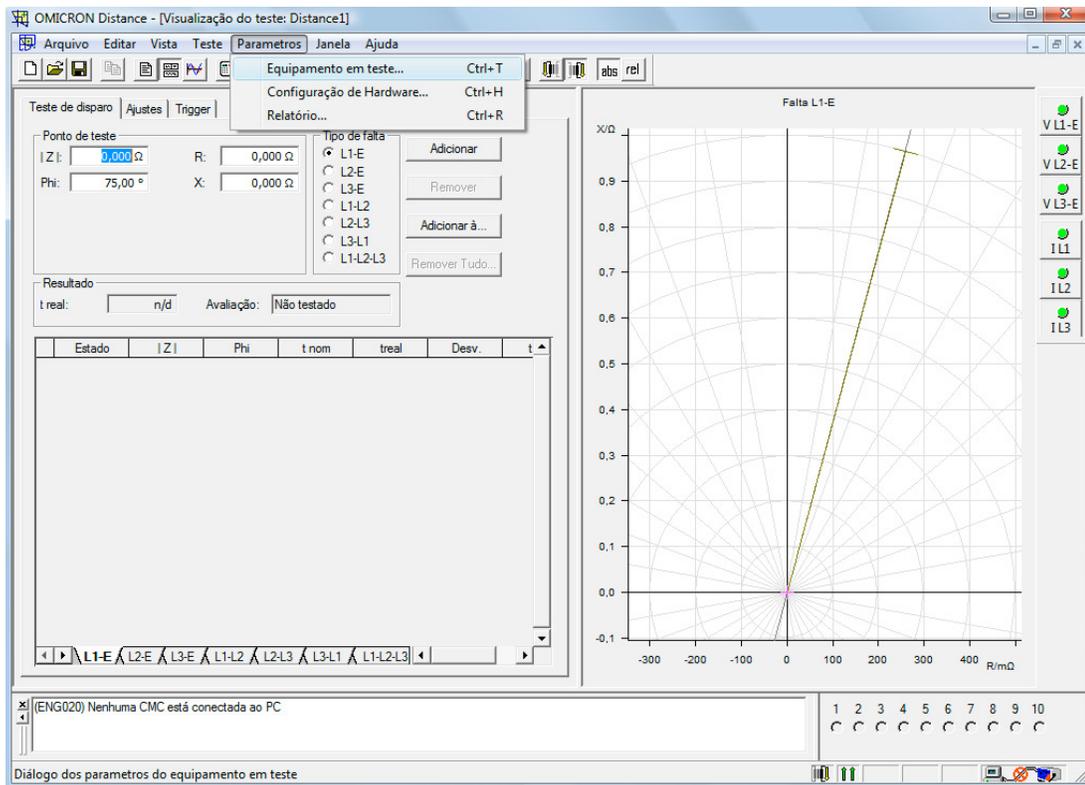


Figura 58 – Tela inicial do módulo de teste Distance

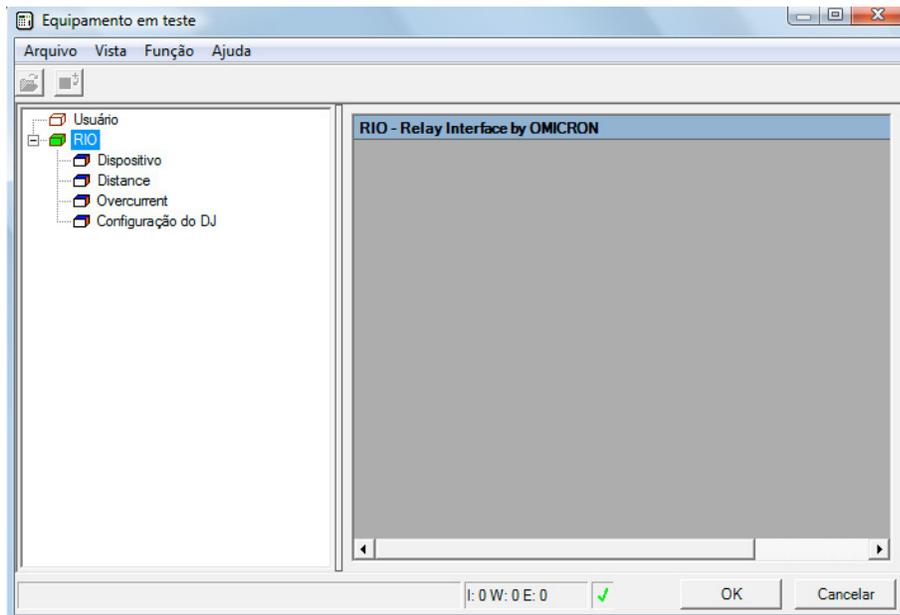


Figura 59 - Configuração do equipamento em teste

Clicando-se em “Equipamento em teste...” aparecerá a tela presente na figura 59. Clicando-se em “Dispositivo”, aparecerá a mesma tela representada pela figura 51 e serão feitos os mesmos ajustes. A mudança mais importante para o teste de sobrecorrente ocorre quando é clicado na opção “Distance”. Clicando nesta opção, aparece a tela representada pela figura 60.

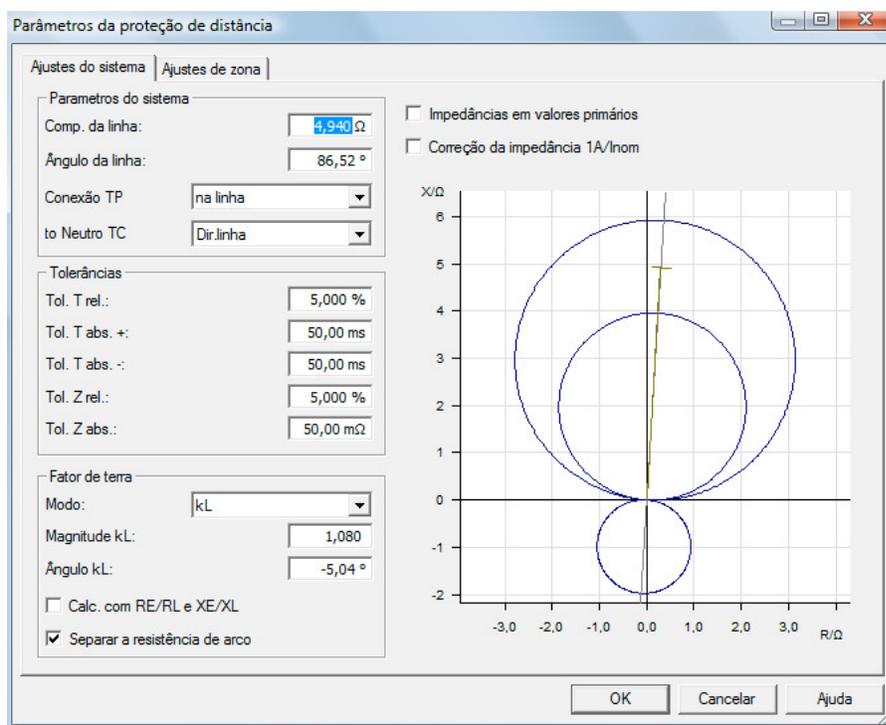


Figura 60 – Configuração dos parâmetros do relé

Na tela representada pela figura 60, são inseridas as informações de comprimento (4,94 Ω) e ângulo (86,52°) da linha de transmissão protegida, além de alguns valores padrões de tolerância e o fator de terra ($K_0 = 1,080$ e $\theta_{K_0} = - 5,04^\circ$).

O fator de compensação de terra compensa a diferença entre as impedâncias de defeito para a terra e a impedância para falhas entre fases medida pelo relé. É sempre aplicado para falhas monofásicas entre fase e terra. No software o fator de terra pode ser inserido de três formas:

$$K_L = \frac{Z_E}{Z_L} = \frac{1}{3} \times \left[\frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right] \quad (5.2.2.1)$$

$$\frac{R_E}{R_L} \text{ e } \frac{X_E}{X_L} \quad (5.2.2.2)$$

$$\frac{Z_0}{Z_1} \quad (5.2.2.3)$$

Para finalizar a configuração das informações do relé no software, é necessário ainda traçar os gráficos representativos das zonas de atuação. O relé testado foi parametrizado para atuar com três zonas de proteção, todas elas Mho (admitância) sendo:

