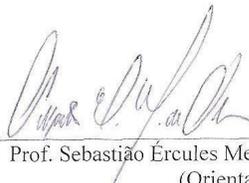


## AJUSTE E COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE

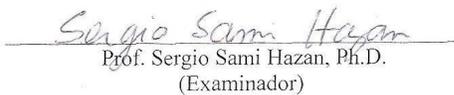
**André Luiz Vitorino Almeida**

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 A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

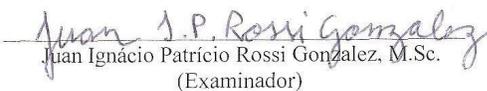
Aprovada por:



Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.  
(Orientador)



Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.  
(Examinador)



Juan Ignacio Patricio Rossi Gonzalez, M.Sc.  
(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
JANEIRO DE 2008

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço a meus pais, Luiz Fernando e Marli, que sempre me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

Agradeço minha irmã Anália e meu cunhado Alex, que sempre estiveram dispostos a ajudar.

Agradeço minha namorada Aline, que sempre se mostrou atenciosa e companheira.

Agradeço a meus amigos de faculdade, por estarem presentes nos melhores momentos da minha vida. Em especial a minha amiga Renata, que sempre esteve presente nas minhas vitórias e nos meus momentos de dificuldade, sempre dando muito apoio.

Agradeço aos professores pelo conhecimento transmitido e pelas experiências compartilhadas.

Por fim, agradeço a meu orientador Sebastião Oliveira pelo apoio e pelos conhecimentos transmitidos durante o projeto e durante as aulas.

## **RESUMO**

Os relés de sobrecorrente instantâneos e temporizados têm sido empregados para a tarefa de prover proteção contra curto-circuitos em sistemas de baixa, média tensão e backup de sistemas de alta tensão, em razão de sua simplicidade de atuação e de seus custos relativamente reduzidos. O presente trabalho apresenta informações gerais sobre as características dos curto-circuitos e dos sistemas de proteção de sobrecorrente, com ênfase na coordenação dos relés para operação apropriada.

# ÍNDICE

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Objetivo .....	2
1.2 - Visão Geral do Texto .....	3
<b>2 - A IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE CURTO CIRCUITO .....</b>	<b>4</b>
2.1 - Características Gerais dos Curto-Circuitos .....	4
2.1.1 - <i>Sistemas de aterramento</i> .....	7
2.1.2 - <i>As conseqüências dos curtos-circuitos</i> .....	9
2.2 - Análise das Componentes Transitórias e de Regime Permanente .....	10
2.3 - Componentes Simétricas.....	13
2.3.1 - <i>Impedâncias dos circuitos de seqüência</i> .....	15
2.4 - Matriz de Impedância de Barras (Zbarra) .....	16
2.4.1 - <i>Aplicação da matriz Zbarra nos estudos de curto-circuito</i> .....	18
2.5 - Curto-circuito Trifásico Simétrico.....	20
2.6 - Curto-circuitos Assimétricos.....	22
2.6.1 - <i>Curto-circuito fase-terra (Monofásico)</i> .....	23
2.6.2 - <i>Curto-circuito bifásico</i> .....	25
2.6.3 - <i>Curto-circuito bifásico-terra</i> .....	27
<b>3 - ASPECTOS GERAIS DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO.....</b>	<b>28</b>
3.1 - Introdução.....	28
3.2 - Funções básicas de um sistema de proteção.....	28
3.3 - Propriedade básica de um sistema de proteção.....	29
3.4 - Níveis de atuação de um sistema de proteção.....	29
3.5 - Relés Complementares.....	30
3.5.1 - <i>Relé de religamento – Função ANSI (79)</i> .....	30
3.5.2 - <i>Relé de sincronismo – Função ANSI (25)</i> .....	31
3.5.3 - <i>Relé de sobretensão – Função ANSI (59)</i> .....	31
3.5.4 - <i>Relé de subtensão – Função ANSI (27)</i> .....	31
3.5.5 - <i>Relé de Sobrecorrente com restrição de tensão – Função ANSI (51V)</i> .....	31
3.5.6 - <i>Relé de bloqueio – Função ANSI (86)</i> .....	32
<b>4 – UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE.....</b>	<b>33</b>

4.1 - Introdução .....	33
4.2 - Classificação dos Relés de Sobrecorrente.....	34
4.2.1 - Aspectos construtivos.....	34
4.2.1.1 - Relé eletro-mecânico.....	34
4.2.1.2 - Relé estático.....	34
4.2.1.3 - Relé digital.....	35
4.2.2 – Quanto à atuação do circuito a proteger.....	38
4.2.3 - Quanto a Instalação.....	39
4.2.4 - Corrente de ajuste.....	40
4.3 - Relé de sobrecorrente instantâneo.....	42
4.3.1 - Critério para corrente de ajuste do relé instantâneo.....	42
4.4 - Relé de sobrecorrente temporizado.....	43
4.4.1 - Relé de sobrecorrente temporizado de tempo definido.....	43
4.4.2 - Relé de sobrecorrente temporizado de tempo inverso.....	43
4.4.3 - Critério para corrente de Ajuste do relé temporizado de tempo inverso.....	45
4.5 - Relé de sobrecorrente temporizado com elemento instantâneo.....	46
4.6 - Relé de sobrecorrente de neutro.....	47
4.6.1 - Critério para corrente de ajuste do relé de neutro.....	48
4.7 - Relé de sobrecorrente direcional.....	49
4.7.1 - Polarização do relé direcional.....	50
4.7.2 – Proteção com relé de sobrecorrente direcional.....	50
4.8 - Coordenação de Relés de Sobrecorrente.....	51
4.8.1 - Tempo de coordenação.....	52
4.8.2 – Determinação da relação do TC.....	53
4.8.3- Regra para coordenação de relés de sobrecorrente (50/51).....	54
<b>5 – PROGRAMAS PARA CÁLCULO DE CURTO E SELEÇÃO DE RELÉS.....</b>	<b>57</b>
5.2 - Introdução.....	57
5.2 - Principais Características do Programa ASPEN (OneLiner).....	58
5.3 - Modelos e entrada de dados dos elementos do Aspen (OneLiner).....	60
<b>6 – EXEMPLO DE COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE.....</b>	<b>69</b>
6.1 - Considerações do sistema exemplo.....	69
6.2 - Ajuste dos relés de sobrecorrente (50/51).....	70
6.2.1 - Resultados obtidos na coordenação dos relés de sobrecorrente (50/51).....	77
6.3 - Ajuste dos relés de sobrecorrente de neutro (51N).....	81
6.3.1 - Resultados obtidos na coordenação dos relés de sobrecorrente de neutro (51N)..	85
<b>7– CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>90</b>



## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O crescimento de um país pode ser medido pela sua capacidade energética. Em se tratando de energia elétrica, precisamos gerar, transmitir e distribuir, tudo isso de forma eficiente e assim disponibilizar o alicerce para um desenvolvimento sólido.

Para que ocorra o transporte de energia, é necessário um sistema elétrico de potência cuja operação, planejamento e proteção demandam estudos nos quais se realiza a simulação do comportamento dos equipamentos existentes frente às tensões e correntes resultantes de condições normais e de perturbações. As perturbações mais comuns, e também as mais severas, são os curtos-circuitos que ocorrem no seguimento a rupturas da isolação entre fases ou entre fase e terra, normalmente ocasionadas por descargas atmosféricas, galhos de árvores, incêndios, acúmulo de resíduos/poluição e outros efeitos.

Para sistemas de pequeno porte o cálculo das correntes de curto-circuito pode ser feito de forma relativamente simples. Entretanto, para sistemas mais complexos (com diversas interligações) e de maior porte, faz-se uso de programas computacionais.

Com o desenvolvimento e a evolução dos computadores digitais, passou a ser viável a utilização dos programas computacionais para cálculo das correntes de curto-circuito e para apoio ao ajuste dos sistemas de proteção. Desde então a simulação computacional do desempenho dos sistemas de potência frente a curtos-circuitos tem sido uma prática comum.

A determinação das sobrecorrentes e sobretensões que se desenvolvem em um sistema de potência fornece subsídios de grande importância para:

- a proteção contra sobrecorrentes dos componentes do sistema como, por exemplo, transformadores e linhas;
- a especificação dos equipamentos de proteção, tais como disjuntores, relés, fusíveis;
- a proteção de pessoas, principalmente em defeitos que envolvem a terra;

- a determinação das sobretensões ao longo do sistema quando da ocorrência de curtos-circuitos, de importância principalmente no que se refere ao rompimento da isolação dos equipamentos.

Os resultados típicos obtidos pelos cálculo de curto-circuito são as amplitudes e ângulos de fase dos fasores representativos da componente fundamental das correntes e das tensões que se desenvolvem ao longo do sistema elétrico no instante imediatamente após um defeito, grandezas estas de grande valia para ajuste e coordenação da proteção dos sistemas de potência.

O objetivo dos estudos de proteção é o ajuste dos parâmetros dos relés de diversos tipos presentes no sistema para que estes eliminem, com rapidez e seletividade, os defeitos que venham a ocorrer. Portanto, devem ser desligados apenas os equipamentos estritamente necessários para extinção ou isolamento do defeito.

Uma vez selecionados os tipos de relés a serem utilizados e definidos seus ajustes, é comum a realização de simulações de um conjunto de defeitos em pontos específicos do sistema, a fim de testar a adequação dos relés e verificar se cada um deles atuará de maneira correta no tempo esperado e de maneira coordenada. Efetuar manualmente os cálculos referidos é bastante trabalhoso e resulta em grande propensão a erros, sendo desejável, portanto, a utilização de um programa computacional que auxilie nesta tarefa.

## **1.1 – Objetivos**

Um dos objetivos deste trabalho é mostrar as facilidades encontradas na utilização do programa ASPEN para estudos de curto-circuito e ajustes da coordenação de relés de sobrecorrente. O programa foi utilizado como meio de simulação das correntes de curto-circuito utilizadas no procedimento de ajuste destes relés.

Para ilustrar este procedimento de ajuste foi feita a implementação da curva de tempo inverso de um relé digital no programa ASPEN. Procedeu-se à coordenação dos relés de sobrecorrente de um sistema exemplo e determinou-se o tempo de atuação dos relés utilizando o mesmo programa. Algumas das facilidades que os relés de sobrecorrente

digitais podem trazer para a proteção do sistema elétrico são também apresentadas no trabalho.

## **1.2. Visão geral do texto**

Para o desenvolvimento do objetivo deste projeto dividimos o conteúdo em alguns capítulos, mostrando, abaixo, uma pequena introdução do que será apresentado nos capítulos seguintes.

Para uma compreensão e análise do problema de curto-circuito, o capítulo 2 traz informações sobre as características apresentadas pelas componentes de corrente durante os curto-circuitos, mostra métodos de desenvolvimento dos cálculos das correntes utilizando componentes simétricas a partir da utilização da matriz Zbarra e apresenta as redes de seqüência e suas conexões para estudos de curtos assimétricos, conforme apresentado em STEVENSON, 1994 [1].

Em seguida, no capítulo 3, é apresentada uma introdução sobre proteção de sistemas elétricos e suas funções e são indicadas algumas propriedades básicas.

Já no capítulo 4 são apresentadas informações sobre a operação dos relés de sobrecorrente e mostrados os tipos de relés e suas características. Também é feita referência aos relés digitais e indicados métodos de ajuste e coordenação de relés de sobrecorrente em um sistema de potência, conforme KINDERMANN, 1999 [2].

O capítulo 5 apresenta informações sobre o programa ASPEN, versão 2001, e descreve algumas de suas facilidades para estudos de curto-circuito e coordenação de relés.

No capítulo 6 são apresentados cálculos de ajuste dos relés de sobrecorrente de um pequeno sistema exemplo e os resultados das simulação realizadas no ASPEN – Oneliner, que é o módulo onde são realização os estudos de curto-circuito e coordenação de relés.

O capítulo 7 é dedicado às conclusões do trabalho.

## **CAPÍTULO 2 – A IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE CURTO CIRCUITO**

Um Sistema Elétrico de Potência está sujeito a contingências durante sua operação que causam distúrbios no seu funcionamento normal, sendo o curto-circuito uma das ocorrências mais comuns e que podem provocar danos aos equipamentos envolvidos.

Curto-circuito é o nome dado ao conjunto de fenômenos que ocorrem quando dois ou mais pontos que estão sob diferença de potencial em um circuito elétrico são ligados entre si, intencionalmente ou acidentalmente, através de uma impedância que pode ou não ser desprezível. Essa ligação pode ser metálica, quando se diz que há um curto-circuito franco, por um arco elétrico que é a situação mais comum, ou ainda através de um objeto como um galho de árvore. O arco elétrico pode resultar, por exemplo, da ionização do ar provocada por queimadas próximas às linhas de transmissão.

Os estudos de curto-circuito são de grande valia para o engenheiro de sistemas de potência, pois permitem gerar informações importantes para subsídio ao processo de seleção dos disjuntores e dos demais dispositivos de proteção, como os relés.

Para permitir os ajustes dos relés de sobrecorrente, o que vem a ser o propósito do presente projeto, necessitamos realizar cálculos de curto-circuito. Por esta razão, este capítulo tem como objetivo apresentar informações gerais sobre as características das correntes de curto-circuito e sobre o procedimento de cálculo destas correntes.

### **2.1 – Características Gerais do Curto-Circuito**

Os defeitos que ocorrem ao longo dos circuitos de transmissão e/ou nas estações geradoras e de manobra de um sistema elétrico de potência podem ser classificadas como transitórias, semi-transitórias ou permanentes.

Os defeitos transitórias podem ser extintos rapidamente, bastando isolar o trecho com defeito por alguns milissegundos e religá-lo. Um exemplo de ocorrência transitória seria uma descarga atmosférica incidindo sobre um dos condutores de fase de uma linha de transmissão, o que, normalmente, provoca a formação de um arco elétrico entre duas fases ou entre a fase e a torre.

Os defeitos semi-transitórios podem ser extintos desligando e religando o circuito envolvido por mais de uma vez. Este tipo de procedimento ocorre normalmente na proteção de sistemas de distribuição em nível de tensão relativamente reduzida, o que não resulta, em geral, em danos para a característica global de estabilidade do sistema elétrico interligado. Este tipo de defeito ocorre, por exemplo, quando um galho de árvore toca duas fases, provocando um curto-circuito fase-fase.

Os defeitos permanentes são aquelas em que não se consegue restabelecer a operação normal do circuito defeituoso apenas desligando-o. Exemplos disto são a ruptura de isolamento de cabos elétricos subterrâneos e o rompimento de cabo condutor de linha aérea.

Para um sistema elétrico trifásico, podem ocorrer os quatro seguintes tipos de defeitos:

- Trifásico
- Bifásico
- Bifásico para terra
- Monofásico ou fase terra

Dados estatísticos mostram que a ocorrência dos tipos de defeito acima referidos nos sistemas de potência se dá, na média, conforme a seguinte probabilidade relativa [10]:

Tabela 2.1.1 – Probabilidade relativa de ocorrência dos curto-circuitos

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

Dependendo do tipo de defeito e do instante de ocorrência do defeito, a intensidade da corrente de curto-circuito pode atingir amplitudes da ordem de 20 vezes ou mais o valor da corrente nominal logo nos primeiros instantes do defeito. Logo depois começa a

decair exponencialmente, passando pelos períodos de regime subtransitório e de regime transitório para, finalmente, depois de algumas dezenas de ciclos, alcançar seu estado final de regime permanente.

Depois que a corrente de defeito atinge sua amplitude final de regime permanente, os efeitos térmicos começam a ser relevantes. Todas as partes condutoras dos equipamentos passam a ter sua temperatura aumentada, podendo o isolamento sofrer alterações rápidas em sua estrutura molecular e resultar na deterioração de sua isolação, conforme o caso. No caso dos curto-circuitos através de arcos elétricos, podem ocorrer ainda explosões e incêndios. Os possíveis danos associados aos efeitos térmicos que resultam das correntes elevadas de curto-circuito no sistema são diretamente proporcionais ao quadrado das correntes de curto-circuito e ao tempo de exposição ao defeito.

Em caso de ocorrência de curto-circuitos em sistemas elétricos onde existem cargas do tipo motor síncrono ou motor de indução de grande porte, estes passam, da mesma forma que as outras fontes de tensão trifásicas, a contribuir para o aumento das correntes de defeito. Por outro lado, os demais equipamentos presentes no sistema de potência, como transformadores, condutores, reatores série, age de forma passiva por não conterem fontes de tensão interna e contribuem, com suas reatâncias série, para reduzir as amplitudes das correntes de defeito.

É importante ressaltar que para a determinação das amplitudes das correntes de curto-circuito, é imprescindível o levantamento da estrutura das redes de seqüência e o conhecimento das impedâncias de seqüência dos equipamentos envolvidos. Dentre os curto-circuitos citados acima, apenas o trifásico é equilibrado (simétrico), ou seja, envolve apenas a operação da rede de seqüência positiva. Em contrapartida, a determinação das correntes de curto monofásico e bifásico com ou sem a terra (assimétrico) envolve também o efeito de limitação de corrente associado às redes de seqüências negativa e zero.

A intensidade das correntes de curto-circuito além de depender do tipo de curto ocorrido, depende também da capacidade do sistema de geração, da topologia da rede elétrica, do tipo da rede elétrica, do tipo e localização de aterramento dos neutros dos equipamentos e do ponto de localização do defeito.

### 2.1.1 – Sistemas de aterramento

O sistema de aterramento afeta significativamente tanto a magnitude como o ângulo da corrente de curto-circuito à terra. Existem três tipos de aterramento:

- Sistema não aterrado (neutro isolado)
- Sistema aterrado por impedância
- Sistema efetivamente aterrado

No sistema não aterrado existe um acoplamento à terra através da capacitância shunt natural. Num sistema simétrico, onde as capacitâncias entre as fases e a terra são iguais, o neutro ( $n$ ) fica no plano terra ( $g$ ), e se a fase  $a$ , por exemplo, for solidamente aterrada, o triângulo de tensão se deslocará conforme mostrado na [figura 2.1.1.1](#).

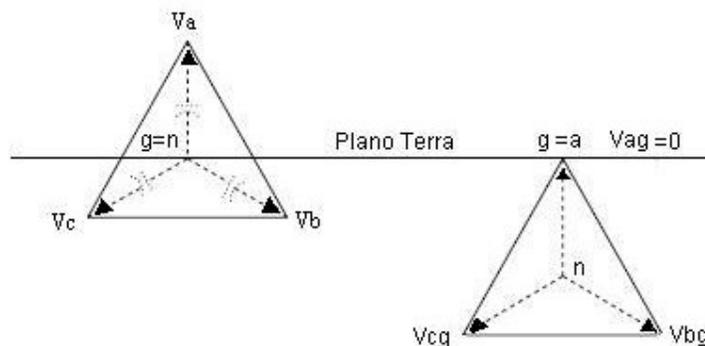


Figura 2.1.1.1 – Sistema simétrico com 3 capacitâncias a terra iguais.

A [figura 2.1.1.2](#) ilustra um curto-circuito sólido entre a fase  $a$  e terra num sistema não aterrado.

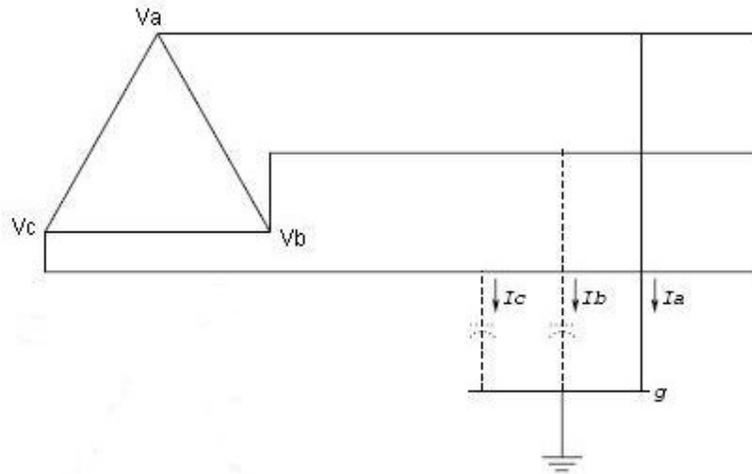


Figura 2.1.1.2 – Curto circuito sólido entre a fase a e a terra

Num sistema efetivamente aterrado, um curto-circuito sólido entre a fase *a* e terra resulta nas condições indicadas na [figura 2.1.1.3](#).

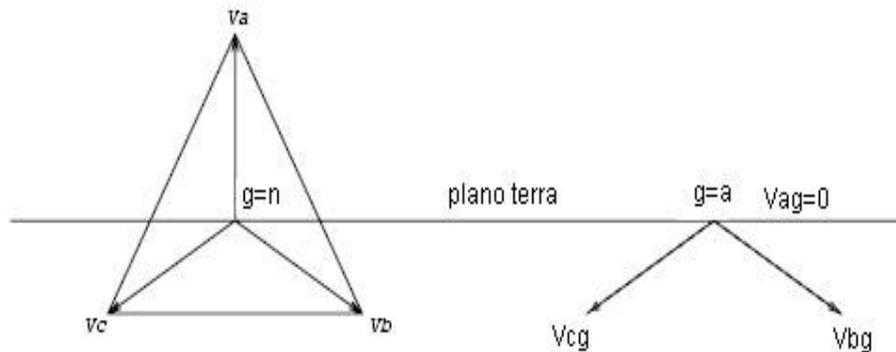


Figura 2.1.1.3 – Sistema efetivamente aterrado

Observando-se os dois casos, conclui-se que as amplitudes das tensões nas fases são, quando da ocorrência de um curto-circuito monofásico, dependentes do sistema de aterramento.