- 1ª Zona instantânea até 80% da LT. ($Z_{1^a \text{ zona}} = 3,96 \Omega$, $t_{\text{disparo}} = 30,0 \text{ ms}$)
- 2ª Zona temporizada até 120 % da LT. ($Z_{2^a \text{ zona}} = 5,93 \Omega$, $t_{\text{disparo}} = 500,0 \text{ ms}$)
- 3ª Zona instantânea inversa até 40 % da LT. ($Z_{3^a \text{ zona}} = 1,98 \Omega$, $t_{\text{disparo}} = 30,0 \text{ ms}$)

Para os três casos foi mantido o ângulo de 86,52°. A 3ª zona de proteção não será utilizada em nossos testes, mas foi incluída no software pois está parametrizada no relé.

Inseridas estas informações na aba ajustes de zona, na tela de comando representada na figura 59, obtém-se o gráfico de zonas de atuações dentro da mesma tela.

Será necessário agora passar para o **segundo passo**, que corresponde às configurações de hardware. A única diferença deste segundo passo neste teste comparado com o teste de sobrecorrente é que, agora, serão ativadas as saídas de tensão (3 x 300 V), pois a tensão será necessária no ensaio de distância.

Para finalizar, no **terceiro passo** é ajustada a corrente de curto-circuito em 3 A, selecionado o curto-circuito bifásico entre as fases A e B (L1-L2). Foram escolhidos os 10 pontos indicados no gráfico para verificação das atuações do relé. A figura 61 mostra como fica esta tela com os resultados.

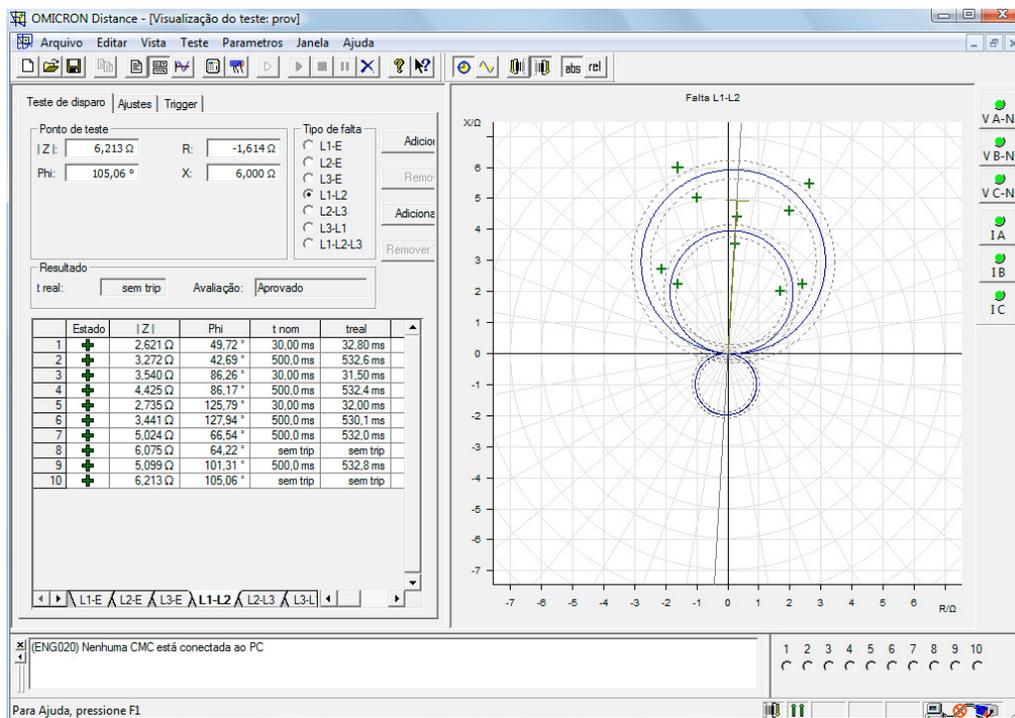


Figura 61 - Ensaio de distância realizado

As tabelas 3, 4 e 5 mostram os resultados obtidos no teste. Cada uma destas tabelas foi elaborada para uma zona específica de proteção.

Pontos	$Z \angle \theta$ ($\Omega \angle ^\circ$)	t nominal do relé (ms)	t medido no ensaio (ms)	Desvio (%)
1	2,621 \angle 49,72°	30	32,80	9,33
3	3,540 \angle 86,26°	30	31,50	5,00
5	2,735 \angle 125,79°	30	32,00	6,67

Tabela 3 - Pontos dentro da 1ª zona de proteção

Pontos	$Z \angle \theta$ ($\Omega \angle ^\circ$)	t nominal do relé (ms)	t medido no ensaio (ms)	Desvio (%)
--------	--	------------------------	-------------------------	------------

2	3,272 \angle 42,69°	500	532,60	6,52
4	4,425 \angle 86,17°	500	532,40	6,48
6	3,441 \angle 127,94°	500	530,10	6,02
7	5,024 \angle 66,54°	500	532,00	6,40
9	5,099 \angle 101,31°	500	532,80	6,56

Tabela 4 - Pontos dentro da 2ª zona de proteção

Pontos	Z \angle θ ($\Omega \angle$ °)	t nominal do relé (ms)	t medido no ensaio (ms)	Desvio (%)
8	6,075 \angle 64,22°	sem trip	sem trip	-
10	6,213 \angle 105,06°	sem trip	sem trip	-

Tabela 5 - Pontos fora das zonas de proteção

O teste foi bem sucedido e aprovado pelo software da mala de teste. É importante frisar que, mesmo para a zona 1 onde a atuação é instantânea, temos um tempo de atuação nominal na casa dos 30 ms, que é o tempo necessário para o fechamento do contato. Para a zona 2 foi escolhido um tempo de 500 ms e todos os ensaios confirmaram a correta atuação. Para os pontos fora das zonas, como esperado não houve atuação.

Conforme esperado também, mesmo os pontos estando nos limites das zonas, todos resultaram em atuação correta, dentro da sua zona de atuação.

A figura 62 mostra o gráfico X x R da figura 61 de uma forma mais ampliada, afim de possibilitar melhor visualização dos pontos.