Podemos indicar as seguintes vantagens e desvantagens do sistema não aterrado:

- A corrente de curto-circuito para a terra é desprezível e se auto-extingue na maioria dos casos, sem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica;
- É extremamente difícil detectar a ocorrência de um defeito fase-terra;
- As sobretensões sustentadas são elevadas, o que impõe o uso de pára-raios ajustados para a tensão fase-fase.
- O ajuste dos relés de terra e a obtenção de uma boa seletividade são tarefas bastante difíceis

Vantagens e desvantagens do sistema efetivamente aterrado:

- A corrente de curto-circuito para terra é elevada e o desligamento do circuito afetado é sempre necessário. Através do sistema de aterramento por impedâncias, pode-se exercer controle adicional sobre as amplitudes da corrente de retorno pela terra e a corrente de curto-circuito monofásico.
- Consegue-se obter excelente sensibilidade e seletividade nos relés de terra.
- As sobretensões sustentadas são reduzidas, o que permite o uso de pára-raios ajustados para tensão menor.

### **2.1.2 - As conseqüências dos curtos-circuitos**

Quando ocorre um curto-circuito, as forças eletromotrizes das fontes de tensão do sistema (geradores) são curto-circuitadas através de impedâncias relativamente baixas (impedâncias de gerador, transformador e trecho da linha, por exemplo), o que pode resultar em correntes de curto-circuito de amplitudes extremamente elevadas. Esta elevação abrupta das correntes, acompanhada de quedas consideráveis nas tensões, traz conseqüências extremamente danosas ao sistema de potência. Seguem abaixo algumas delas.

As correntes de curto-circuito, de acordo com a lei de Joule, provoca dissipações de potência nas partes resistivas dos circuitos. No ponto de defeito, o aquecimento associado e a formação de arco podem provocar danos e destruição nos equipamentos e

objetos vizinhos que pode ser de grande monta, dependendo da amplitude da corrente de curto e o tempo de exposição ao mesmo. Portanto, para uma dada corrente de curto-circuito, o tempo  $t$  de defeito deve ser o menor possível para reduzir, ao mínimo, os danos observados.

Outro fato relevante é a queda de tensão no momento de um curto-circuito e que pode resultar, se mantida por longo período de tempo, em graves transtornos aos consumidores. O conjugado desenvolvido pelos motores elétricos, por exemplo, sendo proporcional ao quadrado da tensão pode, portanto, no momento de um curto-circuito, ser seriamente comprometido. Cargas como sistemas de iluminação, sistemas computacionais e sistemas de controle em geral são particularmente sensíveis às quedas de tensão.

Outra grave consequência de uma queda abrupta da tensão no sistema de potência é a perturbação que ela pode provocar na estabilidade da operação paralela dos geradores síncronos. Isto pode resultar na desagregação da operação do sistema e na interrupção no fornecimento de potência aos consumidores.

É importante comentar ainda que a mudança rápida na configuração do sistema elétrico, provocada pelo desequilíbrio entre a geração e a carga após a retirada do circuito sob falta, pode resultar, adicionalmente, em sub ou sobretensões, sub ou sobrefrequências, ou ainda em sobrecargas em alguns circuitos de transmissão.

## **2.2 – Análise das Componentes Transitórias e de Regime Permanente**

As correntes de curto-circuito podem ser consideradas como constituídas por uma componente periódica (componente CA) e uma componente aperiódica (componente CC), esta última decaindo exponencialmente e rapidamente com o tempo em função da relação resistência / indutância da malha de defeito.

A componente de regime permanente da corrente de curto-circuito, por sua vez, é a própria componente periódica acima referida, algum tempo depois da ocorrência do curto-circuito, quando suas parcelas transitória e subtransitória já se extinguiram.

Representando-se a rede por um circuito RL série, excitado por um gerador ideal de tensão senoidal, podemos entender melhor a origem das componentes aperiódica e de regime permanente das correntes de curto circuito. A Figura 2.2.1 mostra esta representação.

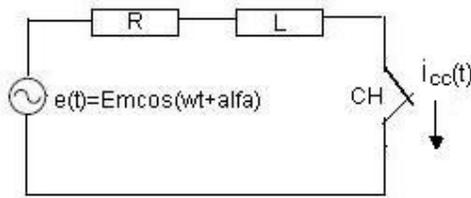


Figura 2.2.1 – Circuito exemplo RL

Aplicando-se a segunda lei de Kirchoff ao circuito da [Figura 2.2.1](#), tem-se:

$$e(t) = R i_{cc}(t) + L \frac{di_{cc}(t)}{dt} \quad (2.2.1)$$

Resolvendo a equação diferencial, chegamos à equação (2.2.2):

$$i_{cc}(t) = \frac{V_{max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[ \text{sen}(\omega t + \text{alfa} - \theta) - e^{-\frac{t}{L}} \text{sen}(\text{alfa} - \theta) \right] \quad (2.2.2)$$

A primeira parcela da equação (2.2.2) representa a componente CA, que possui a frequência da rede. A segunda parcela é a componente CC, responsável pela assimetria que as correntes de curto podem apresentar, sendo a constante de tempo função da relação X/R da rede.

A assimetria que as correntes de curto podem apresentar depende do valor da tensão no instante de aplicação do defeito. Por exemplo, se essa tensão for nula, a assimetria será máxima e vice-versa. Considerando-se  $I_{cc_0}$  como sendo o valor inicial da componente CC da corrente de curto, tem-se que:

Se  $(\text{alfa} - \theta) = 0$  ou  $(\text{alfa} - \theta) = \pi$ ; então  $I_{cc_0} = 0$

Enquanto que, se  $(\alpha - \theta) = \pm \pi/2$ ; então  $I_{cc_0}$  é o valor máximo da componente CC.

A **Figura 2.2.2** mostra os primeiros ciclos de uma corrente típica de curto-circuito.

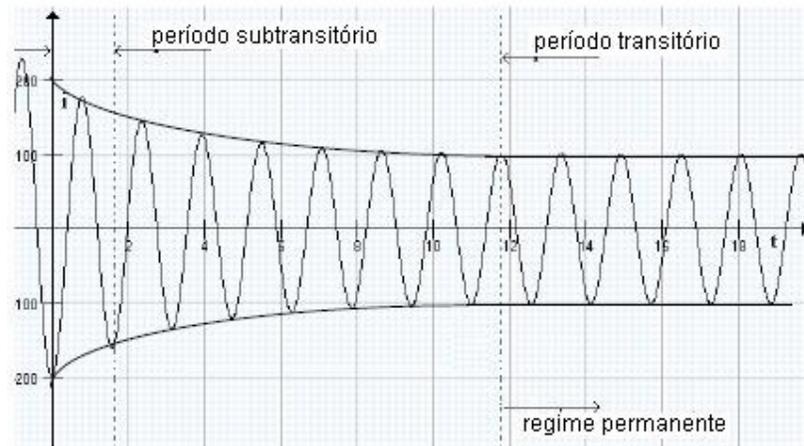


Figura 2.2.2 – Curva Típica de Curto Circuito

A forma de onda da corrente de curto-circuito em função do tempo pode ser alcançada diretamente através da utilização de programas convencionais de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

Contudo, não sendo viável executar tal procedimento, a relação X/R pode ser aferida pela redução da rede de impedâncias a 60 Hz por meio de programas convencionais de cálculo de curto-circuito, ou, então, através do emprego de valores típicos sugeridos.

Na Figura 2.2.3 é possível se observar a influência da relação X/R do sistema na composição da corrente de curto-circuito ao longo do tempo. Nota-se que a relação X/R pode influenciar diretamente na capacidade de interrupção de curto-circuito de um disjuntor, pois quanto maior for essa relação, mais lento é o decaimento da componente unidirecional da corrente e, portanto, maior sua amplitude no instante em que se comande a abertura do disjuntor.

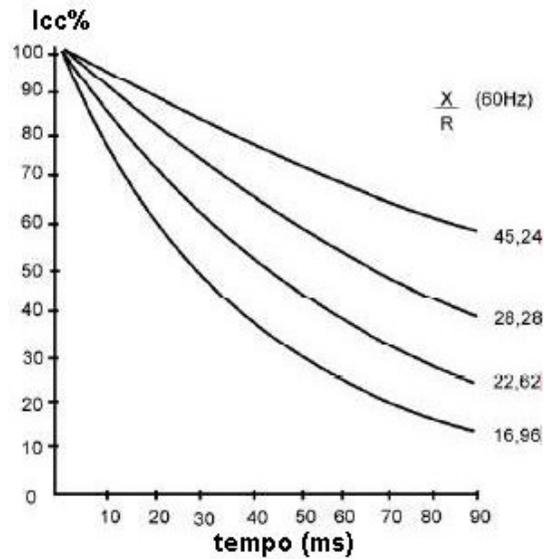


Figura 2.2.3 – Curva de decaimento exponencial da componente contínua (CC) da corrente de curto-circuito assimétrica em função do tempo, a partir do início do defeito

### 2.3 – Componentes Simétricas

Em 1918, o Dr. C. L. Fortescue introduziu uma das mais poderosas ferramentas para análise de circuitos polifásicos desequilibrados. Partindo da investigação matemática da operação do motor de indução em condições de desequilíbrio da tensão aplicada, foi conduzido ao desenvolvimento de princípios gerais, para os quais a solução de sistemas polifásicos desequilibrados pode ser reduzida à solução de dois ou mais casos equilibrados.

Desta maneira, de acordo com o teorema de Fortescue, três fasores desequilibrados associados a um sistema trifásico podem ser substituídos por três sistemas equilibrados de fasores. Estes sistemas de fasores ou conjuntos equilibrados de fasores são usualmente conhecidos como componentes de seqüência positiva (representada por 1 ou +), seqüência negativa (representada por 2 ou -) e seqüência zero (representada por 0).

Os componentes de seqüência positiva consistem de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo a mesma seqüência de fases que os fasores originais.

Já os componentes de seqüência negativa, consistem de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo a seqüência de fases oposta à dos fasores originais.

Os componentes de seqüência zero também consistem de três fasores iguais em módulo, porém com defasagem zero entre si.

Estes três conjuntos de fasores equilibrados que constituem os componentes simétricos de três fasores desequilibrados estão representados na Figura 2.3.1.

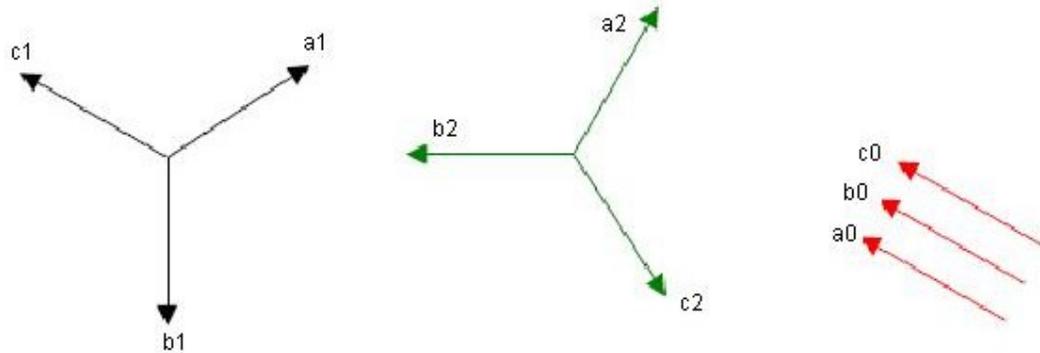


Figura 2.3.1 – Fasores das componentes de seqüência.

A equação (2.3.1) mostra como cada um dos fasores do conjunto original desequilibrado é expresso como uma soma fasorial de seus componentes de seqüência positiva, negativa e zero.

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.3.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

Utilizando-se a forma matricial para representação de (2.3.1), resultam as duas expressões (2.3.2) e (2.3.3), a primeira associada à decomposição das grandezas de fase em suas componentes de seqüência e a última para determinação das componentes de seqüência.

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} \quad (2.3.2)$$

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = 1/3 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (2.3.3)$$

Onde  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

### 2.3.1 – Impedâncias de Seqüência

A determinação das impedâncias de seqüência de um sistema de potência visa permitir a montagem dos circuitos de seqüência.

O circuito equivalente em uma determinada seqüência é o equivalente monofásico composto pelas impedâncias desta mesma seqüência, como visto pelas componentes de seqüência das correntes de curto. O circuito equivalente em uma dada seqüência mostra todos os caminhos para a circulação das componentes de corrente naquela seqüência de fases. Apenas os circuitos de seqüência positiva incluem as forças eletromotrizes produzidas pelos geradores síncronos ou fontes equivalentes, já que são nulas suas componentes de seqüência negativa e zero.

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 circuito equilibrado vista por corrente de uma determinada seqüência poder ser diferente da impedância vista por outra componente de seqüência.

As impedâncias de seqüência positiva e negativa dos circuitos de transmissão simétricos e estáticos são idênticas, já que as impedâncias de tais circuitos são independentes da ordem das fases para tensões aplicadas equilibradas. Em contrapartida, a impedância de seqüência zero de uma linha de transmissão difere sensivelmente de suas impedâncias de seqüências positiva e negativa.

Em uma linha de transmissão trifásica, equilibrada, quando circulam correntes de seqüência zero em suas fases, elas terão as mesmas amplitudes e os mesmos ângulos de

fase, com o retorno das correntes ocorrendo, naturalmente, pela terra, por cabos aéreos aterrados, ou por ambos.

O comportamento do campo magnético produzido pelas correntes de seqüência zero em torno de um circuito trifásico de transmissão é muito diferente do que ocorre quando correntes de seqüência positiva ou de seqüência negativa são consideradas, dado ao fato da circulação de correntes senoidais iguais em cada fase, a cada instante. Isto resulta em reatâncias de seqüência zero de uma linha de transmissão da ordem de 2 a 3 vezes maior do que a reatância de seqüência positiva. Esta relação tende a aumentar para linhas de transmissão de circuito duplo e para linha sem pára-raios.

As três impedâncias de seqüência das máquinas síncronas são normalmente diferentes, quer se considere o projeto de rotor de pólos lisos ou o de rotor de pólos salientes.

Nos transformadores trifásicos, embora a impedância série de seqüência zero possa apresentar valor diferente daquele associado às impedâncias de seqüências positiva e negativa, por razões de simplificação as impedâncias série de todas as seqüências são consideradas iguais, independentemente do tipo de núcleo do transformador utilizado. Como forma de simplificar ainda mais os cálculos, a admitância em paralelo que corresponde à corrente de excitação é desprezada para todos os tipos de transformador trifásico.

Para cargas com estrutura equilibrada e ligada em Y (estrela), as impedâncias são supostas iguais nas três seqüências zero, positiva e negativa e para cargas ligadas em  $\Delta$  (delta), as impedâncias de seqüência zero são supostas infinitas.

## **2.4 – Matriz de Impedância de Barras ( $Z_{barra}$ )**

A matriz  $Z_{barra}$  tem como principal objetivo representar a rede elétrica de corrente alternada em regime permanente senoidal para fins computacionais.

Os cálculos de curto-circuito são normalmente realizados com o objetivo de determinar as amplitudes das correntes de fase através de cada um dos circuitos e para definição do perfil de tensão nos barramentos e ao longo dos circuitos de transmissão. Isto é feito,

normalmente, para um determinado conjunto de localização e tipo de defeito, explorando, ainda, alterações na configuração do sistema.

Com o desenvolvimento de um método rápido de montagem da matriz impedância de barras ( $Z_{barra}$ ), eliminou-se a maior carga computacional associada aos métodos iterativos. Desta forma, a metodologia mais conveniente para solução do problema de cálculo das correntes e tensões durante os curto-circuitos em sistemas de potência de grande porte passou a ser a aplicação da matriz  $Z_{barra}$ .

Uma forma de obtenção da matriz  $Z_{barra}$  é a simples inversão da matriz admitância de barras  $Y_{barra}$ , o que pode ser feito facilmente por um algoritmo de inversão de matrizes esparsas.

A matriz  $Z_{barra}$  contém as impedâncias de barra como vistas de cada ponto do sistema, isto em relação a uma barra de referência escolhida arbitrariamente. As impedância referidas são as impedâncias equivalentes entre cada barra do sistema e a barra de referência. A matriz  $Z_{barra}$  contém ainda a informação sobre as impedâncias de transferência entre duas barras quaisquer do sistema de potência.

Os elementos da diagonal principal representam as impedâncias de Thévenin ( $Z_{TH}$ ) vistas de cada uma das barras, os demais elementos indicando as impedâncias de transferência entre duas quaisquer barras do sistema.

Outras características importantes da matriz  $Z_{barra}$  é ser simétrica, complexa, quadrada, de dimensão  $n$  ( $n$  é o número de barras do sistema sem contar a barra de referência) e cheia.

### 2.4.1 – Aplicação da matriz $Z_{barra}$ para Curto-circuito

A matriz  $Z_{barra}$  relaciona tensões nodais (das barras) com as injeções de correntes dos geradores, cargas, etc., conforme mostra a equação (2.4.1.1).

$$\dot{V}_n = Z_{barra} \dot{I}_n \quad (2.4.1.1)$$

Onde:

$\dot{V}_n$  é o vetor das tensões nas “n” barras;

$\dot{I}_n$  é o vetor de injeção de corrente.

Durante um curto-circuito em um ponto  $P$  qualquer do sistema, as tensões no sistema podem ser calculadas pela equação (2.4.1.2):

$$\begin{aligned} \dot{V}_f &= Z_{barra} (\dot{I}_{cg} - \dot{I}_{cc}) \\ \dot{V}_f &= Z_{barra} \dot{I}_{cg} - Z_{barra} \dot{I}_{cc} \\ \dot{V}_f &= \dot{V}_{pf} - Z_{barra} \dot{I}_{cc} \end{aligned} \quad (2.4.1.2),$$

onde:

$\dot{V}_f$  é o vetor de tensão das barras.

$\dot{I}_{cg}$  é o vetor de corrente de carga.

$\dot{I}_{cc}$  é o vetor de injeção de corrente nas barras. Todos os elementos são nulos. Só na barra  $p$  aparece o valor da corrente de curto.

$\dot{V}_{pf}$  é o vetor de tensão pré-falta.

Quando uma barra  $p$  é curto circuitada, é válida a equação (2.4.1.3) a seguir:

$$0 = V_{pf}(p) - Z_{pp} I_{cc}(p) \quad (2.4.1.3),$$

onde:

$V_{pf}(p)$  é a tensão pré falta na barra  $p$  (normalmente  $1.0 pu$  para um sistema sem carregamento pré-falta);

$Z_{pp}$  é a impedância vista da barra de defeito (impedância de Thévenin);

$I_{CC}(p)$  é a corrente de curto-circuito na barra sob defeito.

Logo, podemos escrever:

$$I_{CC}(p) = \frac{V_{pf}(p)}{Z_{pp}} \quad (2.4.1.4).$$

Quanto à tensão  $V_f(i)$  em uma das demais barras do sistema, podemos escrever:

$$V_f(i) = V_{PF}(i) - Z_{ip}I_{CC}(p) \quad (2.4.1.5),$$

$V_f(i)$  é a tensão de defeito na  $i$ -ésima barra do sistema;

$V_{pf}(i)$  é a tensão pré falta na barra  $i$ ;

$Z_{ip}$  é a impedância de transferência entre a  $p$ -ésima barra (barra de defeito) e a  $i$ -ésima barra do sistema ( elemento da matriz  $Z_{barra}$  ).

Quanto às contribuições dos circuitos para a corrente de defeito, podemos escrever:

$$I_{CC}(ij) = -I_{CC}(p) \cdot (Z_{ip} - Z_{jp}) / Z_{ij} \quad (2.4.1.6)$$

$I_{CC}(ij)$  é a corrente de contribuição em um determinado ramo do sistema;

$I_{CC}(p)$  é a corrente de curto na barra de defeito ( $p$ -ésima barra);

$Z_{ip}, Z_{jp}$  são as impedâncias de transferência entre cada uma das barras  $i$  e  $j$  e o ponto de defeito  $p$  ( elementos da matriz  $Z_{barra}$  );

$Z_{ij}$  é a impedância do elemento de  $Z_{barra}$  entre as duas barras  $i$  e  $j$ .

Esta aplicação da matriz  $Z_{barra}$  em seqüência positiva pode ser estendida às matrizes  $Z_{barra}$  de seqüências negativa e zero. Com a utilização das matrizes de seqüência e a fixação de interligações adequadas entre os circuitos de seqüência, podem ser calculadas todas as contribuições para a corrente de defeito e o perfil de tensões ao longo do sistema durante os curtos assimétricos fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Isto é visto mais adiante.

## 2.5 – Curto-circuito Simétrico

Nos sistemas trifásicos equilibrados não há componentes de seqüência zero e seqüência negativa nas tensões e correntes pré ou pós-falta. Desta forma, as tensões que se desenvolvem ao longo do sistema elétrico são apenas de seqüência positiva, visto que os geradores são projetados para fornecer tensões trifásicas equilibradas. Desta forma, o circuito equivalente de seqüência positiva associado a cada um dos geradores síncronos ou fonte equivalente é composto por uma força eletromotriz em série com a impedância de seqüência positiva do elemento referido. Os circuitos de seqüências negativa e zero para modelagem dos geradores síncronos e todos os três circuitos de seqüência para modelagem de todos os outros equipamentos passivos são representados apenas por suas impedâncias nas mesmas seqüências.

### *Curto-circuito Trifásico*

Para ilustrar o cálculo de curto-circuito trifásico e dos outros tipos de curto, apresentaremos o exemplo da **Figura 2.5.1**, onde temos representado um Sistema A interligado ao Sistema B.

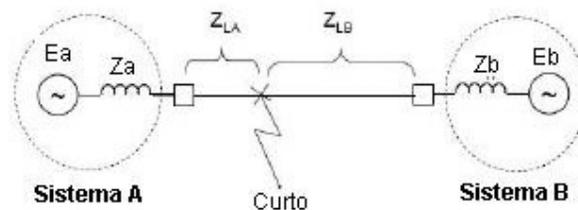


Figura 2.5.1– Exemplo de dois sistemas interligados por uma linha de interligação. Representação de seqüência positiva

No caso do defeito trifásico, como visto anteriormente, o único circuito de seqüência excitado é o de seqüência positiva. Sua representação equivalente, incluindo o efeito das fontes de tensão, é apresentada na **Figura 2.5.2.**,

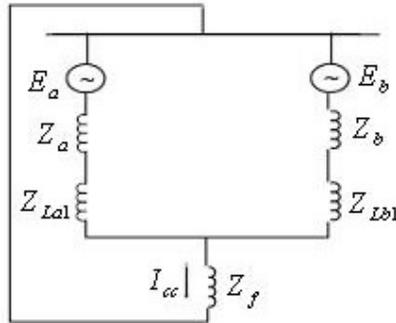


Figura 2.5.2. – Circuito equivalente de seqüência positiva

onde:

$Z_a$  - impedância equivalente de seqüência positiva do sistema A;

$Z_{La1}$  - impedância da linha entre o sistema A e o ponto de falta,

$E_a$  - tensão de seqüência positiva do sistema A;

$Z_b$  - impedância equivalente de seqüência positiva do sistema B;

$Z_{Lb1}$  - impedância da linha entre o sistema B e o ponto de falta,

$E_b$  - tensão de seqüência positiva do sistema B;

$Z_f$  - impedância de defeito.

Pelo Teorema de Thévenin, a corrente de curto-circuito em determinado ponto do sistema é dada por (2.5.1):

$$I_{CC} = V_{TH} / (Z_{TH} + Z_f) \quad (2.5.1)$$

Calculando o equivalente de Thévenin no ponto de defeito, tem-se que em (2.5.2):

$$Z_{TH} = ((Z_a + Z_{La1}) \cdot (Z_b + Z_{Lb1})) / (Z_a + Z_b + Z_L) \quad (2.5.2),$$

onde  $Z_L$  representa a impedância total da linha. A impedância de Thévenin pode também ser extraída da matriz  $Z_{barra}$  do sistema, como já indicado anteriormente neste capítulo. Ainda, se as fontes de tensão A e B são consideradas iguais e em fase, podemos escrever  $E_{TH} = E_a = E_b = E$  e, portanto, a corrente de curto pode ser determinada por:

$$I_{CC} = E / (Z_{TH} + Z_f) \quad (2.5.3),$$

onde,

$E = V_{TH}$  - tensão equivalente no ponto de defeito (tensão pré falta);

$I_{CC}$  - corrente no ponto de defeito.

O circuito equivalente de Thevenin para curto trifásico pode ser representado conforme mostra a **Figura 2.5.3**:

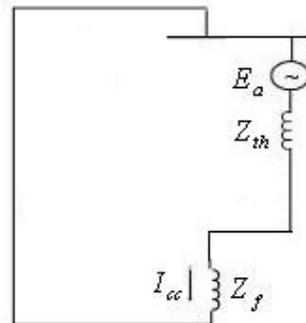


Figura 2.5.3 - Circuito equivalente de Thevenin para curto trifásico

## 2.6 – Curto-circuito Assimétrico

Os defeitos assimétricos ocorrem entre duas fases, entre uma fase e terra ou entre duas fases e terra. Tornou-se comum ainda, distinguir os tipos de defeito como defeito em derivação (shunt) ou defeito série. Os defeitos em derivação são os curto-circuitos tradicionais que envolvem o contato entre uma ou mais fases e o neutro ou mesmo entre as duas ou três fases. Os defeitos série envolvem a alteração nas impedâncias série dos elementos trifásicos, a princípio balanceadas. Como exemplo de defeito série podemos citar a operação sob abertura monopolar e a ruptura súbita de um ou dois cabos de fase.

Como qualquer curto-circuito assimétrico provoca a circulação de correntes desequilibradas no sistema, o método de cálculo de curto-circuito consiste em determinar as componentes simétricas das correntes neste instante. Em seguida, as tensões e correntes de fase são determinadas com o apoio da expressão (2.3.2) para as tensões e expressão similar para as correntes.

Circuitos de seqüência conduzindo as componentes de corrente  $I_{a0}, I_{a1}, I_{a2}$  são interligados com o intuito de representar as diversas condições de defeitos desequilibrados (assimétricos).

A utilização do método dos componentes simétricos é muito eficaz numa análise que vise calcular as correntes e as tensões em todas as partes do sistema após a ocorrência do curto e conduz a previsões bastante apuradas sobre o comportamento do mesmo.

A partir da utilização dos componentes simétricos, descrevemos abaixo a metodologia de cálculo de curto-circuito para os principais tipos de defeito em derivação assimétricos, como proposto em STEVENSON 1994 [1].

### 2.6.1 – Curto-circuito fase-terra (Monofásico)

Para defeito fase-terra, precisamos dos circuitos equivalentes de seqüência positiva, negativa e zero. Estes circuitos são ligados em série no ponto de defeito. A [Figura 2.6.1.1](#) mostra o diagrama para o exemplo dado na [Figura 2.5.1.1](#).

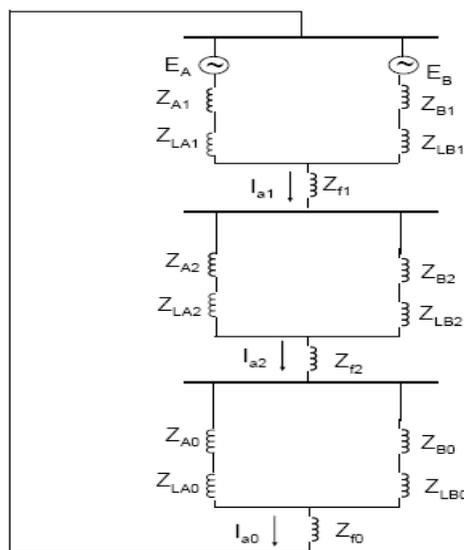


Figura 2.6.1.1 – Diagrama do sistema para curto monofásico

onde

$Z_{A1}$  é a impedância de seqüência positiva equivalente do sistema  $A$ ;

$Z_{LA1}$  é a impedância de seqüência positiva da linha entre o sistema  $A$  e o ponto de defeito;

$Z_{B1}$  é a impedância de seqüência positiva equivalente do sistema  $B$ ;

$Z_{LB1}$  é a impedância de seqüência positiva da linha entre o sistema  $B$  e o ponto de defeito;

$Z_{f1}$  é a impedância de defeito de seqüência positiva;

$Z_{A2}$  é a impedância de seqüência negativa equivalente do sistema  $A$ ;

$Z_{LA2}$  é a impedância de seqüência negativa da linha entre o sistema  $A$  e o ponto de defeito;

$Z_{B2}$  é a impedância de seqüência negativa equivalente do sistema  $B$ ;

$Z_{LB2}$  é a impedância de seqüência negativa da linha entre o sistema  $B$  e o ponto de defeito;

$Z_{f2}$  é a impedância de defeito de seqüência positiva;

$Z_{A0}$  é a impedância de seqüência zero equivalente do sistema  $A$ ;

$Z_{LA0}$  é a impedância de seqüência zero da linha entre o sistema  $A$  e o ponto de defeito;

$Z_{B0}$  é a impedância de seqüência zero equivalente do sistema  $B$ ;

$Z_{LB0}$  é a impedância de seqüência zero da linha entre o sistema  $B$  e o ponto de defeito;

$Z_{f0}$  é a impedância de defeito de seqüência zero;

Levando-se em conta que:

$$Z_{TH1} = ((Z_{A1} + Z_{LA1}) \cdot (Z_{B1} + Z_{LB1})) / (Z_{A1} + Z_{B1} + Z_{L1}) \quad (2.6.1.1),$$

$$Z_{TH2} = ((Z_{A2} + Z_{LA2}) \cdot (Z_{B2} + Z_{LB2})) / (Z_{A2} + Z_{B2} + Z_{L2}) \quad (2.6.1.2),$$

$$\text{e } Z_{TH0} = ((Z_{A0} + Z_{LA0}) \cdot (Z_{B0} + Z_{LB0})) / (Z_{A0} + Z_{B0} + Z_{L0}) \quad (2.6.1.3),$$

e ainda que  $Z_{f1} = Z_{f2} = 0$  e  $Z_{f0} = 3Z_f$  (2.6.1.4),

pela [Figura 2.6.1.2](#) chegamos então as seguintes equações para as componentes de seqüência das correntes de defeito e para a corrente de defeito na fase a:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E}{(Z_{TH1} + Z_{TH2} + Z_{TH0} + 3Z_f)} \quad (2.6.1.5)$$

$$I_{CURTO} = I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3 \cdot I_{a1} \quad (2.6.1.6)$$

Como o curto é da fase *a* para terra, tem-se, ainda:

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.6.1.7)$$

Outra forma de montar o circuito equivalente é lançar mão das impedâncias de seqüência vistas do ponto de defeito  $Z_{TH0}, Z_{TH1}, Z_{TH2}$  diretamente nas matrizes  $Z_{barra}$  de seqüências zero, positiva e negativa e montar o equivalente mostrado na [Figura 2.6.1.2](#).

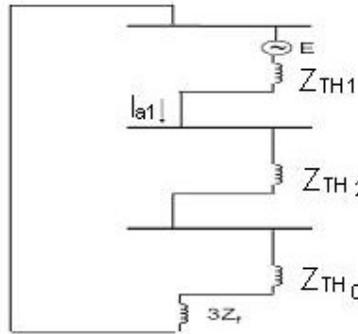


Figura 2.6.1.2 – Circuito equivalente para curto-circuito monofásico.

## 2.6.2 – Curto-circuito bifásico

Para defeito bifásico, ou seja, entre fases, são necessários os equivalentes de seqüência positiva e negativa. Estes equivalentes estão conectados em paralelo, conforme mostra o diagrama da [Figura 2.6.2.1](#) para um curto entre as fases *b* e *c*.

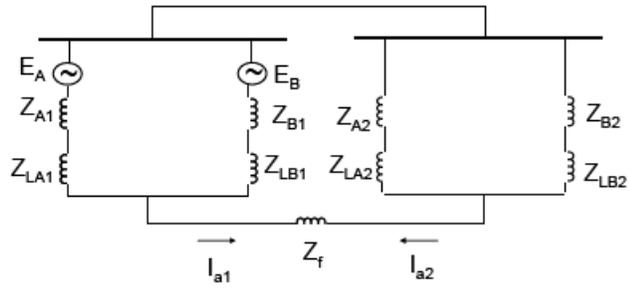


Figura 2.6.2.1 – Diagrama do Sistema para Curto Bifásico

Como o curto se dá entre as fases *b* e *c*, tem-se que:

$$I_a = 0; I_b = -I_c \quad (2.6.2.1).$$

Logo:

$$I_{a0} = 0; I_{a1} = -I_{a2} \quad (2.6.2.2)$$

Com  $Z_{TH1}$  e  $Z_{TH2}$  definidos conforme as equações (2.6.1.1) e (2.6.1.2) segue então que:

$$I_{a1} = -I_{a2} = E / (Z_{TH1} + Z_{TH2} + Z_f) \quad (2.6.2.3)$$

O circuito equivalente de Thevenin está apresentado na [Figura 2.6.2.2](#).

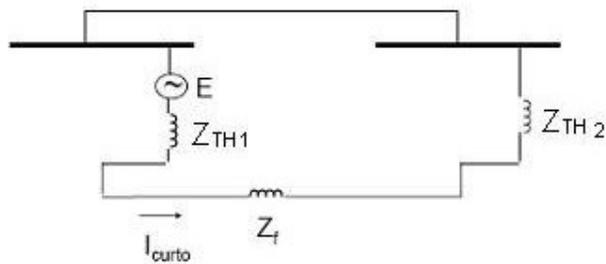


Figura 2.6.2.2 – Circuito equivalente para curto-circuito bifásico.

### 2.6.3 – Curto-circuito bifásico-terra

No caso em que os curtos bifásicos envolvem a terra, necessitamos também do equivalente de seqüência zero do sistema elétrico, de forma que a representação se faz de acordo com a [Figura 2.6.3.1](#), para curtos entre as fases *b* e *c*.

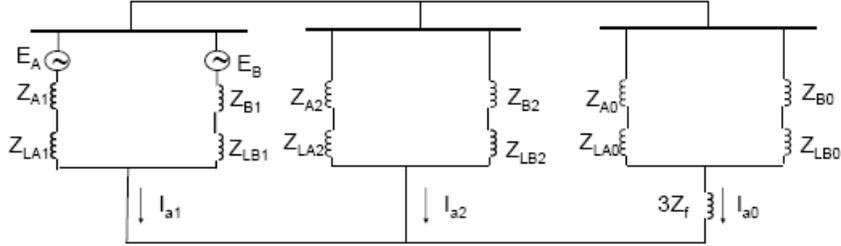


Figura 2.6.3.1 – Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico para terra.

Para este caso, as correntes de seqüência podem ser representadas conforme as seguintes equações:

$$I_{a1} = \frac{E}{Z_{TH1} + [Z_{TH2} // (Z_{TH0} + 3Z_f)]} \quad (2.6.3.1)$$

$$I_{a2} = \frac{-I_{a1}(Z_{TH0} + 3Z_f)}{(Z_{TH2} + Z_{TH0} + 3Z_f)} \quad (2.6.3.2)$$

$$I_{a0} = \frac{-I_{a1}Z_{TH2}}{(Z_{TH2} + Z_{TH0} + 3Z_f)} \quad (2.6.3.3)$$

Visto que :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (2.6.3.4),$$

então resulta:

$$I_{CURTO} = 2I_{a0} - I_{a1} - I_{a2} \quad (2.6.3.5)$$

## **CAPÍTULO 3 - ASPECTOS GERAIS DA PROTEÇÃO**

### **3.1 – Introdução**

Como já mencionamos anteriormente, os sistemas elétricos estão sujeitos a falhas de operação decorrentes da queda de condutores, deterioração de isolamento, descargas atmosféricas, etc., que resultam em correntes elevadas de curto circuito. Estas ocorrências podem causar danos aos equipamentos utilizados na geração, transmissão e distribuição, interromper o fornecimento de energia, causar risco de vida as pessoas próximas à falha ou até mesmo distantes. Surge então a necessidade de proteção dos sistemas elétricos, esta proteção sendo feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés.

Geralmente os sistemas elétricos são protegidos contra sobrecorrentes (curto circuitos) e sobretensões (internas e descargas atmosférica), entre outras proteções necessárias. Para proteção de sobrecorrente, os relés de sobrecorrente têm a função de identificar, localizar e sinalizar os defeitos da maneira mais exata possível.

Para uma proteção de maior seletividade pode-se recorrer aos relés de distância e aos relés de sobrecorrente com elementos direcionais e, para adicionar mais qualidade e confiabilidade à proteção de um sistema elétrico, temos ainda os relés complementares, sobre os quais apresentamos algumas informações neste capítulo.

### **3.2 – Funções básicas de um sistema de proteção**

Dentre as funções básicas de um sistema de proteção, as principais são:

- Salvar a integridade física de operadores, usuários do sistema e animais;
- Evitar ou minimizar danos materiais;
- Retirar de serviço, depois de isolá-lo rapidamente, um equipamento ou parte do sistema que se apresente defeituoso;
- Melhorar a continuidade do serviço;
- Diminuir despesas com manutenção corretiva.

### **3.3 – Propriedade básica de um sistema de proteção**

Um sistema de proteção para desempenhar seu papel em um sistema de potência, necessita das seguintes propriedades:

**Confiabilidade:** probabilidade do sistema de proteção funcionar com segurança e corretamente, sob todas as circunstâncias operativas.

**Seletividade:** o sistema de proteção que possui esta propriedade é capaz de reconhecer e selecionar as condições em que deve operar, a fim de evitar operações desnecessárias. Um exemplo seria um relé de sobrecorrente atuando e isolando um determinado defeito, de forma que o relé a jusante não deve atuar ao mesmo tempo para o mesmo defeito.

**Velocidade:** um sistema de proteção deve possibilitar o rápido desligamento do trecho ou equipamento defeituoso. Devemos considerar que a circulação das correntes de curto circuito por tempo muito longo pode comprometer a integridade do isolamento dos equipamentos e a rigidez mecânica dos enrolamentos.

**Sensibilidade:** um sistema de proteção deve responder às anormalidades com menor margem possível de tolerância entre a operação e não operação dos seus equipamentos e não deve operar em condições de carregamento nominal e sobrecargas de rotina.

### **3.4 – Níveis de atuação de um sistema de proteção**

De modo geral a atuação de um sistema de proteção se dá em três níveis, que são conhecidos como principal, de retaguarda e auxiliar.

*Proteção principal:* Em caso de defeito dentro da zona protegida, é quem deverá atuar primeiro.

*Proteção de retaguarda:* é aquela que só deverá atuar quando ocorrer falha da proteção principal.

*Proteção auxiliar:* é constituída por funções auxiliares das proteções principais e de retaguarda e cujos objetivos são sinalização, alarme, temporização, intertravamento etc.

A **Figura 3.4.1** ilustra um exemplo de proteção dos equipamentos de um sistema elétrico. As zonas de proteção que se interceptam funcionam como proteção principal ou de retaguarda, a depender da localização da defeito, como mostrado na **Figura 3.4.2**

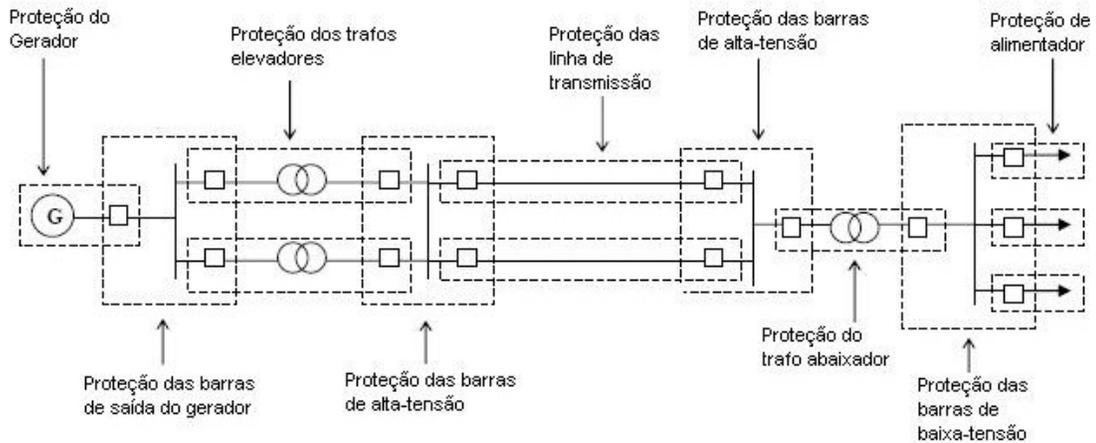


Figura 3.4.1– Proteção de um sistema elétrico em alta-tensão

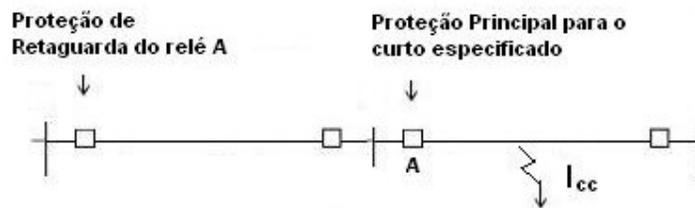


Figura 3.4.2 – Zonas de Proteção

### 3.5 – Relés complementares

#### 3.5.1 – Relé de Religamento – Função ANSI (79)

- **Objetivo:** reduzir o tempo de interrupção de energia, evitar sobrecargas e/ou conservar a estabilidade entre as gerações do sistema interligado.
- **Tipos de religamento:** monopolar ou tripolar (por meio de chave seletora).
- **Entrada:** o relé possui entrada para leitura do tempo de ação do temporizador.

- **Temporização:** o relé possui temporizador para contagem do tempo necessário para que o disjuntor restabeleça suas características dielétricas.

### **3.5.2 – Relé de Sincronismo – Função ANSI (25)**

- **Objetivo:** é utilizado para sincronização de geradores, sincronismo de LT's ou de tensões de barras. Isto é feito a partir de comparação dos valores de tensão (módulo e ângulo) de dois enrolamentos secundários de transformadores de potencial.
- **Modo de operação:** comparação das amplitudes e fases das tensões dos sistemas envolvidos.
- **Entradas:** valores de tensão (módulo e ângulo) dos enrolamentos secundários dos transformadores de potencial.

### **3.5.3 – Relé de Sobretensão – Função ANSI (59)**

- **Objetivo:** proteger o sistema elétrico contra sobretensões de maior duração (quanto maior a amplitude, menor o tempo de tolerância).
- **Modo de operação:** quando  $V > V_{max}$  admissível, o relé atua e provoca disparo dos disjuntores. Em caso de sobretensões de manobra (de curta duração), tem-se a proteção com pára-raios.

### **3.5.4 – Relé de Subtensão – Função ANSI (27)**

- **Objetivo:** evitar o prolongamento de situações de subtensão.
- **Modo de operação:** quando  $V < V_{min}$  admissível, o relé atua e provoca disparo dos disjuntores. Em alguns casos, esta proteção é combinada com a proteção de sobrecorrente, para melhor caracterização do curto-circuito.