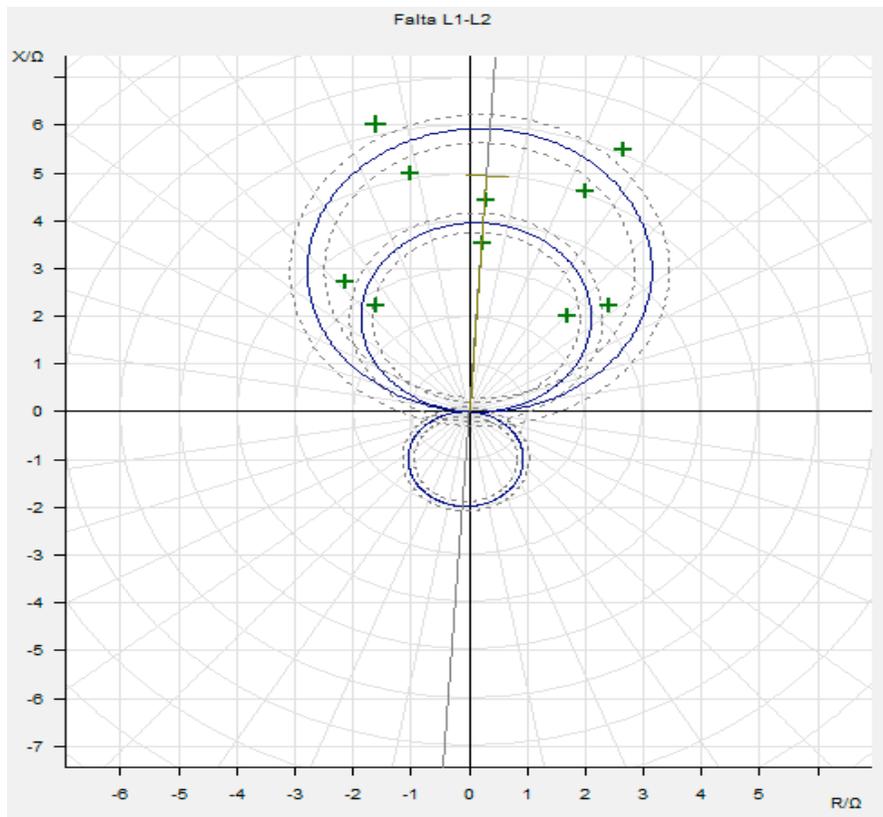


Figura 62 - Gráfico X x R das zonas de atuação do relé de distância

CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO COM PROGRAMAS EXISTENTES

6.1 – Introdução

O planejamento e a operação de um sistema elétrico de potência necessitam de estudos e simulações dos equipamentos diante de condições típicas e atípicas de operação. As condições típicas de operação são aquelas onde temos o mesmo operando em condições normais e precisamos dividir a geração e o fluxo de potência entre as áreas consumidoras, de acordo com as respectivas necessidades. As condições atípicas são aquelas onde ocorrem curto-circuitos que mudam a configuração do sistema naquele momento e necessitam de uma manobra rápida do operador a fim de garantir que os consumidores finais não fiquem sem energia.

Para ambos os casos, é necessário o uso de ferramentas específicas, que simulam computacionalmente o sistema elétrico. Estes programas através de cálculos matemáticos permitem que todos os equipamentos que compõem um sistema (linhas, transformadores, reatores...) sejam representados na sua forma real, além de permitir que sejam estudadas todas as condições possíveis de operação de um sistema elétrico, sendo ela típica ou atípica.

Existem no mercado alguns programas disponíveis para estas análises. O CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica) produz várias ferramentas muito utilizadas pelas empresas que atuam no sistema elétrico, sendo os mais importantes:

- ANAREDE – programa utilizado para o estudo de fluxo de potência. Permite também a integração deste fluxo de potência com a equivalência de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e fluxo e análise de segurança de tensão;
- ANATEM – programa utilizado para estudos de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência;
- ANAFAS – programa utilizado para o cálculo de curto-circuito, permitindo a execução automática de grande número de faltas simultâneas. É usado na proteção de sistemas elétricos.

Outro pacote computacional muito conhecido no Brasil e internacionalmente é o ASPEN (Advanced Systems for Power Engineering). Algumas facilidades deste pacote são:

- OneLiner – programa de curto-circuito e coordenação de relés que visa dar apoio ao estudo de proteção de sistemas elétricos utilizado para o cálculo de curto-circuito, permitindo a execução automática de grande número de faltas simultâneas.
- Power Flow – programa de estudos de fluxo de potência, muito utilizado para o planejamento e estudos de operação.

Para o nosso estudo de curto-circuito em sistema de proteção interessa o programa CEPTEL ANAFAS e o ASPEN OneLiner. Os dois programas permitem o cálculo do curto-circuito em vários pontos de um sistema de potência, contudo cada um tem sua particularidade e metodologia de cálculo.

6.2 – Facilidades Disponíveis no Programa ANAFAS

O programa ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) foi desenvolvido para possibilitar o cálculo de curto-circuito sob várias condições. Permite por exemplo, que se escolha o tipo de defeito, as fases envolvidas, se há impedância ou não no ponto de curto-circuito, se o curto é simultâneo ou não e, por fim, se há carregamento pré-falta. Permite ainda que seja executado um grande número de defeitos simultâneos.

Pode ser usado integrado com o SAPRE (Sistema de Análise e Projetos de Redes Elétricas) que é um ambiente integrado para aplicações computacionais de operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, compartilhamento de dados entre as aplicações e unicidade das informações armazenadas em seu banco de dados. Utilizado com o SAPRE, o ANAFAS se torna de fácil utilização, pois passa a dispor de uma versão gráfica que permite a edição de dados (como as características dos equipamentos de rede), além de execução de estudos e visualização dos resultados.