### **3.5.5 – Relé de Sobrecorrente com restrição de tensão – Função ANSI (51V)**

- **Objetivo:** neste caso, há o objetivo claro de diferenciar a situação de sobrecarga da situação de curto-circuito.

### **3.5.6 – Relé de Bloqueio – Função ANSI (86)**

- Multiplicadores de contato
- Atuam nos circuitos de disparo e bloqueiam o fechamento dos disjuntores.
- São providos de chave para rearme mecânico ou de botoeira para rearme elétrico.

## CAPÍTULO 4 – UTILIZAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

### 4.1 – Introdução

Os relés de proteção constituem o elemento básico de operação da proteção contra as sobrecorrentes que se seguem aos curto-circuitos. O relé é definido como sendo um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor quando ocorrem, no sistema elétrico protegido, condições anormais de funcionamento que resultem em correntes relativamente elevadas.

Os relés de sobrecorrente constituem um dos tipos de função de proteção e, conforme o próprio nome sugere, têm como grandeza de atuação uma ou mais dentre as correntes de fase ou a corrente de neutro do sistema. A atuação do relé ocorrerá quando a corrente atingir um valor igual ou superior ao ajuste previamente estabelecido. A atuação do relé pode acontecer da forma instantânea ou temporizada, dependendo da necessidade.

Os relés de sobrecorrente podem ser de fase ou de terra, os relés de fase para proteção contra curtos que envolvam mais de uma fase (curtos trifásico, bifásico e bifásico-terra) e o relé de terra para proteção contra curtos fase-terra.

No que diz respeito à característica de temporização dos relés de sobrecorrente, a norma ASA [11] (American Standard Association) utiliza a seguinte nomenclatura para os relés de sobrecorrente, conforme mostrado na [tabela 4.1.1](#).

Tabela 4.1.1 – Tabela ASA de Nomenclatura de Relés

RELÉ	ELEMENTO	NOMENCLATURA
Relé de fase	Temporizado	51
Relé de fase	Instantâneo	50
Relé de terra	Temporizado	51N ou 51GS
Relé de terra	Instantâneo	50N

## **4.2 – Classificação dos Relés de Sobrecorrente**

A classificação dos relés de sobrecorrente é feita da seguinte forma:

### **4.2.1 - Quanto a aspectos construtivos**

#### **4.2.1.1 - Relé eletromecânico**

São os relés tradicionais, os primeiros utilizados em sistemas de proteção. Os relés eletromecânicos foram projetados, elaborados e construídos com predominância nos movimentos mecânicos provenientes dos acoplamentos elétricos e magnéticos.

Em relação ao princípio básico de funcionamento, o relé atua fundamentalmente de duas formas: atração eletromagnética e indução eletromagnética.

O relé de atração eletromagnética é simples, com funcionamento idêntico ao de um eletroímã. Já o relé de indução eletromagnética funciona utilizando o mesmo princípio de um motor elétrico. O giro do rotor por uma determinada excursão angular, em determinada direção, produz o fechamento do contato do relé.

Dentro da classificação acima, existem alguns tipos diferentes de relés de interação eletromagnética como, por exemplo, os relés de disco de indução por bobina de sombra, os relés do tipo medidor de kWh, os relés do tipo cilindro de indução; os relés do tipo laço de indução, etc.

#### **4.2.1.2 - Relé estático**

Estes relés são construídos com dispositivos eletrônicos. Nestes relés, não há nenhum dispositivo mecânico em movimento, todos os comandos e operações são feitos eletronicamente. Entretanto, a grande maioria dos relés estáticos acaba, no final, sempre operando mecanicamente um relé auxiliar que provoca a abertura ou fechamento do disjuntor.

O termo estático foi originado em contrapartida aos relés eletromecânicos, já que o relé estático é caracterizado essencialmente pela ausência de movimentos mecânicos.

Os relés estáticos não foram bem aceitos no início de sua aplicação para proteção dos sistemas elétricos de potência e industriais, causando muitos problemas de operação indevida, o que resultou na substituição pelos antigos relés eletro-mecânicos. Quando os problemas de operação referidos começavam a ser efetivamente resolvidos, os relés numéricos ou digitais apareceram e, dado a inúmeras características favoráveis, passaram a dominar o mercado, substituindo os relés estáticos e eletromecânicos praticamente em todos os novos projetos de aplicação.

#### 4.2.1.3 - Relé digital

Os relés digitais são equipamentos eletrônicos gerenciados por microprocessadores. A grande vantagem destes relés é que não há necessidade de variação física nos parâmetros dos elementos do circuito, pois todos os comandos são efetuados por programas computacionais (software).

A proteção digital de sistemas elétricos de potência surgiu nas décadas de 60 e 70. A tabela 4.2.1.3.1 apresenta um indicativo da evolução dos relés de proteção.

Tabela 4.2.1.3.1 – Histórico da Evolução dos Relés

<b>Relés Eletromecânicos</b>	1901	Relé de sobrecorrente de indução
	1908	Relé diferencial
	1910	Relé direcional
	1921	Relé de distância tipo impedância
	1937	Relé de distância tipo mho
<b>Relés Estáticos</b>	1925 – 1948	1ª geração – Válvulas eletrônicas
	1949 – 1960	2ª geração – Transistores
	1960 – 1970	3ª geração – Circuitos integrados
	1970 - .....	4ª geração – Relés digitais

Os relés digitais apresentam as seguintes vantagens em relação aos convencionais:

- Automonitoramento (autodiagnóstico);
- Detecção e diagnóstico de faltas;
- Permite o desenvolvimento de novas funções e métodos de proteção;

- Compartilha dados através das redes de comunicação;
- Proporciona melhor interface homem x máquina;
- Permite redução das interferências do meio ambiente sobre as condições operativas dos equipamentos;
- Os custos estão baixando.

As desvantagens são:

- Vida útil reduzida (10 a 15 anos), enquanto os convencionais possuem vida longa (acima de 30 anos);
- Interferências eletromagnéticas;
- O hardware dos relés digitais avança rapidamente, tornando-os obsoletos precocemente.

A arquitetura de um relé digital é mostrada na [Figura 4.2.1.3.1](#), com o apoio de um diagrama de blocos. Ao relé de sobrecorrente são aplicados sinais analógicos provenientes dos transdutores primários de corrente e potencial (para o caso do relé ser direcional) e sinais discretos que refletem o estado de disjuntores, chaves e outros relés. Estes sinais recebem um processamento nos subsistemas correspondentes antes de sua aplicação ao microcomputador que constitui o elemento principal do relé. Os sinais analógicos passam adicionalmente por um conversor analógico-digital antes de entrar na unidade central de processamento (CPU). Os sinais discretos de saída do relé recebem processamento no subsistema de saídas discretas e que geralmente inclui relés eletromecânicos auxiliares para provê-los de saídas do tipo contato. O relé realiza também a função de sinalização de sua operação e de seu estado funcional mediante dispositivos de sinalização. A maioria dos relés digitais dispõe também de capacidade de comunicação com outros equipamentos digitais, mediante portas serial e paralela.

Os blocos apresentados na [Figura 4.2.1.3.1](#) são descritos a seguir:

#### 1) Funções do subsistema de entradas analógicas

- Condicionar os sinais de tensão e corrente provenientes dos transdutores primários (TCs e TPs) a valores adequados para conversão analógica-digital;
- Isolar eletricamente os circuitos eletrônicos do relé dos circuitos de entrada;

- Proteger o relé contra sobretensões transitórias;
- Realizar a filtragem “anti-aliasing” dos sinais analógicos de entrada. Este filtro é necessário para limitar o espectro de frequência desses sinais a uma frequência não maior do que a metade da frequência de amostragem utilizada pelo relé.

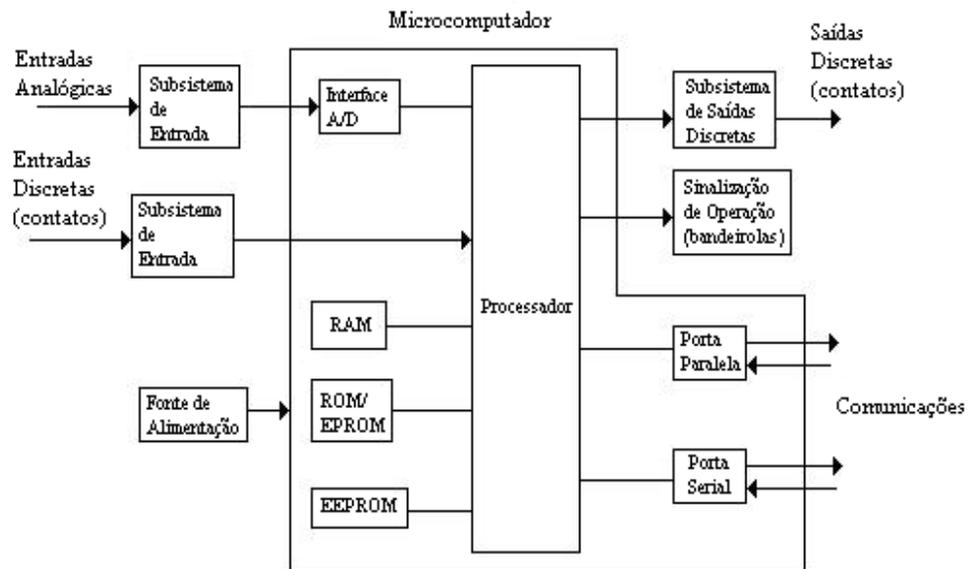


Figura 4.2.1.3.1 – Arquitetura do relé digital

## 2) Funções do subsistema de entradas discretas

- Condicionar os sinais para sua aplicação ao processador (o que pode incluir uma fonte de alimentação auxiliar para verificação do estado dos contatos).
- Prover o isolamento elétrico necessário entre as entradas e os circuitos eletrônicos e proteger o relé contra sobretensões transitórias.

## 3) Interface analógico-digital

Na interface analógico-digital se levam em conta os processos de amostragem e de conversão analógico-digital dos sinais analógicos. O relógio de amostragem gera pulsos de curta duração e de certa frequência que marcam os instantes de amostragem. Em cada um deles, se faz a conversão do valor instantâneo do sinal analógico para uma palavra digital que é aplicada ao processador.

Existem diferentes formas para amostragem de sinais analógicos. Nos relés digitais, a mais utilizada consiste em tomar amostras com espaçamentos uniformes durante todo o ciclo do sinal. A frequência de amostragem é da ordem de 240Hz a 2kHz.

#### 4) Processador digital

O processador do relé digital é encarregado de executar os programas de proteção, controlar diversas funções de tempo e realizar tarefas de auto-diagnóstico e de comunicação com os periféricos.

O processador trabalha auxiliado pelas seguintes memórias:

- RAM (Memória de Acesso Aleatório): é necessária como “buffer” para armazenar temporariamente os valores das amostras de entrada, para acumular resultados intermediários dos programas de proteção e para armazenar dados que serão guardados posteriormente em memória não volátil.

- ROM (Memória somente de leitura, tipo não programável) ou PROM (Memória somente de leitura): são usadas para guardar os programas do relé. Estes programas são executados diretamente nestas memórias ou são carregados nas memórias RAM para posterior execução.

Com a utilização de relés digitais, ficou facilitada a aplicação da teleproteção exercida através dos sistemas de comunicação entre relés. Existem modelos com comunicação através de fibras óticas.

A utilização de relés digitais possibilitou a disponibilidade de uma infinidade de facilidades para promover mais qualidade à tarefa de proteção dos sistemas de potência, possibilitando aumento da confiabilidade ao sistema, redução das taxas de interrupção de energia e outras vantagens.

### **4.2.2 - Quanto à atuação no circuito a proteger**

I – Atuação Direta

O relé de sobrecorrente é classificado como de atuação direta quando a ação de proteção ocorre diretamente no dispositivo de destrava da mola ou da válvula de ação de abertura dos pólos do disjuntor. O próprio relé é que libera a energia a ser utilizada na ação de abertura.

## II – Atuação Indireta

Neste caso, o relé de atuação indireta não atua diretamente no dispositivo de destrava do disjuntor. A atuação deste relé apenas fecha um contato que ativa, energiza ou transfere para outro circuito a responsabilidade de providenciar a destrava da mola ou da válvula de ação de abertura do disjuntor.

Normalmente, no relé de atuação indireta, um circuito de corrente contínua é alimentado por baterias que acionam o disjuntor. A Figura 4.2.2.1 mostra um esquema do relé de atuação indireta.

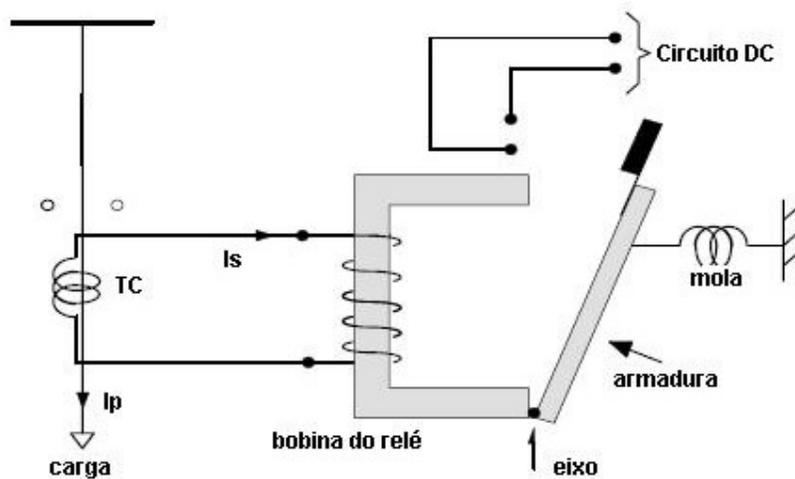


Figura 4.2.2.1 – Relé de alavanca atuação indireta

## 4.2.3 - Quanto à Instalação

### I – Relé Primário

São todos os relés que têm sua bobina magnetizante diretamente conectada à rede. Sendo assim, a corrente de curto-circuito passa diretamente pela bobina magnetizante. O grande problema deste relé é que sua bobina estará no mesmo potencial da rede, desta

forma colocando em risco a segurança humana e dificultando as tarefas de inspeção, manipulação e manutenção.

Este relé é mais simples, robusto e barato, sendo utilizado principalmente em circuitos terminais de cargas industriais de porte médio.

## II – Relé Secundário

São todos os relés que têm sua bobina magnetizante energizada via secundário do TC (Transformador de Corrente). Neste caso, o relé trabalha com maior índice de segurança humana e ainda pode ser padronizado, visando sua aplicação econômica em diferentes sistemas elétricos.

### **4.2.4 – Corrente de ajuste**

A corrente de ajuste dos relés depende de sua forma construtiva. Para relés eletromecânicos, o ajuste é feito através de um tracionamento na mola de operação, variação de entreferro, mudanças de tapes na bobina magnetizante. Enquanto nos relés estáticos alterações no ajuste podem ser feitas através de uma variação nos elementos do seu circuito, nos relés digitais todo o ajuste é implementado via software, podendo-se implementar curvas de tempo normalizadas pela IEC [3], ou não, para relés temporizados.

Conforme dito no item 4.2.1, podemos observar que, para os relés eletromecânicos de atração magnética, encontramos maior dificuldade para ajuste da corrente, já que fica-se na dependência do comportamento de elementos físicos, analógicos, para atuação correta do relé de proteção.

Muitas vezes o movimento de atração sobre uma alavanca ou êmbolo depende do valor do campo magnético. Temos então que o menor campo magnético que colocaria o relé no início de sua operação, ou seja, que produziria uma força magnética exatamente igual à força mecânica de retenção, é chamado de limiar de operação do relé. Para a corrente elétrica do sistema levemente maior que a corrente do limiar de operação, o relé deveria atuar, mas, na prática, isto não ocorre devido à influência de efeitos de variação nos elementos intrínsecos da própria natureza, que são:

- Atrito nos mancais dos eixos;
- Elasticidade não repetitiva e não perfeita da mola de retenção;
- Efeito de temperatura que produz dilatação diferenciada nas diversas peças e mecanismos do relé;
- pressão atmosférica que muda a densidade do ar que envolve o relé;
- umidade do ar;
- corrosão nos elementos metálicos do relé.

Devido a esses elementos intrínsecos, adota-se uma pequena folga na definição da corrente mínima de ajuste do relé para garantir o seu acionamento.

Como nos relés digitais todo esse esforço de ajuste se limita em programar adequadamente o software do relé para especificação de sua curva de operação, então, quando a corrente do sistema for maior que o valor especificado como corrente de ajuste do relé, ele enviará um sinal para abertura do disjuntor.

Seguem, abaixo, alguns termos usados no ajuste das correntes de um relé de sobre-corrente:

**TAPE** – escala de corrente que deve ser escolhida no relé. O TAPE é também conhecido como corrente de ajuste do relé.

O ajuste da corrente de atração feito pela mudança de tape da bobina magnetizante de um relé eletromecânico resulta na manutenção de mesma força magnetomotriz (força essa necessária para deixar o relé no limiar de operação) para os diversos valores de corrente de TAPE do relé. Segue um exemplo abaixo:

Supondo, em um determinado caso, que a força magnetomotriz necessária para o limiar de operação seja 100Ae, temos:

$$\text{TAPE 1A} \Rightarrow 1\text{A} \times 100 \text{ espiras} = 100\text{Ae}$$

$$\text{TAPE 2A} \Rightarrow 2\text{A} \times 50 \text{ espiras} = 100\text{Ae}$$

**Múltiplo(M)** - a grandeza múltiplo do tape indica quantas vezes a corrente de defeito é maior que a corrente relativa ao tape adotado (4.2.4.1):

$$M = \frac{I_{SECUNDÁRIO DOTC}}{TAPE} \quad (4.2.4.1)$$

**Corrente de Pick-up** - termo designado para a menor corrente possível capaz de atrair o êmbolo ou a alavanca de um relé eletromecânico, ou seja, para fazer o relé operar. O pick-up é a menor de todas as correntes que deixam o relé no limiar de operação, ou seja, é a corrente que deixa o relé na iminência de operação. A corrente de pick-up é também considerada como a corrente efetiva de ajuste do relé.

**Corrente de Drop-out** – este termo, que se refere a desoperação do relé, significa a maior corrente capaz de iniciar o processo de desativação do relé.

### 4.3 – Relé de sobrecorrente instantâneo

O relé de sobrecorrente instantâneo atua sem retardo intencional quando a corrente do sistema elétrico é maior que o seu ajuste. Pela norma ASA são denominados pelo número 50.

Os relés instantâneos não são na essência da palavra instantâneos, mas o seu tempo de atuação é o correspondente ao da movimentação dos seus mecanismos de operação. O tempo depende do projeto, tipo e fabricação. Os relés eletromecânicos mais rápidos atingem 2,3 ciclos e os eletrônicos 0,7 ciclos.

#### 4.3.1 – Critério para corrente de ajuste dos relés instantâneos

Como a unidade instantânea não é temporizada, e para evitar atuação de outros relés, o seu ajuste deve ser de tal maneira que não alcance os relés a jusante.

Sendo assim, a corrente de ajuste do instantâneo deve ser calculada, de modo a haver seletividade do relé, ou seja, sem sobreposição de zona de atuação.

Usualmente ajusta-se a corrente do instantâneo para um curto-circuito trifásico a 85% da linha de transmissão protegida, conforme equação (4.3.1.1).

$$I_{AJUSTE\ DO\ INSTANT\ ANEO} = I_{cc3\phi\ 85\% da\ LT} \quad (4.3.1.1)$$

#### **4.4 – Relé de sobrecorrente temporizado**

É o relé que tem, na sua própria funcionalidade, a definição de uma característica temporizada de operação, ou seja, a sua atuação ocorre após um certo tempo.

A utilização destes relés possibilita a melhor coordenação entre as zonas de proteção. Pela norma ASA são denominados pelo número 51.

Os relés de sobrecorrente temporizados podem ser de tempo definido ou de tempo inverso.

##### **4.4.1 – Relé de Sobrecorrente Temporizado de Tempo Definido**

A atuação dos relés de tempo definido ocorre após um tempo pré-determinado, este valor sendo escolhido de acordo com a coordenação que se queira implementar.

A coordenação deste tipo de relé é muito simples, bastando para o relé mais afastado ter o menor ajuste de tempo possível, enquanto os relés a montante, mais próximos das fontes de tensão, devem ter tempo de atuação aumentados pela diferença  $\Delta t$ . Mas este tipo de coordenação não atende a filosofia da proteção, ou seja, os curtos-circuitos mais próximos da fonte são os mais perigosos. Com a adoção deste tipo de coordenação, os tempos de operação da proteção se tornam muito altos para as correntes resultantes dos curto-circuitos mais próximos das fontes de tensão.

##### **4.4.2 – Relé de Sobrecorrente Temporizado de Tempo Inverso**

Para relés de tempo inverso, não se escolhe o tempo de atuação, mas sim a curva de atuação. A escolha da curva depende das características e condições de coordenação dos relés. As curvas disponíveis são geralmente normalizadas.

Os relés eletromecânicos, no intervalo de múltiplos de 1,0 e 1,5, operam com um pequeno conjugado, não produzindo um bom desempenho no fechamento do seu contato. A **Figura 4.4.2.1** mostra uma curva típica deste relé. Para evitar a operação do relé nestes pontos, basta ajustar o relé conforme a inequação (4.4.3.1) indicada adiante.