Além das características mencionadas acima, o ANAFAS tem outras características, como:

- Possibilidade de especificar dentro de um sistema o conjunto de barras que deve fazer parte da simulação, os tipos de defeitos e as condições de cada. Por exemplo, podemos aplicar defeitos bifásicos e trifásicos em determinadas barras de um sistema, fazendo com que uma linha desligue;
- Possibilidade ainda, de definir diferentes níveis de curto-circuitos, para as barras do exemplo acima;
- Possibilidade de escolher o que será medido em qualquer ponto do sistema, como a corrente I_A e a tensão V_A de uma determinada barra, sendo que o curto-circuito aplicado em outra barra qualquer;
- Todas as grandezas medidas do sistema podem ser informadas através de valores das fases A, B e C, AB, BC e CA ou através das componentes simétricas 0, 1 e 2;
- Os resultados podem ser monitorados de maneira que o programa alerte caso uma grandeza esteja dentro de limites especificados. Podem ser monitorados módulo, ângulo, parte real ou parte imaginária;
- Permite o estudo da superação de disjuntores, fazendo uma análise entre as piores condições de curto-circuito para cada terminal de linha, visando especificar os disjuntores ideais;
- Fornece relatórios de dados completos como barras, circuitos, impedâncias mútuas, relatórios de resultados como níveis de curto-circuito e impedâncias equivalentes de Thévenin.
- Quando utilizado com o SAPRE, permite a visualização unifilar do sistema, facilitando a alteração de dados dos equipamentos através de um simples clique sobre o elemento, além de possibilitar a aplicação de defeito em um determinado ponto do sistema, com um simples clique e posterior escolha do tipo de curto-circuito.

Pelas características mostradas acima, o programa ANAFAS se mostra muito útil na utilização em estudos de curto-circuito e proteção de sistemas elétricos.

No estudo da proteção, é necessário que cálculos elaborados sejam feitos, partindo das correntes de curto até as parametrizações dos relés. Em um sistema radial, estes cálculos mesmos elaborados, são possíveis de serem feitos usando simplesmente uma calculadora. Contudo quando temos um sistema elétrico com centenas de barras, como o sistema elétrico brasileiro, é extremamente necessário o uso de programas de simulação e o ANAFAS se mostra intensamente capaz de suprir estas necessidades. Permite que seja calculada a corrente de curto-circuito (com carregamento anterior ou não) em vários casos, com uma precisão grande, diminuindo a probabilidade de erros.

Apesar de o ANAFAS ser um programa útil e de fácil utilização, ele não permite ainda que se faça uma coordenação da proteção com relés, pois não possui ainda uma base de dados com os relés atualmente no mercado. Esta característica, de poder se fazer uma coordenação da proteção, existe e é facilmente utilizada no Programa ASPEN OneLiner.

6.3 – Facilidades Disponíveis no Programa ASPEN OneLiner.

O programa ASPEN OneLiner foi desenvolvido assim como o Anafas para o auxílio no estudo da proteção de sistemas elétricos. Com a diferença de que ele possui uma base de dados de vários relés existentes hoje no mercado (inclusive com suas curvas de atuação) que permite que os mesmos sejam utilizados nas simulações.

Esta base de dados dos relé torna o programa mais fácil e completo de ser utilizado, pois elimina a necessidade da pesquisa dos relés em catálogos dos fabricantes. Nesta base de dados, estão disponíveis modelos de relés de sobrecorrente e de distância. Contudo as configurações de cada relé podem ser editadas pelo usuário ou até mesmo implementadas uma nova configuração. O programa permite que sejam alterados os ajustes dos relés e as configurações de rede e, imediatamente, o programa refaz todos os cálculos desejáveis.

O ASPEN OneLiner possui outras características como:

- Interface gráfica que facilita a manipulação dos dados, tornando o programa mais atrativo para o usuário. A situação operativa pode ser modificada simplesmente retirando ou colocando alguns elementos em operação, ou modificando o padrão de geração ou carga;
- Permite a modelagem de quase todos os elementos de rede como transformadores de 2 e 3 enrolamentos, transformadores defasadores, reatores, etc;
- A coordenação dos relés pode ser monitorada. A coordenação é feita de modo iterativo, ou seja, o ajuste é feito simulando falhas em vários pontos, de forma simultânea.
- Os resultados dos cálculos pós-efeito, amplitudes e ângulos de fase das correntes de curto-circuito e tensões nos barramentos são mostrados graficamente no diagrama. Os tempos de atuação dos relés também aparecem neste gráfico.
- Permite a troca de dados com outros programas. É possível a exportação e a importação de dados através de módulos de conversão com o ANAFAS, entre outros programas.
- Na avaliação de disjuntor o programa permite que os mesmos sejam analisados frente às correntes de curto-circuito que ele deve interromper.