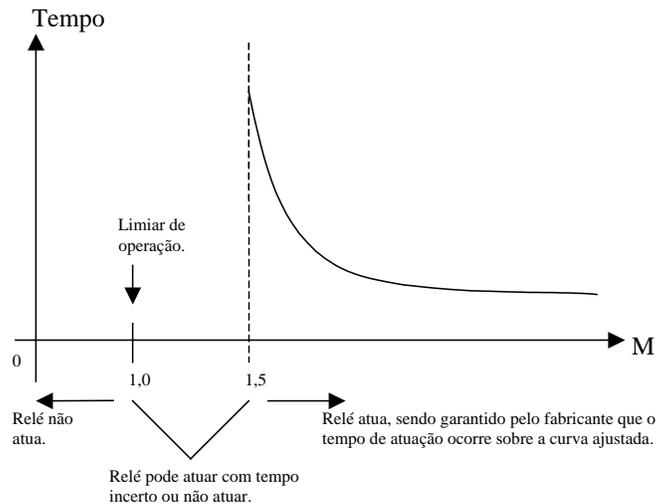


Figura 4.4.2.1 – Curva de tempo inverso do relé de sobrecorrente

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso podem adotar diferentes inclinações em suas curvas de operação. A **Figura 4.4.2.2** mostra as denominações das inclinações mais conhecidas.

Para uma melhor coordenação da proteção, o ideal seria que todos os relés tivessem a mesma característica de inclinação de suas curvas. Mas isto não ocorre na prática devido à mistura de equipamentos com características diferentes, fabricantes diferentes, comprimentos diferentes de linha de transmissão, etc.

A escolha do grau de inclinação da curva é determinado pelos comprimentos das linhas protegidas. Para linhas curtas, deve-se associar uma característica extremamente inversa ao relé de sobrecorrente, dado que o nível de curto-circuito é quase o mesmo ao longo de toda a extensão da linha. Assim, as características muito inversa e inversa ficam reservadas para as linhas de comprimento médio e longo, respectivamente.

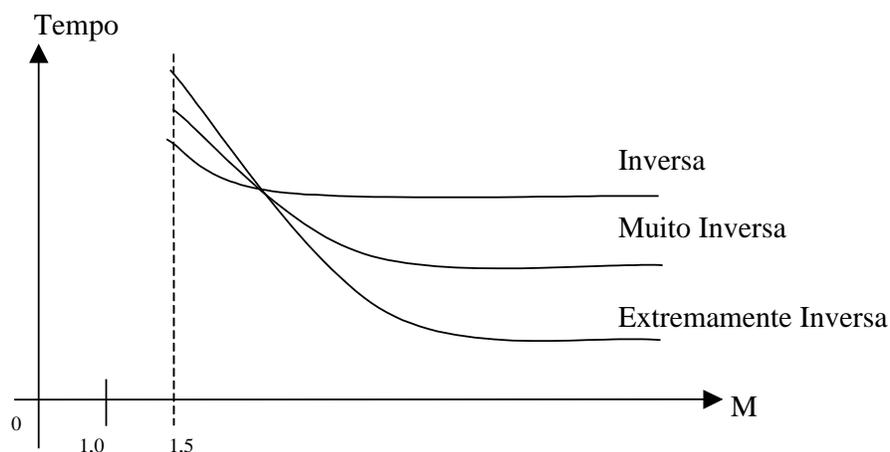


Figura 4.4.2.2 – Diferentes inclinações das curvas de tempo x múltiplo

#### 4.4.3 – Critério para Corrente de Ajuste do Relé Temporizado de Tempo Inverso

Para garantir uma segurança e adequada operação do relé, é necessário ajustar sua corrente de modo a atender a inequação (4.4.3.1).

$$1,5 \cdot I_{\text{NOMINAL DE CARGA}} \leq I_{\text{AJUSTE DO RELÉ}} \leq \frac{I_{\text{CURTO MÍNIMO NO FINAL DO CIRCUITO PROTEGIDO}}}{1,5} \quad (4.4.3.1)$$

A corrente de ajuste do relé é a corrente de pick-up.

O fator 1,5 que multiplica a corrente nominal na inequação (4.4.3.1) é para deixar uma folga para possíveis flutuações de carga, manobras na configuração da rede, transferências de carga, sem que o relé opere.

O relé deve atuar com absoluta garantia para qualquer curto-circuito no trecho protegido, isto é, na faixa de alcance de sua proteção. Esta garantia é obtida obedecendo a inequação (4.4.3.1) mas, na prática, podemos aumentar ainda mais esta garantia escolhendo a corrente de ajuste do relé o mais próximo do limite inferior da inequação

(4.4.3.1). Assim, para uma mínima corrente de curto-circuito, o relé terá um ajuste muitas vezes maior que o limiar de seu intervalo de operação.

Já o fator 1,5 que aparece dividindo o ultimo elemento da inequação (4.4.3.1) é para garantir, no pior caso, que a menor corrente de curto circuito seja 1,5 vezes o limiar de operação.

Para este relé, a maior preocupação é dar sensibilidade para os curtos de fase. Logo, a falta menos severa a ser considerada é o curto-circuito bifásico.

#### 4.5 – Relé de sobrecorrente temporizado com elemento instantâneo

É um relé de sobrecorrente temporizado ao qual é incorporada uma unidade instantânea. A denominação 50/51 é utilizada pela norma ASA.

Nos relés eletromecânicos, o ajuste de corrente do elemento instantâneo é feito em relação ao tape escolhido do relé correspondente à sua unidade temporizada, ou seja um múltiplo do ajuste do elemento temporizado.

O desempenho da atuação do relé 50/51, em função das grandezas tempo x múltiplo M é mostrado na [Figura 4.5.1](#).

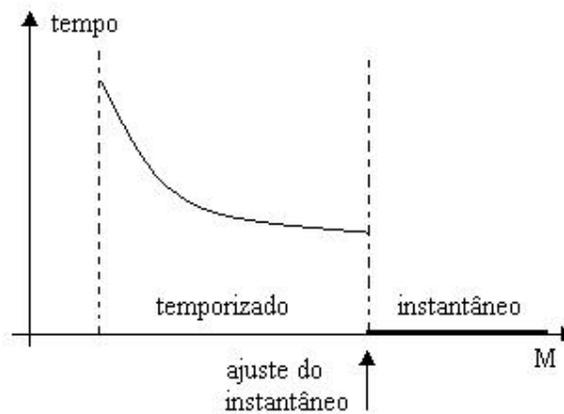


Figura 4.5.1 – Curva do tempo de operação do relé 50/51

Pela curva vemos que, dependendo da amplitude da corrente de curto-circuito, atuará a unidade 50 ou 51 do relé.

#### 4.6 – Relé de sobrecorrente de neutro

O relé de sobrecorrente de neutro é conhecido também como relé de sobrecorrente de seqüência zero. Um dos esquemas de ligação mais utilizados para este relé é mostrado na [Figura 4.6.1](#).

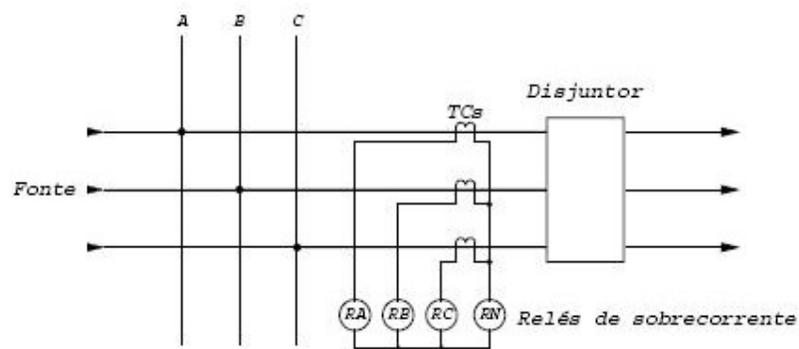


Figura 4.6.1 – Esquema de ligação do relé de neutro

onde:

$RN \Rightarrow$  Réle de neutro.

$RA, RB, RC \Rightarrow$  Relés de fase.

Neste esquema da [Figura 4.6.1](#) as correntes trifásicas nos secundários dos TC's produzem uma réplica das correntes trifásicas da rede que atravessam seus enrolamentos primários

Aplicando-se a lei de Kirchoff no nó de conexão dos quatro relés, temos a eq. (4.6.1).

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (4.6.1)$$

Aplicando componentes simétricas, obtemos (4.6.2):

$$I_N = 3 I_0 \quad (4.6.2)$$

Vemos então que toda a corrente que escoar para a terra no circuito elétrico primário em alta tensão tem a sua réplica atravessando o relé de neutro. Logo, concluímos que o relé de neutro é sensível apenas à componente de seqüência zero das correntes de fase durante os curto-circuitos.

No sistema elétrico as correntes que geram componentes de seqüência zero são:

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

Note que nestes tipos de defeito, as correntes secundárias do curto-circuito passam pelos relés de fase e neutro. Portanto vemos que a utilização do relé de neutro produz uma avanço na proteção quanto à sua sensibilidade para atuar em pequenos curto-circuitos que envolvem a terra.

Em geral, nos sistemas de distribuição, as correntes de curto-circuito fase-terra são muito pequenas, de forma que a proteção com relés de seqüência zero aplicados a religadores produz uma grande melhoria na qualidade da proteção.

#### 4.6.1 – Critério para Corrente de Ajuste do Relé de Neutro

Em operação normal, as correntes de fase nos sistema elétricos ou estão equilibradas ou apresentam pequeno grau de desequilíbrio. Portanto, apenas uma leve corrente atravessa o relé de neutro nestas condições. Sendo assim, a corrente adequada de ajuste da proteção com o relé de neutro deve satisfazer as inequações (4.6.1.1) e (4.6.1.2).

$$I_{AJUSTE \text{ DO RELÉ DE NEUTRO}} \leq \frac{I_{CC-MINIMO \text{ NO FINAL DO TRECHO}}}{1,5} \quad (4.6.1.1)$$

Geralmente a inequação (4.6.1.1) não é considerada porque a corrente de ajuste do relé de neutro deve estar contida na faixa de 10% a 45% da corrente nominal do circuito, como mostra a inequação (4.6.1.2).

$$0,1 \cdot I_{NOMINAL} \leq I_{AJUSTE DO RELÉ DE NEUTRO} \leq 0,45 \cdot I_{NOMINAL} \quad (4.6.1.2)$$

Note que o ajuste da corrente do relé de neutro pode ser bem menor que a corrente nominal do circuito protegido. O valor a ser adotado depende da localização da proteção no sistema elétrico. Em pontos próximos às usinas geradoras, o ajuste pode ficar próximo ao limite inferior da faixa indicada em (4.6.1.2), enquanto para proteção de linhas em sistemas de distribuição, ajustes da ordem de  $0,40 I_{NOMINAL}$  podem ser considerados. Ajustes no meio da faixa referida podem ser adotados para linhas localizadas nos sistemas tronco de transmissão.

#### **4.7 – Relé de sobrecorrente direcional**

Como o nome indica, o relé direcional tem sensibilidade direcional em relação ao sentido do fluxo de energia que trafega no sistema, possibilitando a efetiva proteção do sistemas elétrico e melhorando as condições para coordenação da proteção.

O relé de sobrecorrente direcional, nomenclatura ASA número 67, é um dispositivo que atua quando a corrente têm um sentido pré-estabelecido de acordo com sua referência de polarização.

Este relé necessita de duas grandezas para atuação:

- Uma grandeza de polarização que pode ser tensão ou corrente. A tensão é mais utilizada.
- Uma grandeza de operação, função esta normalmente exercida pela corrente.

A direcionalidade do relé é feita pela comparação fasorial das posições relativas da corrente de operação e da tensão de polarização. Esta defasagem é que produz o sentido da direção do fluxo de energia da corrente de operação ou do curto-circuito.

#### 4.7.1 – Polarização do Relé Direcional

O tipo de polarização do relé depende do local e característica da linha de transmissão. Alguns tipos de polarização são mostrados abaixo:

*a) Polarização em quadratura ou a 90°.*

As tensões são sempre referenciadas à tensão de polarização do relé de neutro da fase A, isto é, à tensão  $\dot{V}_{AN}$ . A tensão de polarização, neste caso, é dada por (4.7.1.1):

$$\dot{V}_{BC} = \dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN} \quad (4.7.1.1)$$

Fazendo a composição dos fasores, verifica-se que a tensão de polarização está defasada de 90° em relação a tensão  $\dot{V}_{AN}$ .

Para os relés direcionais das outras fases, é só fazer a devida rotação de fases. Por exemplo, o relé da fase B utiliza a tensão de polarização  $\dot{V}_{CA}$ .

*b) Polarização a 30°*

Para polarização a 30° do relé direcional de fase A, a tensão de polarização é  $\dot{V}_{AC}$ .

*c) Polarização a 60°*

Para polarização a 60°, o relé direcional de fase A utiliza uma tensão de polarização que pode ser  $-\dot{V}_{CN}$  ou  $\dot{V}_{AN} + \dot{V}_{BN}$ .

#### 4.7.2 – Proteção com Relé de Sobrecorrente Direcional

O relé de sobrecorrente direcional apenas apresenta sensibilidade para operação com fluxo de potência em uma determinada direção pré-estabelecida e que deve coincidir com o posicionamento relativo da corrente de curto-circuito. A função de proteção, na verdade, é desempenhada pelo relé de sobrecorrente comum, como visto anteriormente.

Assim, a proteção em sistemas com dupla alimentação deve ser feita somente com a supervisão do relé direcional 67 aos relés de sobrecorrente do tipo 50 e/ou 51.

A coordenação dos relés direcionais é feita ajustando os relés de sobrecorrente comum em uma direção de fluxo e depois em direção oposta. Com a aplicação deste relé conseguimos coordenar apropriadamente a proteção de sistemas em anel e de linhas paralelas.

#### **4.8 – Coordenação de Relés de Sobrecorrente**

A coordenação dos relés de sobrecorrente pode ser entendida como uma estratégia de proteção, de forma que, para qualquer corrente de curto-circuito, há uma escala crescente de tempos de operação no sentido do relé principal para os relés de retaguarda, de modo a garantir e permitir seletividade no desligamento do sistema.

Não podemos esquecer que o objetivo da operação da proteção é eliminar (isolar) o defeito o mais rápido possível, minimizando a probabilidade de interrupção do fluxo de energia aos consumidores.

Vemos então que a coordenação de relés é necessária, porque o sistema de proteção também está sujeito à falhas e, em casos de falhas da proteção principal, a proteção de retaguarda é imprescindível.

O caso de falha da proteção principal, utilizar os seguintes esquemas de proteção de retaguarda:

- Duplicação da proteção primária, de forma que se houver falha de um sistema de proteção de sobrecorrente, um outro, igual ao primeiro, atuará. Neste caso, só se recorre à coordenação quando a falha for no sistema de abertura do disjuntor.
- Proteção secundária, geralmente adotada em sistema de porte modesto, de forma que a ação de proteção, em caso de falha do sistema de proteção primária, é garantida pela proteção de retaguarda (a montante) e obedecendo a respectiva regra de coordenação.

#### 4.8.1 – Tempo de Coordenação

Tempo de coordenação ( $\Delta t$ ) é a menor diferença de tempo que dois relés mais próximos da cadeia de proteção devem ter para garantia de coordenação de ação de suas proteções.

Entenda-se por coordenação correta a garantia de que a proteção mais próxima a montante da proteção primária, em caso de falha desta última, eliminará o curto-circuito.

Os tempos de operação de dois sistemas de proteção de sobrecorrente sucessivos, devem satisfazer a inequação (4.8.1.1) para haver coordenação.

$$t_{\text{RELÉ MONTANTE}} - t_{\text{RELÉ A JUSANTE}} \geq \Delta t \quad (4.8.1.1),$$

onde:

$t_{\text{RELÉMONTANTE}}$  é o tempo de atuação do relé a montante

$t_{\text{RELÉAJUSANTE}}$  é o tempo de atuação do relé a jusante para a mesma corrente de curto circuito.

$\Delta t \Rightarrow$  tempo de coordenação

O tempo total de coordenação é composto pelas seguintes parcelas:

*Tempo de operação do mecanismo de abertura do disjuntor*  $\Rightarrow$  são computados os tempos de operação da bobina de disparo do disjuntor, o tempo de destrava da trava da liberação da mola de abertura ou da válvula do ar comprimido do disjuntor e o tempo de ação da mola de abertura ou pistão a ar comprimido que produz o movimento que processa a abertura mecânica dos contatos elétricos do disjuntor. O tempo total desta operação está na faixa de 2 a 6 ciclos.

*Tempo de extinção do arco elétrico do disjuntor*  $\Rightarrow$  na abertura do contato elétrico do disjuntor, o arco mantém a condução da corrente de curto-circuito. Para eliminar o arco é usado sopro de  $SF_6$ , sopro eletromagnético, entre outro métodos. O tempo de extinção varia e pode ir até 5 ciclos.

*Tempo de sobrepercurso do relé*  $\Rightarrow$  é o tempo gasto para movimento final do disco dos relés eletromecânicos de indução em razão de sua inércia, depois que a corrente de curto é efetivamente extinta. Esta componente de tempo inexistente para os relés digitais.

*Tempo de segurança*  $\Rightarrow$  é um tempo de folga para compensar as imprecisões dos tempos descritos anteriormente.

Portanto, o tempo de coordenação depende do tipo de relé utilizado e do tipo de disjuntor envolvido, apresentando valor determinado exclusivamente pelo fabricante.

Os valores adotados são mostrados na tabela (4.8.1.1):

Tabela 4.8.1.1 – Tempos usuais de coordenação

tempos (s)	0,4 a 0,5	relés eletromecânicos
	0,15 a 0,25	relés digitais

#### **4.8.2 – Determinação da relação de transformação do TC (transformador de corrente)**

Para fazer o ajuste da corrente de atuação de um relé de sobrecorrente secundário, é necessário o conhecimento prévio da relação de transformação do TC (transformador de corrente) que irá alimentá-lo. A relação do TC (RTC - Relação de transformação do transformador de corrente) que alimenta o relé deve atender aos seguintes requisitos:

- A corrente nominal primária do TC deve ser maior do que a razão entre o curto-circuito máximo (no ponto de instalação) e o fator de sobrecorrente (FS) do TC, conforme inequação (4.8.2.1).

$$I_{NOMINALPRIMÁRIO} \geq \frac{I_{CC,MAX}}{FS} \quad (4.8.2.1)$$

Pela norma ASA: FS = 20;

Pela norma ABNT: FS = 5,10,15,20.

- A corrente nominal do TC deve ser maior ou igual a máxima corrente de carga (4.8.2.2).

$$I_{NOMINAL PRIMÁRIO} \geq I_{CARGA MÁXIMA} \quad (4.8.2.2)$$

Para uma especificação completa do TC, seria necessário a fixação de outras características de projeto que não fazem parte do escopo do presente trabalho.

### 4.8.3 – Regra para Coordenação de Relés de Sobrecorrente (50/51)

A coordenação desta proteção utilizando relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo é a melhor proteção possível com este tipo relé.

Seguem abaixo os passos a serem seguidos:

1º passo: ajusta-se as unidades instantâneas de todos os relés do trecho a ser coordenado, usando a equação (4.3.1.1). A [Figura 4.8.3.1](#) mostra um exemplo.

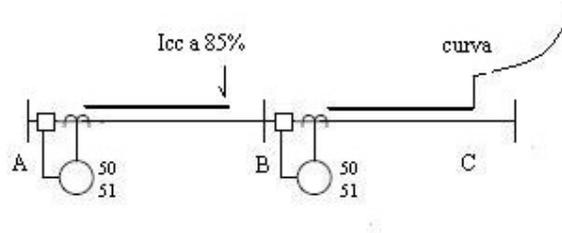


Figura 4.8.3.1 – Exemplo de ajuste do relé (50/51)

2º passo: Para o relé mais afastado, escolher a menor curva de tempo. A [Figura 4.8.3.1](#) mostra esta curva.

3º passo: Com a corrente de curto trifásico  $I_{CC3\phi}$  a 85% da LT no trecho BC, calcular os múltiplos do relé B e do relé A, utilizando as equações (4.8.3.1) e (4.8.3.2).

$$M_B = \frac{I_{CC3\phi \text{ 85\% da LTbc}}}{RTC_B \cdot TAP_B} \quad (4.8.3.1)$$

$$M_A = \frac{I_{CC\ 3f\ 85\% \text{ da } LT_{bc}}}{RTC_A \cdot TAP_A} \quad (4.8.3.2)$$

4º passo: Com o múltiplo  $M_B$  e a curva escolhida no passo 2, obter o tempo de atuação do relé B, conforme indicado na **Figura 4.8.3.2**.

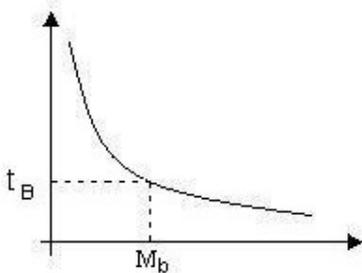


Figura 4.8.3.2 – Obtenção do tempo de atuação do relé B.

5º passo: Para um curto-circuito trifásico no ponto a 85% da  $LT_{BC}$ , e com o múltiplo  $M_A$  já definido, obter o tempo de atuação do relé A, de modo a realizar a coordenação com o relé B. Teremos, então:

$$T_A = T_B + \Delta t$$

6º passo: Com o tempo do relé A e o múltiplo  $M_A$ , definir o ponto 1 da **Figura 4.8.3.3** e extrair a curva do relé mais próxima deste ponto 1

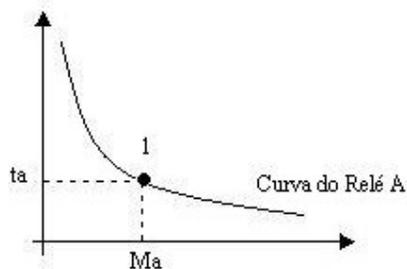


Figura 4.8.3.3 – Obtenção da curva do relé A.

A curva escolhida para o relé A não é definitiva. Deve-se verificar se a mesma coordena em todo o trecho com o relé B. Normalmente, o ponto mais conveniente para esta verificação é o próprio barramento B, local da instalação do  $TC_B$ . A verificação é feita de acordo com os passos a seguir.

7º passo: Para  $I_{CC3\phi}$  em B, calcular o múltiplo do relé A.

$$M_A = \frac{I_{CC3\phi C}}{RTC_A \cdot TAP_A} \quad (4.8.3.3)$$

8º passo: Calcular o tempo de atuação do relé A, entrando com  $M_A$  na curva do relé A.

9º passo: Verificar se o tempo encontrado no passo 8 obedece a inequação (4.8.3.4).

$$t_B \geq \Delta t \quad (4.8.3.4)$$

Se isto ocorrer, então a curva escolhida do relé A coordena com o relé B. Se isto não ocorrer, a curva do relé A não coordena com a do relé B. Então, ir para o passo seguinte.

10º passo: Deve-se então escolher uma outra curva para o relé A, até coordenar com o relé B.

Para relés a montante, basta repetir em seqüência todo o processo. Para um sistema em anel, basta utilizar um relé direcional para dar direcionalidade de atuação e realizar os passos descritos anteriormente para ambas as direções.

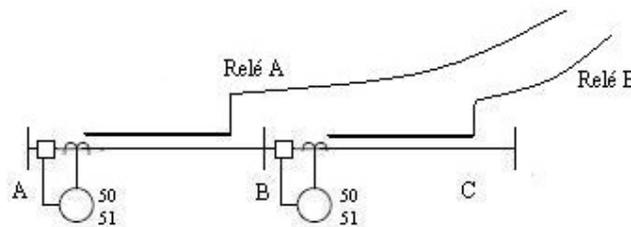


Figura 4.8.3.4 – Proteção e Coordenação de Relés de Sobrecorrente

## **CAPÍTULO 5 – PROGRAMA PARA CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO E COORDENAÇÃO DE RELÉS**

### **5.1 - Introdução**

A operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência se apóia em estudos e simulações do comportamento dos equipamentos frente a condições normais e anormais de operação, estas últimas associadas à abertura de circuitos, rejeição de carga, ocorrências de curto-circuitos, transitórios eletromagnéticos, transitórios de estabilidade, religamentos, etc.

Durante muito tempo, as simulações acima referidas eram realizadas em analisadores de rede analógicos que representavam o sistema elétrico em escala reduzida e nos quais se ajustavam valores de resistores, reatores, capacitores, cargas e geradores, sendo estes últimos representados por fontes de tensão com amplitude e ângulo de fase ajustáveis.

Com o desenvolvimento e a evolução dos computadores digitais, passou a ser viável efetuar tais simulações através de cálculos matemáticos que reproduzem a resposta dos diversos equipamentos. A modelagem e a simulação computacional do desempenho dos sistemas de potência passou a ser uma atividade rotineira. Existem modelos para representação dos equipamentos para cálculos de curto-circuito, fluxo de potência, transitórios eletromagnéticos, transitórios de estabilidade, etc.

Os programas mais conhecidos para análise e cálculo de curto-circuito são ANAFAS, de propriedade do CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica), e o ASPEN – OneLiner, este último utilizado por algumas empresas importantes dos setores de geração e transmissão.

Como já comentado em outro capítulo, o estudo de curto-circuito é para atendimento a diferentes aplicações, dentre elas a proteção. Como o objetivo fundamental do estudo de proteção é o ajuste dos parâmetros dos relés, necessitamos testar tais ajustes. Assim, é comum a realização de simulações de um conjunto de defeitos em pontos específicos do sistema, a fim de verificar se cada relé atuará de maneira correta e no tempo esperado. A verificação da efetiva atuação ou não do relé através de cálculos efetuados manualmente se torna bastante tediosa e, por isto, passível a erros.

O programa ASPEN realiza automaticamente os cálculos de tempo de atuação dos relés para um conjunto de casos de curto-circuitos, como especificado pelo usuário, e possui, ainda, uma vasta biblioteca de relés cuja atuação pode ser simulada internamente pelo programa.

Neste capítulo faremos uma breve descrição das facilidades encontradas no programa ASPEN e apresentaremos algumas informações sobre sua utilização.

## **5.2 - Principais Características do ASPEN (OneLiner)**

O ASPEN (OneLiner) é um programa de curto circuito e coordenação de relés que visa dar apoio ao estudo de proteção de sistemas elétricos.

O programa alivia o engenheiro de proteção na tarefa de pesquisa dos dados de relés disponibilizados pelos fabricantes e na tarefa de traçado de suas curvas características de operação. Pode-se solicitar, a qualquer momento, alterações nos ajustes dos relés e na configuração da rede elétrica e se observar, imediatamente, o resultado das mudanças implementadas, já que o programa realiza novamente e prontamente os cálculos desejados. O programa trabalha recebendo dados de rotinas próprias específicas para os cálculos de fluxo de potência, de forma que o efeito da condição de carga pré-falta pode ser prontamente incorporado aos resultados desejados a serem extraídos dos cálculos de curto circuito.

A interface gráfica do programa facilita a manipulação tornando as funções mais interativas com o usuário. A Figura 5.2.1 mostra a tela do ASPEN.

Na versão 2001 do programa ASPEN, é possível modelar transformadores de 2 ou de 3 enrolamentos, transformadores defasores, linhas de transmissão em modelo pi, capacitores série, geradores, cargas elétricas, acoplamento mútuos de seqüência zero, etc.

Para apoio aos estudos de proteção, são disponíveis modelos de religadores, disjuntores, fusíveis, relés de sobrecorrente e relés de distância. Para representação dos relés, existe uma vasta biblioteca a partir da qual o usuário pode editar a configuração de cada relé ou até mesmo implementar uma nova configuração.

A atividade de coordenação dos relés pode ser monitorada. A coordenação é feita de modo interativo, ou seja, o ajuste é feito simulando falhas em vários pontos, de forma simultânea.

O módulo de curto-circuito trabalha com previsão de troca de dados com outros programas conhecidos de cálculo de curto, permite a simulação de todos os tipos clássicos de defeito, incluindo defeitos simultâneos e defeitos entre linhas, e utiliza pouca memória para execução dos cálculos. Os resultados dos cálculos são mostrados gráficamente no diagrama, tanto as amplitudes e ângulos de fase das correntes de curto circuito e tensões nos barramentos quanto os tempos de atuação dos relés.

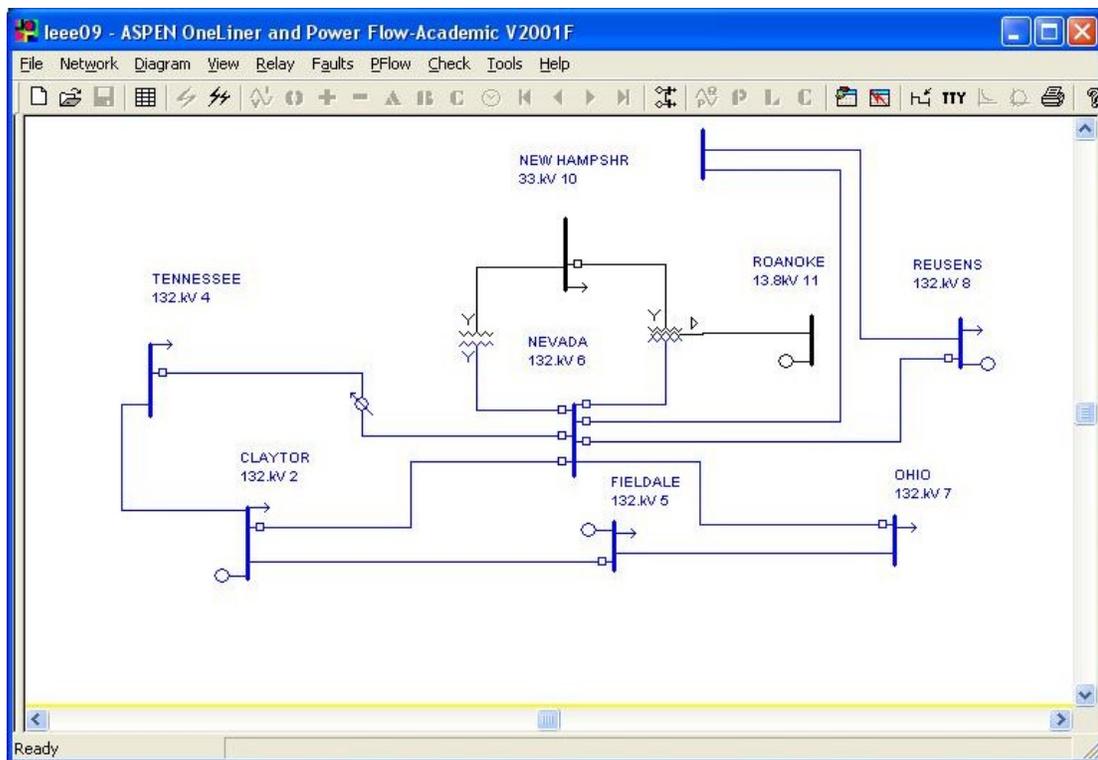


Figura 5.2.1 – Tela do programa ASPEN-OneLiner

A exportação e importação de dados de outros programas conhecidos é feita através de módulos de conversão, estando disponível nesta versão conversões para ANAFAS, IEEE, ELECTROCON, CYME, GE PLSF, PECO.

No módulo de avaliação de disjuntor é possível avaliar a exposição de cada disjuntor frente às correntes de curto-circuito que ele deve interromper, para isto disponibili-

zando, ainda, os valores da relação reatância / resistência. Este módulo não é parte padrão do programa ASPEN – OneLiner.

A base de dados do programa é organizada de forma a facilitar o armazenamento dos parâmetros associados aos relés e aos disjuntores. Estes dados são dados reais dos equipamentos. A base de dados de relés do ASPEN permite, ainda, o armazenamento dos ajustes atuais adotados para os relés. Isto facilita a implementação dos estudos para reavaliação dos ajustes, normalmente realizados após as alterações de configuração e carregamento do sistema de potência.

### **5.3 – Modelos dos elementos do Aspen OneLiner**

O programa Aspen permite representar equipamentos tais como transformadores, elementos shunts, linha de transmissão, capacitores série, geradores, cargas elétricas, acoplamentos de seqüência zero, defasadores e relés, com as tensões internas pré-falta das fontes equivalentes fixadas no valor nominal 1,0 pu ou em qualquer outro valor desejado ou extraído dos resultados dos cálculos de fluxo de potência.

Apresentaremos neste capítulo uma breve descrição dos principais elementos implementados no programa Aspen OneLiner bem com de sua forma manual de entrada de dados.

#### **Barras**

As barras são identificadas pelo nome e pela tensão nominal, podendo também ser numeradas e ser divididas por área e por zonas para facilitar a organização do conjunto de dados de um determinado sistema. Cada barra pode ter mais de um disjuntor associando a ela.

A Figura 5.3.1 mostra o layout de entrada de dados de barra.

Figura 5.3.1 – Caixa de entrada de dados de barra.

### **Gerador Síncrono**

Cada barra pode ser associada ao modelo de um gerador equivalente, mas este gerador pode representar até um máximo de 32 unidades de geração.

Para os estudos de curto-circuito, o gerador é modelado pelos equivalentes de Thévenin associados às três redes de seqüência. O equivalente da seqüência positiva, por exemplo, é constituído por uma fonte de tensão em série com uma impedância. Existem três diferentes impedâncias de seqüência positiva a serem utilizadas: as impedâncias subtransitória, transitória e a síncrona. No momento de aplicação do curto, o usuário pode escolher qual delas será utilizada. A fonte de tensão referida fica ausente nos circuitos equivalentes de seqüência negativa e zero, como indicado na Figura 5.3.2.

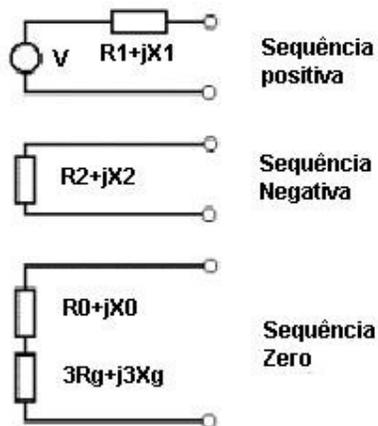


Figura 5.3.2 – Equivalente de Thevenin das redes de seqüência do gerador.

Na figura 5.3.2 temos:

$R_1 + jX_1 \Rightarrow$  impedância de seqüência positiva;

$R_2 + jX_2 \Rightarrow$  impedância de seqüência negativa;

$R_0 + jX_0 \Rightarrow$  impedância de seqüência zero;

$3(R_G + jX_G) \Rightarrow$  impedância entre o neutro e o terra do gerador.

Normalmente o efeito do carregamento pré-falta do sistema elétrico é desprezado, de modo que as tensões internas de todos os geradores são fixadas em 1.0 pu e ângulo  $0^\circ$ . Quando o efeito do carregamento é para ser considerado, a fixação do valor da tensão interna pode se apoiar, por exemplo, nos resultados dos cálculos das rotinas de fluxo de potência também disponíveis pelo programa.

A Figura 5.3.3 mostra um layout da entrada de dados para representação de gerador.

The image shows a software dialog box titled "Generating Unit Info". At the top, there are two input fields: "ID=" with the value "1" and "Unit rating=" with the value "100" and the unit "MVA". Below this is a section titled "Impedances (pu based on unit MVA)" containing five rows of complex number inputs: "Subtransient", "Transient", "Synchronous", "- sequence", and "0 sequence". Each row has a real part input field (all containing "0.") and an imaginary part input field (all containing "5."), with a "+j" symbol between them. A "Fill" button is located to the right of the first row. Below this is a section titled "Neutral Impedance (in actual Ohms)" with two input fields for real and imaginary parts, both containing "0.". Next is a section titled "Scheduled generation (MW)" with one input field containing "0.". The final section is titled "P and Q limits (MW and MVAR)" and contains four input fields: "Pmax=" (9999), "Qmax=" (9999), "Pmin=" (-9999), and "Qmin=" (-9999). At the bottom of the dialog are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Figura 5.3.3 – Layout de entrada de dados de gerador.

### **Carga Elétrica**

Da mesma forma que para os geradores, o modelo de carga de barra pode ser constituído por até 32 unidades de carga. Cada unidade de carga pode ser decomposta em suas componentes de potência constante, de corrente constante e de impedância constante.

Cada carga agregada a uma determinada barra é modelada como uma admitância shunt entre a barra e a terra. A admitância de carga ( $Y$ ) é calculada pela expressão 5.3.1., a seguir:

$$Y = \frac{f}{3 \cdot V \cdot V} \quad (5.3.1),$$

onde:

$f \Rightarrow$  carga em ( MW + j MVAR )

$V \Rightarrow$  tensão fase neutro da barra.

O programa utiliza a mesma admitância shunt para as três seqüências, a menos que o usuário indique que a carga não é aterrada. Neste caso, a admitância de seqüência zero é anulada. A Figura 5.3.4 mostra o layout de entrada de dados de carga.

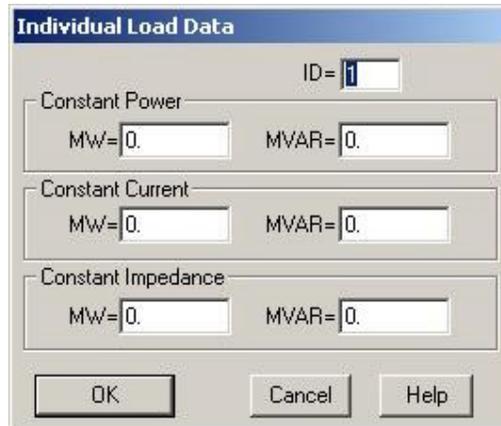


Figura 5.3.4 – Layout de entrada de dados de carga.

### **Elemento Shunt**

Cada barra também pode apresentar um elemento shunt, este novamente constituído por até 32 unidades. As componentes de seqüência positiva e zero do elemento shunt podem ser especificadas separadamente. A componente de seqüência negativa é considerada igual à de seqüência positiva.

Nos estudos de curto-circuito e fluxo de potência os elementos shunt são modelados como admitâncias passivas entre a barra associada e a terra.

A Figura 5.3.5 mostra o layout da tela de entrada de dados do elemento shunt.

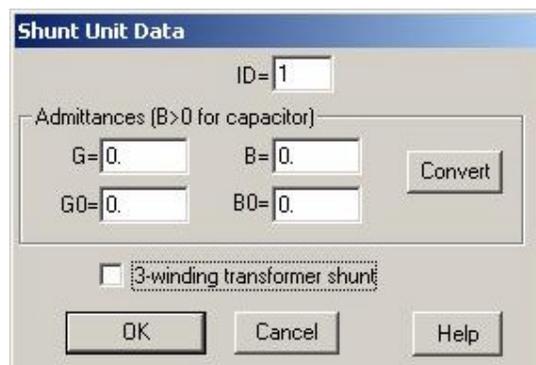


Figura 5.3.5 – Layout de entrada de dados de elemento shunt.

## Linha de Transmissão

As linhas de transmissão são modeladas por seus circuitos *pi* equivalentes. Conforme indicado na Figura 5.3.6, as admitâncias terminais shunt podem ser consideradas diferentes para permitir a representação conjunta equivalente de linhas diferentes em série ou para incorporação automática de compensações em derivação diferentes nos terminais. Este desbalanço no elemento shunt pode, portanto, ser utilizado para indicar a presença de reatores ou capacitores de barra.

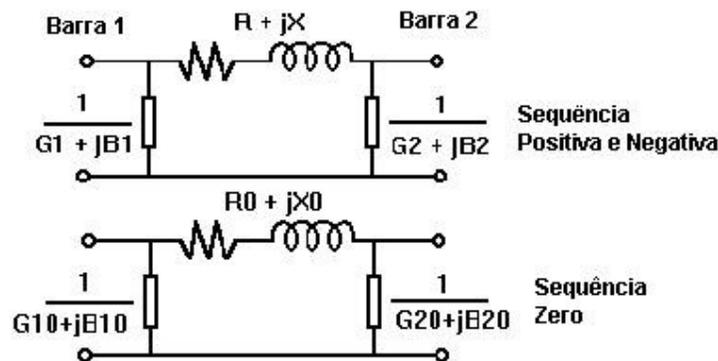


Figura 5.3.6 – Modelo PI de linha de transmissão

A Figura 5.3.7 mostra o layout de entrada de dados de linha.

A imagem mostra a janela de diálogo "Transmission Line Data" de um software de engenharia elétrica. O título da janela é "Transmission Line Data".

Na parte superior, há campos para "Name=" e "Ckt ID=1". Abaixo, "Length=0." com uma unidade "kt" selecionada e um campo "Type" com uma lista suspensa.

O grupo "Branch Parameters" contém um botão "Recompute from table" e campos para os parâmetros de série e shunt:

- R=0.0, X=0.0
- R0=0.0, X0=0.0
- G1=0.0, B1=0.0, G2=0.0, B2=0.0
- G10=0.0, B10=0.0, G20=0.0, B20=0.0

O grupo "Current Ratings (A)" contém campos para A: 0.0, B: 0.0, C: 0.0, D: 0.0.

Na base, há um campo "Metered at:" com o valor "SE ANGRA 500. kV" selecionado. Botões "Mutuals...", "OK", "Cancel" e "Help" estão na base da janela. Na parte inferior, há o texto "Last changed Dec 06, 2007".

Figura 5.3.7 – Layout de entrada de dados de linha de transmissão

## Transformadores

O programa ASPEN dispõe, também, de modelos para representação de transformadores de dois e de três enrolamentos, incluindo autotransformadores. A representação do efeito de variação de tape está também disponível para o usuário. Os modelos do programa são baseados no artigo [12]. Os transformadores podem ser ligados em delta-delta, delta-estrela e estrela-estrela, aterrado ou não. A Figura 5.3.8 apresenta o layout de entrada de dados de transformador.