A facilidade que o programa ASPEN OneLiner apresenta é inquestionável. Todos os elaborados cálculos de proteção de um sistema elétrico ficam mais fáceis e com uma precisão maior devido ao uso desta ferramenta. Estudos de desempenho de relés eletromecânicos, estáticos e digitais também são possíveis com o uso deste programa.

Em comparação com o programa ANAFAS, desenvolvido pelo CEPEL, o ASPEN OneLiner tem a vantagem de possibilitar que a coordenação dos relés e atuação dos disjuntores seja implementada no próprio programa. Caso tivéssemos que fazer o mesmo estudo com o auxílio do ANAFAS, poderíamos utilizá-lo apenas para calcular as condições de corrente e tensão durante um curto-circuito, para depois fazer todas as contas necessárias para o ajuste de proteção.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO

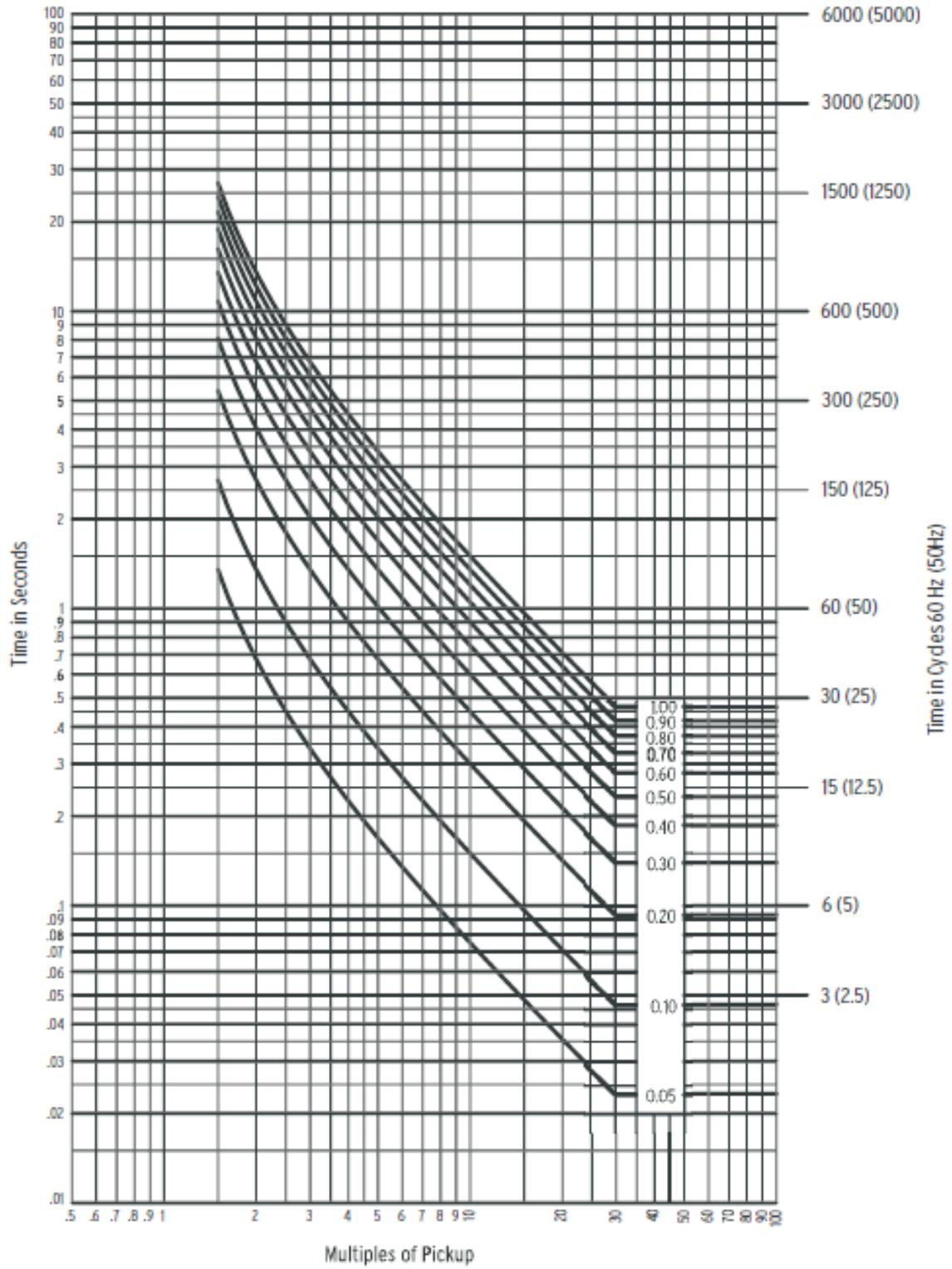
A importância dos relés de proteção em um sistema elétrico cada vez é mais evidente em razão do crescimento contínuo e aumento do número de interligações no sistema elétrico nacional. A filosofia de proteção continua sendo evitar que uma linha de transmissão seja desligada desnecessariamente.

As empresas estão investindo cada vez mais nos relés digitais, que são verdadeiros microcomputadores modernos com várias funções de proteção incluídas. Cada um destes relés é fabricado para a proteção de um determinado equipamento ou conjunto de equipamentos. Existem relés digitais exclusivos para a proteção de linha de transmissão, para transformadores e reatores, para banco de capacitores, para barramentos etc.

O uso da mala de teste tornou-se necessária para verificação de um determinado ajuste no relé, antes do mesmo entrar em operação e para verificação do estado do relé, depois de um certo tempo de vida útil. No presente trabalho, a utilização de caixa de teste permitiu mostrar que o relé SEL 421 testado está em boas condições, devido ao sucesso obtido nos testes realizado. A ferramenta Overcurrent utilizada demonstrou ser fácil e simples de ser utilizada, facilitando a elaboração do teste de sobrecorrente. Já a ferramenta Distância se mostrou mais difícil, devido a complexidade de serem montadas as zonas de atuação, o que causou um pouco de dificuldade no ensaio da função de distância.

Como sugestão fica a utilização das outras ferramentas para ensaio existente na mala de teste como QuickCMC, Ramping, State Sequencer e Differential nos outros relés de proteção da SEL existentes no Laboratório de Proteção da UFRJ.

ANEXO 1



Curva IEC Muito Inversa

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] STEVENSON, William D. JR; GRAINGER, J. J. **Power System Analysis**. McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, 1994.

[2] ANDERSON, Paul M, **Analysis of Faulted Power Systems**. Iowa State University Press, 1973.

[3] BLACKBURN, J. Lewis, **Protective Relaying**: Principles and Applications, Second Edition, 1997.

[4] ROBBA, Ernesto João et al. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência**: Componentes Simétricas, Edgard Blücher Ltda., 1996.

[5] KINDERMANN, Geraldo, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, 1. ed. Do Autor, 1999. 1v.

[6] KINDERMANN, Geraldo, **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**, 1 ed. Do Autor, 2006. 2v.

[7] NOTAS DE AULA DE ADESP (Análise de Defeitos em Sistemas de Potência), Professor Alessandro Manzoni

[8] OMICRON TEST UNIVERSE: Teoria e Prática; Apostila treinamento Light, Rio de Janeiro, 2007

[9] OMICRON TEST UNIVERSE, Catálogo Linha, CM.

[10] EQUIPAMENTOS PARA TESTES em Relés de Proteção e Calibração de Medidores. Disponível em: <http://www.adimarco.com.br/produtos-teste-secundario.php>. Acesso em: 03 de maio de 2009.

[11] SEL-421: Curso de relés de proteção; Universidade SEL, 1996

[12] ASPEN Advanced Systems for Power Engineering. Disponível em <http://www.aspeninc.com/>. Acesso em 14 de março de 2009.

[13] ANAFAS Análise de Faltas Simultâneas. Disponível em <http://www.anafas.cepel.br/>. Acesso em 14 de março de 2009.

[14] ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico, Disponível em: <http://www.ons.com.br>. Acesso em 09 de maio de 2009.