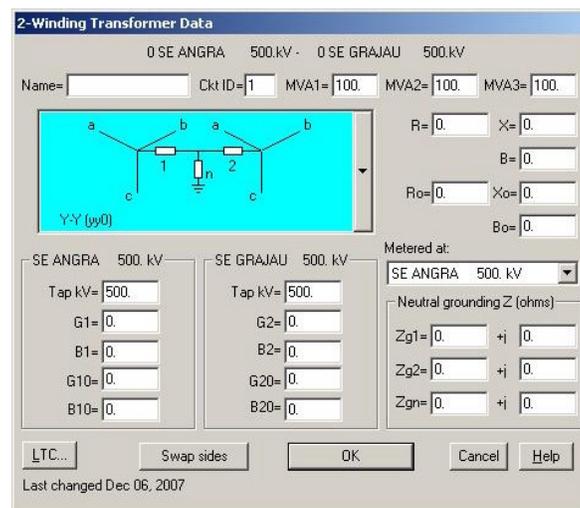


Figura 5.3.8 – Layout de entrada de dados de transformadores

## Relés de Proteção

Como já mencionado anteriormente, o programa possui uma vasta biblioteca de modelos de relés. Estes modelos são dotados de curvas de operação corrente x tempo padronizadas, sendo dada ao usuário a opção de implementação de outras curvas de tempo de operação. Para estes mesmos modelos, o programa permite, ainda, a inserção de dados definidos pelo próprio usuário, para os seguintes tipos de relés:

- Relés de sobrecorrente de fase
- Relés de sobrecorrente de neutro
- Fusíveis
- Relés de distância

A introdução dos dados dos relés pode ser efetivada via arquivos de texto no formato adequado ou através de uma caixa de diálogo. A Figura 5.8.9 mostra o layout da caixa de entrada de dados de um dos modelos disponíveis para um relé de sobrecorrente de fase, no qual os principais campos são:

The dialog box 'Overcurrent Phase Relay Info' contains the following fields and controls:

- Header: 0 BARRA 3 230.KV - 0 BARRA 2 230.KV 1L
- ID: A3
- CT ratio: 600:5
- CT Connection:  Wye  Delta
- Time Element section:
  - Time dial: 0.05
  - Curve: SEL-IEC-SI
  - Tap (A): 4.7
  - Tap unit: GE1
  - Directional
- Instantaneous Element section:
  - Pri. A: 2941
  - Delay: 0.03 sec.
  - Directional
  - Sensitive to dc offset
- Time adder: 0 sec.
- Time mult: 1
- Char. angle: 30
- Reset time: 0
- Comments: (empty text box)
- Relay Database section:
  - Linked relays: (empty list box with up/down arrows and a button)
  - Data mapping: (empty text box with a button)
- Buttons: Database, OK, Cancel, Help
- Footer: Last changed Nov 25, 2007

Figura 5.8.9 – Layout de entrada de dados de relé de sobrecorrente de fase

ID = identificação do relé.

CT = relação de transformação do TC

Time dial = alavanca de tempo do relé

Curve = local para selecionar uma curva da temporização

Tap = ajuste de tape

Tap unit = são unidades de tape disponíveis

Pri. A = corrente primária de ajuste do elemento instantâneo

A Figura 5.8.10 mostra o layout da caixa de entrada de dados para relés de neutro, onde os campos diferentes daqueles associados ao layout de entrada de dados de relé de sobrecorrente de fase são:

Char. angle = ângulo de conjugado máximo do elemento direcional considerado;

Polarized by  $V_o/I_o$  = grandezas de polarização do elemento direcional;

Operates on = grandeza de operação do relé.

Overcurrent Ground Relay Info

0 BARRA 3 230.kV - 0 BARRA 2 230.kV 1L

ID= A3r

CT ratio= 600:5

Time Element

Time dial= 0.05 Curve SEL-IEC-SI

Tap (A)= 1.5 Tap unit GE1

Directional

Instantaneous Element

Pri. A= 0 Delay= 0 sec.

Directional  Sensitive to dc offset

Time adder= 0 sec. Time mult= 1

Char. angle= -90 Polarized by  $V_o/I_o$

CT at Terminal at BARRA 3 230. kV

Operates on  $3I_o$  Reset time= 0

Comments=

Relay Database

Linked relays=

Data mapping=

Database OK Cancel Help

Last changed Dec 08, 2007

Figura 5.8.10 – Layout de entrada de dados de relé de sobrecorrente de neutro

## CAPÍTULO 6 – EXEMPLO DE COORDENAÇÃO DE RELÉ DE SOBRECORRENTE

### 6.1 – Considerações do sistema exemplo

Os ajustes de coordenação dos relés de sobrecorrente apresentados neste capítulo foram determinados para uma configuração de sistema específica e que é apresentada na Figura 6.1.1. A coordenação foi simulada no programa ASPEN OneLiner, versão 2001.

O exemplo tem por objetivo ilustrar a implementação da proteção contra curto-circuitos em linhas de transmissão utilizando relés de sobrecorrente, sem entrar nos detalhes relativos à proteção específica associadas aos transformadores indicados.



Figura 6.1.1 – Sistema elétrico utilizado no exemplo

O dados de sistema são mostrados na tabela 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3

Tabela – 6.1.1 – Dados de tensão das barras

BARRA	TENSÃO
1	6,6KV
2	230KV
3	230KV
4	230KV
5	230KV
6	6,6KV

Tabela 6.1.2 – Dados das LT's do sistema

DADOS DAS LT's				
Circuitos	Impedâncias Próprias			
	R <sub>1</sub> (pu)	X <sub>1</sub> (pu)	R <sub>0</sub> (pu)	X <sub>0</sub> (pu)
LT 2-3	0,0012	0,028	0,0022	0,048
LT 3-4	0,0008	0,0175	0,0017	0,0346
LT 4-5	0,001	0,0192	0,002	0,0392

Tabela 6.1.3 – Dados dos elementos do sistema

DADOS DOS ELEMENTOS				
Transformadores	X <sub>1</sub> (pu)	X <sub>0</sub> (pu)		
barra 1 - barra2	0,0458	0,0458		
Barra 5 – barra 6	0,0189	0,0189		
Geradores	X''d (pu)	X'd (pu)	Xd (pu)	X <sub>0</sub> (pu)
barra 1	0,0527	0,0527	0,0527	0,1024
barra 6	0,0447	0,0447	0,0477	0,0894

A potência base do sistema foi escolhida igual a 100MVA. As simulações aqui apresentadas não consideram o efeito do carregamento pré-falta do sistema.

## 6.2 – Ajuste dos relés de sobrecorrente (50/51)

Como o sistema estudado tem geração própria em ambos os lados, os ajustes serão realizados em duas etapas. Na primeira etapa ajustaremos os relés A2, B3 e C4 e de forma a coordenarem entre si. Na segunda etapa ajustaremos os relés C5, B4 e A3, que também deverão coordenar entre si. O diagrama do sistema da Figura 6.2.1 apresenta o posicionamento dos relés.

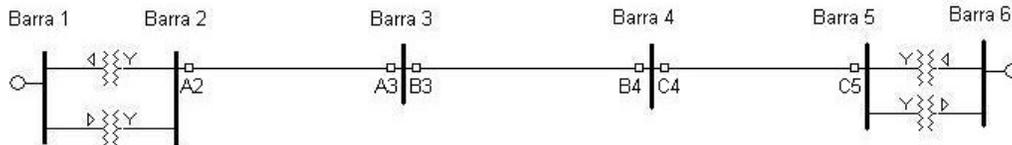


Figura 6.2.1 – Diagrama com a nomenclatura dos relés.

Para ilustrar o procedimento de ajuste do sistema, foi considerado o relé numérico SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*), modelo SEL-421, e que é um relé digital multifuncional. Para caracterizar o elemento temporizado do relé, foi implementada uma das curvas da Norma IEC [3], tipo A (normal inversa), disponível para ajuste do relé SEL referido. Abaixo, na expressão 6.2.1, indicamos a equação da curva implementada,

$$t = \frac{0,14}{M^{0,02} - 1} \quad (6.2.1)$$

onde:

$t \Rightarrow$  tempo de atuação do relé.

$M \Rightarrow$  múltiplo do tape.

O programa de simulação permite a implementação de outras curvas, bastando apenas mudar os parâmetros da equação.

No **ANEXO A** mostramos algumas curvas do elemento temporizado.

### **Critérios de ajuste a serem adotados no exemplo**

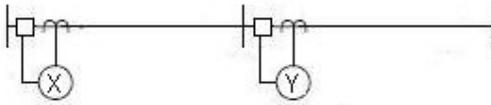


Figura 6.2.2 – Relés X e Y a serem coordenados.

A Figura 6.2.2 indica dois relés X e Y, posicionados do mesmo lado em dois circuitos quaisquer consecutivos no sistema da Figura 6.2.1. As seguintes regras serão fixadas na definição dos ajustes e coordenação:

- X deve operar com  $1/3$  da corrente mínima de defeito (sem considerar defeitos que envolvam a terra) vista por Y (critério adotado por não conhecermos a corrente de carga).
- Os relés a jusante de Y (apenas o relé X na figura 6.2.2) devem sempre operar para uma máxima corrente vista por Y, e nunca antes do tempo de coordenação, que neste exemplo será considerado 0.5s, um valor conservador.
- O tempo considerado para a atuação do elemento instantâneo do relé será fixado em 0.03s.

### **Primeira etapa de ajustes**

Para ajuste dos relés A2, B3 e C4, foram simuladas condições de curto-circuito trifásico, máximo e mínimo, a 85% da extensão do trecho de linha protegida. A tabela 6.2.1

mostra os valores extraídos das simulações de curto-circuito, relativamente à contribuição da fonte de tensão do lado esquerdo.

É importante notar que a condição de corrente máxima de curto para a primeira etapa ocorre para operação paralela dos dois transformadores “barra1 – barra 2” e aplicação de curto trifásico em determinado ponto do sistema. Já a condição de corrente mínima de curto ocorre quando um dos transformadores “barra1 – barra 2” está fora de operação e quando o curto aplicado é o fase-fase.

Tabela 6.2.1 – Correntes de curto-circuito para ajuste dos relés A2, B3 e C4.

BARRA	3	4	5
$I_{CC3\phi}(\text{max})$	3303A	2684A	2227A
$I_{CC2\phi}(\text{min})$	1718A	1509A	1331A
$I_{CC3\phi} 85\% LT$	3496A	2762A	2285A

As relações de transformação dos TC’s indicadas abaixo foram escolhidas de forma a obedecer a normalização ABNT.

#### Relé C4.

Determinação da relação de transformação do TC (transformador de corrente):

##### a) Critério da carga

Na ausência de dados de carga nominal, admitimos, no primário do TC,  $I_{nom} = I_{minCC} / 3$

(do circuito protegido),  $= (1/3) \cdot 1331 = 443.6 \text{ A}$ . Logo,  $RTC = \frac{500}{5}$

b) Critério da corrente de curto circuito, para FS (Fator de Sobrecorrente) = 20:

$$I_{nom} = \frac{I_{CCMAX \text{ NO TC}}}{20} = 2684 / 20 = 134 \text{ A}$$

Logo, prevalece o valor  $RTC = 500/5$  (ABNT) para a relação de transformação do TC de alimentação do relé C4.

Escolha do tape

$$\frac{I_n}{RTC} \leq \text{tape} \leq \frac{I_{minCC}}{RTC \cdot 1,5} \Rightarrow \frac{443,6}{100} \leq \text{tape} \leq \frac{1331}{100 \cdot 1,5} \Rightarrow 4,43 \leq \text{tape} \leq 8,8, \text{ então}$$

tape do relé C4 = 4,5 A, valor escolhido mais próximo do mínimo, desta forma melhoramos o fator de erro.

$$\text{Ajuste do Instantâneo} = I_{CC3\phi} 85\% LT / RTC = 22,85A$$

Para os demais relés são adotados os mesmos critérios realizada para o relé C4.

### **Relé B3.**

a) *Critério da carga para RTC*

$$I_n = \frac{1}{3} I_{\min CC} \text{ do circuito protegido} = \frac{1}{3} \cdot 1331 = 443,6A, \text{ logo RTC:}$$

$$RTC = \frac{500}{5}$$

b) *Critério FS (Fator de Sobrecorrente)*

$$I_n = \frac{I_{CCMAX NO TC}}{20} = 203A$$

Prevalece a relação RTC = 500/5 ABNT

*Escolha do tape*

$$\frac{I_n}{RTC} \leq \text{tape} \leq \frac{I_{\min CC}}{RTC \cdot 1,5} \Rightarrow \frac{443,6}{100} \leq \text{tape} \leq \frac{1331}{100 \cdot 1,5} \Rightarrow 4,43 \leq \text{tape} \leq 8,8, \text{ então}$$

tape do relé B3 = 4,5 A

$$\text{ajuste do Instantâneo} = I_{CC3\phi} 85\% LT / RTC = 27,62A$$

### **Relé A2**

a) *Critério da carga para RTC*

$$I_n = \frac{1}{3} I_{\min CC} \text{ (do circuito protegido)} = \frac{1}{3} \cdot 1509 = 503A, \text{ logo RTC:}$$

$$RTC = \frac{500}{5}$$

b) *Critério FS (Fator de Sobrecorrente)*

$$I_n = \frac{I_{CCMAX NO TC}}{20} = 140A$$

Prevalece o valor  $RTC = 500/5$  ABNT

*Escolha do tape*

$$\frac{I_n}{RTC} \leq \text{tape} \leq \frac{I_{\min CC}}{RTC \cdot 1,5} \Rightarrow \frac{503}{100} \leq \text{tape} \leq \frac{1509}{100 \cdot 1,5} \Rightarrow 5,03 \leq \text{tape} \leq 10,6, \text{ então}$$

tape do relé A2 = 5,0 A, valor escolhido mais próximo do mínimo.

$$\text{ajuste do Instantâneo} = I_{CC3\phi} 85\% LT / RTC = 34,97A$$

### **Segunda etapa de ajuste**

Para ajuste dos relés A3, B4 e C5, foram simuladas condições de curto-circuito máximo, mínimo e trifásico a 85% do trecho da linha. A tabela 6.2.2 mostra os resultados obtidos destas simulações, do mesmo modo como realizado na primeira etapa, mas agora considerando a contribuição de curto-circuito associada à fonte do lado direito.

A condição de maior corrente de curto para a segunda etapa é quando os dois transformadores da barra 5-6 estão em operação, para um curto trifásico aplicado e próximo aos TC's em consideração. Já a condição de menor corrente de curto ocorre com um dos transformadores da barra 5-6 fora de operação e aplicação de curto bifásico.

Tabela 6.2.2 – Correntes de curto-circuito para ajuste dos relés A3, B4 e C5.

BARRA	4	3	2
$I_{CC3\phi}(\text{max})$	5702A	4079A	2802A
$I_{CC2\phi}(\text{min})$	2624A	2166A	1693A
$I_{CC3\phi} 85\% LT$	2941A	4261A	6102A

### **Relé A3.**

a) *Critério da corrente de carga* para cálculo de RTC

$$I_n = \frac{1}{3} I_{\min CC} (\text{do circuito protegido}) = \frac{1}{3} \cdot 1693 = 564,3. \text{ Logo, } RTC = \frac{600}{5}$$

b) *Critério do curto circuito* para FS (Fator de Sobrecorrente) = 20

$$I_n = \frac{I_{CCMAX \text{ NO TC}}}{20} = 165,15 \text{ A}$$

Prevalece a relação RTC = 600/5 ABNT

*Escolha do tape*

$$\frac{I_n}{RTC} \leq \text{tape} \leq \frac{I_{\min}}{RTC \cdot 1,5} \Rightarrow \frac{564,3}{120} \leq \text{tape} \leq \frac{1693}{120 \cdot 1,5} \Rightarrow 4,70 \leq \text{tape} \leq 21,16.$$

Então, tape do relé A3 = 4,7 A

$$\text{ajuste do Instantâneo} = I_{CC3\phi} 85\% LT / RTC = 2941 / 120 = 24,51 \text{ A}$$

#### **Relé B4.**

a) *Critério da corrente de carga*, para determinação de RTC

$$I_n = \frac{1}{3} I_{\min CC} (\text{do circuito protegido}) = \frac{1}{3} \cdot 1693 = 564,3.$$

$$\text{Logo, } RTC = \frac{600}{5}$$

b) *Critério da corrente de curto circuito*, para FS (Fator de Sobrecorrente)= 20

$$I_n = \frac{I_{CCMAX \text{ NO TC}}}{20} = 134,2 \text{ A}$$

Prevalece a relação RTC = 600/5 ABNT

*Escolha do tape*

$$\frac{I_n}{RTC} \leq \text{tape} \leq \frac{I_{\min}}{RTC \cdot 1,5} \Rightarrow \frac{564,3}{120} \leq \text{tape} \leq \frac{1693}{120 \cdot 1,5} \Rightarrow 4,70 \leq \text{tape} \leq 21,16.$$

Então, tape do relé B4 = 4,7 A

$$\text{ajuste do Instantâneo} = I_{CC3\phi} 85\% LT / RTC = 4262 / 120 = 35,51 \text{ A}$$

### Relé C5.

a) Critério da corrente de carga para determinação da RTC

$$I_n = \frac{1}{3} I_{\min CC} (\text{do circuito protegido}) = \frac{1}{3} \cdot 2166 = 722.$$

$$\text{Logo, } RTC = \frac{700}{5}$$

b) Critério da corrente de curto circuito para FS (Fator de Sobrecorrente) = 20

$$I_n = \frac{I_{CCMAX \text{ NO TC}}}{20} = 111,2A$$

Prevalece a relação  $RTC = 700/5$  (ABNT), valor mais próximo encontrado de  $I_n=722$  na norma.

Escolha do *tape*

$$\frac{I_n}{RTC} \leq \textit{tape} \leq \frac{I_{\min CC}}{RTC \cdot 1,5} \Rightarrow \frac{722}{140} \leq \textit{tape} \leq \frac{1693}{140 \cdot 1,5} \Rightarrow 5,15 \leq \textit{tape} \leq 8,06, \text{ então}$$

*tape* do relé C5 = 5,2 A

$$\text{ajuste do Instantâneo} = I_{CC3\phi} 85\% LT / RTC = 6102 / 120 = 50,85 \text{ A}$$

A tabela 6.2.3 mostra o resumo dos ajustes dos relés, com indicação dos valores determinados para a relação de transformação RTC, para o *tape* escolhido e a corrente de ajuste do elemento instantâneo de cada um dos relés.

Tabela 6.2.3 – Resumo dos ajustes dos relés

RELÉ	RTC	TAPE	INSTANTÂNEO primário do TC
C4	500/5	4,5A	2285A
B3	500/5	4,5A	2762A
A2	500/5	5,0A	3416A
A3	600/5	4,7A	2941A
B4	600/5	4,7A	4261A
C5	700/5	5,2A	6102A

### 6.2.1 – Resultados obtidos na coordenação dos relés de sobrecorrente (50/51)

Após executado o ajuste de tape dos relés e determinada a relação de transformação de cada um dos TC's, a alavanca de tempo (time dial) de cada relé foi ajustada utilizando uma das ferramentas do programa Aspen OneLiner. O ajuste pode ser efetivado de forma progressiva até que a alavanca de tempo do relé atinja o valor final associado à curva desejada. O que o programa faz é entrar com a variável “múltiplo da corrente de curto” na equação do relé ajustado e retornar o tempo de atuação do mesmo. A utilização do programa facilitou o ajuste, evitando a dificuldade de procurar a curva desejada e de traçado da curva final de ajuste da coordenação.

De acordo com um dos critérios adotado para o ajuste deste exemplo, o tempo de coordenação  $\Delta T$  foi ajustado em 0,5s, um valor compatível com os tipos de equipamentos que temos disponível atualmente. Sendo assim, foram coordenados os ajustes dos relés de sobrecorrente (50/51), com o tempo de ajuste do elemento instantâneo fixado em 0.03s.

A tabela 6.2.1.1 mostra os resultados obtidos no processo de coordenação de ajustes do grupo de relés C4, B3 e A2 para um curto trifásico (maior corrente de curto) na barra 5 do sistema exemplo. Os demais relés indicados não atuam devido ao bloqueio de operação exercido pelo elemento direcional.

Tabela 6.2.1.1 – Tempo de atuação dos relés para curto trifásico na barra 5

	Relé	Curto Trifásico Barra 5	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	0,22s
	B3	0,168	0,72s
	A2	0,277	1,30s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	9999s
	C5	0,274	9999s

A tabela 6.2.1.2 apresenta os tempos de atuação para um curto a 86% da LT 4-5. O relé C4 atua de forma temporizada para uma corrente de curto além da extensão 85% da linha, como era esperado. Desta forma, ele não sobrepõe sua atuação quando da

operação normal do elemento de proteção instantâneo do relé da linha seguinte. Já o relé C5 atua instantaneamente.

Tabela 6.2.1.2 – Tempo de atuação dos relés para curto máximo a 86% da LT entre a barra 4 e a barra 5

	Relé	Curto 86% da LT 4-5	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	0,21s
	B3	0,168	0,71s
	A2	0,277	1,27s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	9999s
	C5	0,274	0,03s

A tabela 6.2.1.3 mostra os resultados da coordenação entre os relés B3 e A2 para um curto trifásico na barra 4.

Tabela 6.2.1.3 - Tempo de atuação dos relés para curto trifásico na barra 4

	Relé	Curto Trifásico Barra 4	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	0,65s
	A2	0,277	1,15s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	9999s
	C5	0,274	0,91s

A tabela 6.2.1.4 mostra os tempos de operação da proteção para um curto trifásico a 86% da LT 3-4. A coordenação ocorre entre os relés A2 e B3. Já o relé B4 atua instantaneamente, tendo o relé C5 como retaguarda. Os demais relés não atuam devido à ação do elemento direcional de corrente.

Tabela 6.2.1.4 - Tempo de atuação dos relés para curto máximo a 86% da LT entre a barra 3 e barra 4

	Relé	Curto 86% da LT 3-4	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	0,64s
	A2	0,277	1,13s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	0,03s
	C5	0,274	0,94s

A tabela 6.2.1.5 apresenta os tempos de atuação e ilustra a coordenação entre os relés B4 e C5, e ainda a atuação do relé A2, com o objetivo de isolar o defeito.

Tabela 6.2.1.5 - Tempo de atuação dos relés para curto trifásico na barra 3

	Relé	Curto Trifásico da Barra 3	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	9999s
	A2	0,277	1,02s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	0,59s
	C5	0,274	1,09s

A tabela 6.2.1.6 apresenta os tempos de atuação e ilustra a coordenação entre os relés B4 e C5 e a atuação do relé A2, agora para curto trifásico na barra 3.

Tabela 6.2.1.6 - Tempo de atuação dos relés para curto a 86% da LT entre a barra 2 e barra 3

	Relé	Curto 86% da LT 2-3	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	9999s
	A2	0,277	0,99s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	0,61
	C5	0,274	1,14s

A tabela 6.2.1.7 – mostra o tempo de atuação e a coordenação do grupo relés A3, B4 e C5, para curto trifásico na barra 2. Os demais relés não atuam devido ao efeito do elemento direcional de corrente.

Tabela 6.2.1.7 - Tempo de atuação dos relés para curto trifásico na barra 2

	Relé	Curto Trifásico da Barra 2	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	9999s
	A2	0,277	9999s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	0,21s
	B4	0,171	0,73s
	C5	0,274	1,40s

A tabela 6.2.1.8 mostra os tempos de atuação da proteção para um curto a 86% da LT 3-2. O relé A3 atua temporizado para um além da extensão 85% da linha protegida, como era esperado. Desta forma, ele não sobrepõe sua atuação instantânea à ação de proteção da linha a jusante. Já o relé A2 atua instantaneamente.

Tabela 6.2.1.8 - Tempo de atuação dos relés para curto a 86% da LT entre a barra 3 e barra 2

	Relé	Curto 86% da LT 3-2	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	9999s
	A2	0,277	0,03s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	0,21s
	B4	0,171	0,71s
	C5	0,274	1,35s

As tabelas 6.2.1.9 e 6.2.1.10 mostram o tempo de atuação e ilustram a coordenação para os demais casos críticos.

Tabela 6.2.1.9 - Tempo de atuação dos relés para curto a 86% da LT entre a barra 4 e barra 3

	Relé	Curto 86% da LT 4-3	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	0,03s
	A2	0,277	1,04s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	0,58s
	C5	0,274	1,07s

Tabela 6.2.1.10 - Tempo de atuação dos relés para curto a 86% da LT entre a barra 5 e barra 4

	Relé	Curto 86% da LT 5-4	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4	0,05	9999s
	B3	0,168	0,66s
	A2	0,277	1,17s
Relés coordenados entre si	A3	0,05	9999s
	B4	0,171	9999s
	C5	0,274	0,88s

Segue, no **ANEXO B**, as curvas de tempo para os grupos de relés coordenados entre si, o grupo formado pelos relés C4, B3 e A2 e o grupo formado pelos relés A3, B4 e C5. As lado das curvas aparecem indicados o tipo de curto e o tempo de atuação do relé.

### 6.3 – Ajuste dos relés de sobrecorrente de neutro (51N)

Para os relés de sobrecorrente de neutro deste item, foram selecionadas as mesmas curvas de operação mencionadas anteriormente para os relés de sobrecorrente de fase. A polarização utilizado no relé é  $V_o, I_o$ , ângulo  $90^\circ$ .

Crítérios a serem adotados no exemplo:

- A corrente de carga considerada no exemplo é a mesma utilizada no ajuste do relé de sobrecorrente de fase.
- O tempo de coordenação mínimo entre os relés é de 0.5s

A figura 6.3.1 mostra o diagrama do circuito com a nomenclatura utilizada para os relés de neutro.

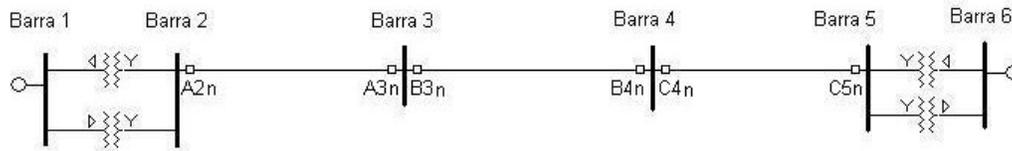


Figura 6.3.1 – Diagrama unifilar com nomenclatura dos relés de neutro

Para os relés de neutro, a inequação 4.6.1.2 abaixo apresenta a faixa de ajustes normalmente adotada.

$$0,1 \cdot I_{NOMINAL} \leq I_{AJUSTE \text{ DO RELÉ DE NEUTRO}} \leq 0,45 \cdot I_{NOMINAL} \quad (4.6.1.2)$$

O valor de ajuste no presente exemplo foi fixado em:

$$I_{AJUSTE \text{ DO RELÉ DE NEUTRO}} = 0,30 \cdot I_{NOMINAL}$$

Dividimos o trabalho de ajustes em dois grupos: grupo 1: o dos relés C4n, B3n e A2n e grupo 2: o dos relés A3n, B4n e C5n.

As relações de transformação de corrente RTC consideradas nos cálculos a seguir para os relés de neutro foram as mesmas utilizadas para os relé de sobrecorrente de fase, já que ambos os tipos de relés de fase e de neutro são, essencialmente, ligados em série e alimentados pelos mesmos TC's. A figura 6.3.1 exemplifica o conjunto de ligações adotado normalmente para os relés de fase e de neutro.

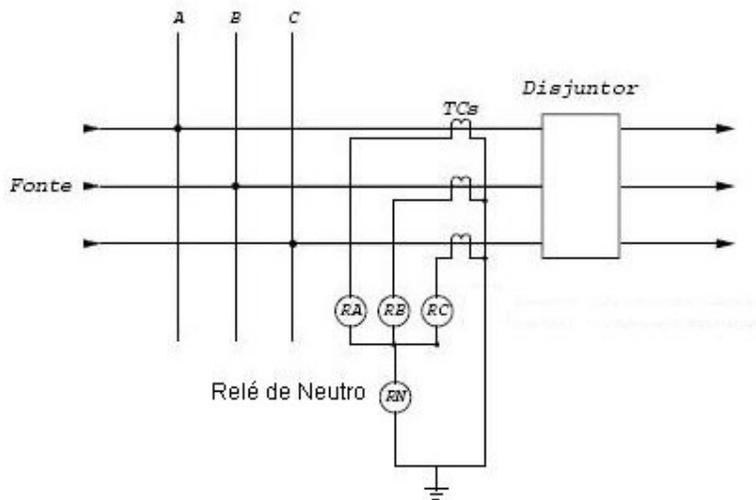


Figura 6.3.1 – Esquema de ligação dos relés de fase e de neutro

Para os relés de neutro só foram considerados ajustes de elemento temporizado, deixando o ajuste do instantâneo para trabalhos futuros.

### **Ajuste do grupo 1**

#### **Relé C4n e Relé B3n**

As mesmas correntes  $I_N$  (valor nominal) de ajuste dos relés de fase C4 e B3 foram consideradas para ajuste dos relés de neutro C4n e B3n. Portanto, para o ajuste de C4n e B3n, fixamos:

$$I_N = 443,6 A$$

$$RTC = \frac{500}{5} \Rightarrow \text{O mesmo RTC do ajuste do relé de sobrecorrente de fase}$$

$$I_{AJUSTE} = \frac{0,3 \cdot I_N}{RTC} = 443,6 \cdot 0,3 \cdot \frac{5}{500} \Rightarrow 1,33 A$$

Tape escolhido igual a 1,4 A

## **Relé A2n**

$$I_N = 503A$$

$$RTC = \frac{500}{5} \Rightarrow \text{O mesmo RTC do ajuste do relé de sobrecorrente de fase}$$

$$I_{AJUSTE} = \frac{0,3 \cdot I_N}{RTC} = 503 \cdot 0,3 \cdot \frac{5}{500} \Rightarrow 1,509A$$

Tape escolhido igual a 1,5 A.

## **Ajuste do grupo 2**

### **Relé A3n e Relé B4n**

As mesmas correntes  $I_N$  (valor nominal) de ajuste dos relés de fase A3 e B4 foram consideradas para ajuste dos relés de neutro A3n e B4n. Portanto, para o ajuste de A3n e B4n, fixamos:

$$I_N = 564,3A$$

$$RTC = \frac{600}{5} \Rightarrow \text{O mesmo RTC do ajuste do relé de sobrecorrente de fase}$$

$$I_{AJUSTE} = \frac{0,3 \cdot I_N}{RTC} = 564,3 \cdot 0,3 \cdot \frac{5}{600} \Rightarrow 1,41A$$

tape escolhido igual a 1,5 A

### **Relé C5n**

$$I_N = 722A$$

$$RTC = \frac{700}{5} \Rightarrow \text{O mesmo RTC do ajuste do relé de sobrecorrente de fase}$$

$$I_{AJUSTE} = \frac{0,3 \cdot I_N}{RTC} = 722 \cdot 0,3 \cdot \frac{5}{700} \Rightarrow 1,547 A$$

tape escolhido igual a 1,6 A

A tabela 6.3.1 mostra o resumo do ajuste dos relés de neutro.

Tabela 6.3.1 – Resumo do ajuste dos relés de neutro

RELÉ	RTC	TAPE
C4n	500/5	1,4A
B3n	500/5	1,4A
A2n	500/5	1,5A
A3n	600/5	1,5A
B4n	600/5	1,5A
C5n	700/5	1,6A

### 6.3.1 – Resultados obtidos na coordenação dos relés de sobrecorrente de neutro (51n)

Para realizar a coordenação entre os relés de neutro, utilizamos a mesma ferramenta utilizada para o ajuste dos relés de fase. O tempo de coordenação mínimo foi de 0.5s.

A tabela 6.3.1.1 mostra a coordenação entre os relés C4n, B3n e A2n. As correntes de curto que levam estes relés a atuarem não provocam a atuação dos relés A3n, B4n e C5n devido à ação do elemento de direcionalidade do relé.

Tabela 6.3.1.1 - Tempos de atuação dos relés de neutro para curto monofásico barra 5

	Relé	Curto Mofásico Franco Barra 5	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4n	0,05	0,19s
	B3n	0,186	0,70s
	A2n	0,394	1,48s
Relés coordenados entre si	A3n	0,05	9999s
	B4n	0,197	9999s
	C5n	0,379	9999s

A tabela 6.3.1.2 ilustra, para o curto monofásico franco na barra 4 da figura 6.3.1, a coordenação entre os relés B3n e A2n. Já o relé C4n não atua devido ao elemento direcional do relé.

Tabela 6.3.1.2 - Tempos de atuação dos relés de neutro para curto monofásico na barra 4

	Relé	Curto Mofásico Franco Barra 4	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4n	0,05	9999s
	B3n	0,186	0,45s
	A2n	0,394	0,95s
Relés coordenados entre si	A3n	0,05	9999s
	B4n	0,197	9999s
	C5n	0,379	0,80s

A tabela 6.3.1.3 ilustra, para um curto monofásico na barra 3, a coordenação entre os relés B4n e C5n.

Tabela 6.3.1.2 - Tempos de atuação dos relés de neutro para curto monofásico barra 3

	Relé	Curto Mofásico Franco Barra 3	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4n	0,05	9999s
	B3n	0,186	9999s
	A2n	0,394	0,82s
Relés coordenados entre si	A3n	0,05	9999s
	B4n	0,197	0,46s
	C5n	0,379	0,96s

A tabela 6.3.1.2 mostra a coordenação completa do grupo 2 (A3n,B4n,C5n) para os relés de neutro.

Tabela 6.3.1.2 - Tempos de atuação dos relés de neutro para curto monofásico barra 2

	Relé	Curto Mofásico Franco Barra 2	
		Time Dial	Atuação
Relés coordenados entre si	C4n	0,05	9999s
	B3n	0,186	9999s
	A2n	0,394	9999s
Relés coordenados entre si	A3n	0,05	0,17s
	B4n	0,197	0,67s
	C5n	0,379	1,44s

## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

A aplicação dos relés de sobrecorrente e de outros tipos para realizarem a função de proteção dos sistemas de potência é essencial para uma perfeita harmonia entre segurança pessoal, segurança dos equipamentos e continuidade do fornecimento.

Com o crescimento dos sistemas de potência, a utilização de programas computacionais para suporte aos estudos se torna elemento fundamental. O presente trabalho procurou mostrar, portanto, que a utilização destes programas para simulação de proteção se mostra extremamente importante, especialmente se sistemas de maior porte forem analisados. Fica ainda registrado o estímulo para o desenvolvimento de programas de curto-circuito com facilidades para cálculo de ajuste de relés e coordenação da proteção.

O software Aspen OneLiner mostrou-se uma poderosa ferramenta para o estudo de proteção, permitindo a efetivação de ajustes e a avaliação de desempenho dos elementos de proteção. Podem ser implementados estudos de desempenho de relés eletromecânicos, de relés estáticos e de relés digitais, com avaliação do tempo de atuação dos mesmos. A automatização dos cálculos com a utilização do programa reduz consideravelmente o esforço requerido para este tipo de atividade. Pode-se, com apoio do programa referido ou outros similares, simular efetivamente, e de forma rápida, o impacto da inclusão de novas barras no sistema, retiradas de equipamentos de operação, entre outras facilidades.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho constatamos que, ainda hoje, muitas das proteções existentes ainda operam com relés eletromecânicos, mas com a tendência evidente de substituição por relés digitais. Nos novos projetos, apenas proteção digital é considerada.

Os relés digitais, como mostrado neste relatório, trazem muitos benefícios para os sistemas de proteção, como:

- Detecção e diagnóstico de faltas.
- Automonitoramento.

- Possibilidade de interação entre relés de subestações diferentes, aumentando a confiabilidade do sistema.
- Os testes podem ser executados em bancada.

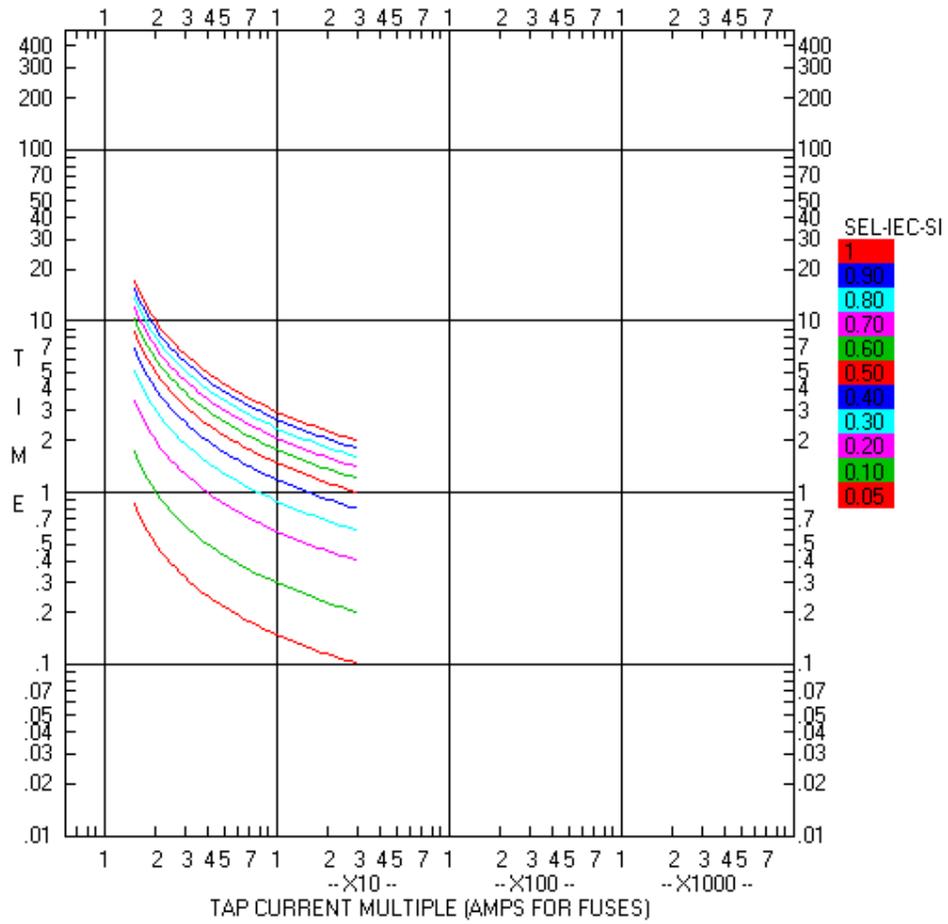
O presente relatório procurou dar ênfase à proteção utilizando relés de sobrecorrente, mas outras formas de proteção, com outros tipos de relés, como relés de distância, relés de sobretensão, relés diferencial, apresentam maior importância. Para sistemas de proteção mais complexos, pode ocorrer, ainda, a necessidade de implementação de outras formas de proteção e tipos de relés para que se possa viabilizar a efetiva coordenação destes relés, com os benefícios resultantes para a operação confiável do sistema de potência. Como indicação de trabalho futuro de fim de curso, fica a sugestão para uma avaliação, na mesma linha da utilizada neste projeto, tratando dos ajustes e coordenação de relés de distância.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WILLIAM D. STEVENSON, JR., Power System Analysis, International Editions 1994
  
- [2] GERALDO KINDERMAN, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, vol 1, 1999
  
- [3] IEC 60255-3 Ed. 2.0
  
- [4] JUAN IGNACIO ROSSI, Tese de Mestrado – Representação de Relés de Proteção em Programas de Curto-Circuito, Setembro 2007
  
- [5] JORGE NEMÉSIO DE SOUZA, Apostila de Equipamentos Elétricos – DEE – UFRJ, 1998
  
- [6] MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos Vol 1 Livros Técnicos e Científicos Editora
  
- [7] ASPEN, Tutorial do programa, versão 2001
  
- [8] Notas de aula de ADESP (Análise de Defeitos em Sistema de Potência)
  
- [9] FUJIO SATO, Apostila de Proteção de Sistemas de Energia Elétrica – UNICAMP, 2005
  
- [10] ONS (Operador Nacional do Sistema) – <http://www.ons.com.br>
  
- [11] Norma ASA (American Standard Association)
  
- [12] V. Brandwajn, H.W. Dommel and I.I. Dommel, "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Steady State and Transient Studies," IEEE Trans. on PAS, June 1982

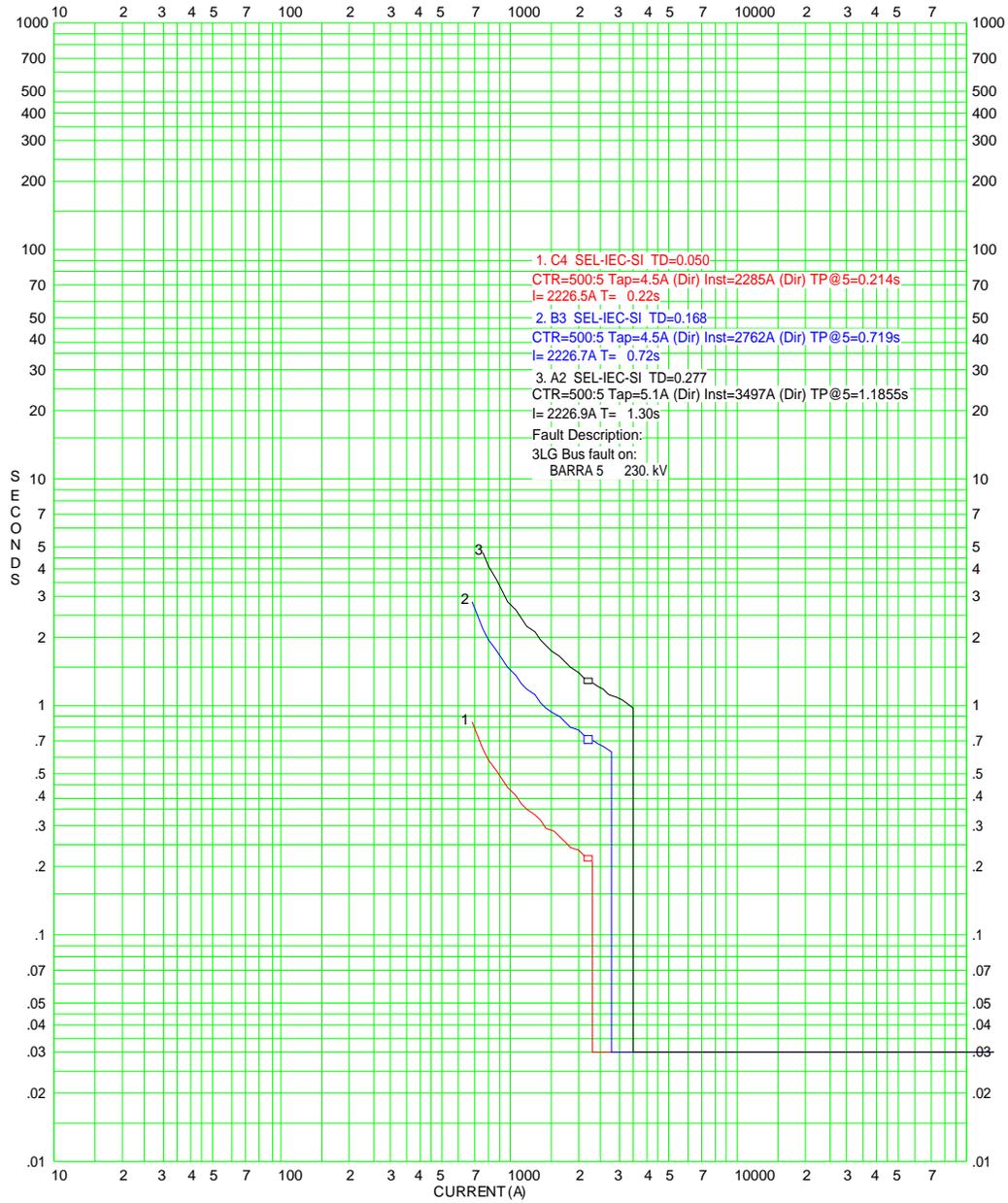
# ANEXO A

Curvas do Relé Implementado no Exemplo:



# ANEXO B

Segue abaixo uma das curvas que mostram o tempo de atuação, time dial e tape para um determinado grupo de relé na ocorrência de determinada falta.



TIME-CURRENT CURVES @ Voltage		By
For		No.
Comment		Date

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.