

**FACILIDADES DO PROGRAMA ANAFAS PARA ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO E PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

Pedro Cunha Kastrup Decourt

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.

Aprovado por:

---

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

---

Prof. Maria Karla Vervloet Sollero, D. Sc.

---

Prof. Alessandro Manzoni, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
OUTUBRO DE 2007

## **Dedicatória**

Dedico este projeto à minha família: minha mãe, Kathia, a melhor mãe do mundo, minha irmã, Patrícia, uma segunda mãe e ao meu pai, Eduardo, que sempre vai ser um exemplo de pai e homem e o meu grande ídolo.

Gostaria de dedicar, também, às minhas duas princesas: a mulher da minha vida, Rebeca e a minha filha, Eduarda, que eu amo muito de uma forma que é impossível de descrever.

Dedico, também, à família da minha namorada, Rebeca, que sempre me ajudou nos momentos mais difíceis: Rosemary, Jurema, Rudimila, Richelle e Tânia. Dedico aos meus tios Evandro, Simone, Denise e Graça, a todos os meus primos, aos meus avós Jorge, Celi-  
na e Maria José e aos meus grandes amigos e irmãos: Paulo Roberto Mesquita, Igor Ânco-  
ra, Alessandro Ribeiro, Luciano Martins, Pedro Salomão, Carlos André, Márcio Ayres,  
Marcus Vinícius, Ariston Júnior, Renato Lessa, Thiago Corrêa, Diogo Castro, Afonso Ro-  
drigues, João Botelho, Edgar Rivera, Paulo Renato Texeira e família, Victor Edler, Cons-  
tantino Silva, Diego Freire, Luiz Augusto Osório e Vinícius Pereira.

Sem o apoio dessas pessoas, nada do que sou hoje, teria, ou no futuro, terá se torna-  
do realidade.

Muito Obrigado!

## **Agradecimentos**

Agradeço aos professores por plantar a semente do desejo de estudar na minha vida. Suas aulas funcionaram como um estímulo e que culmina agora com este projeto. Agradeço em especial ao professor Sebastião Oliveira pelas aulas inspiradoras deste projeto e ao professor Richard Stephan, pelas conversas, sugestões e todo o conhecimento de engenharia ensinado.

Não posso deixar de agradecer também a alguns amigos que estiveram sempre presentes tanto nos momentos de estudo quanto na diversão nesses anos de faculdade. Em especial: Thiago Messias, Adriano Carvalho, Daniel Giampietro, Victor Peyneau, Leandro Isidoro, Nilo Felipe, Bruno e André Montezano.

Agradeço também a Rosane, secretária do DEE que, sempre prestativa e bem humorada, cumpriu seu papel responsavelmente e esteve sempre disposta a ajudar.

Agradeço, ao engenheiro Rubens Uzeda e ao técnico de manutenção Anaílton Almirante, pessoas com as quais pude aprender um pouco mais da prática em engenharia e, acima de tudo, a ser um profissional preocupado com a ética e com o bom relacionamento interpessoal.

Agradeço, finalmente, a Deus e ao meu padroeiro São Judas Tadeu.

Muito Obrigado!

## **Resumo**

Este trabalho apresenta as facilidades proporcionadas pelo programa de Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS) desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) na determinação dos valores das correntes de defeitos em linhas de transmissão, considerando ou não o carregamento pré-falta, na parametrização de ajustes dos relés de sobrecorrente e na efetivação da coordenação deste tipo de proteção, atividades para as quais os cálculos das intensidades das correntes de curto-circuito são essenciais.

Estas facilidades decorrem das simulações de curto-circuito realizadas com o auxílio do programa que fornecem os valores das correntes de curto-circuito necessárias e almejadas, tornando o processo de cálculo mais eficiente.

# ÍNDICE

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1 - Objetivo .....	03
1.2 - Visão Geral do Texto .....	04
<b>2 - METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>06</b>
<b>3 - MÉTODO DOS COMPONENTES SIMÉTRICOS .....</b>	<b>08</b>
3.1 - Análise do Método .....	08
3.2 - Operadores .....	10
3.3 - Impedâncias de Seqüência .....	14
3.4 - Circuitos de Seqüência .....	16
3.5 - Caso Particular: Circuitos de Seqüência dos Geradores a Circuito Aberto .....	17
3.6 - Circuitos de Seqüências Positiva e Negativa .....	21
3.7 - Circuitos de Seqüência Zero .....	22
<b>4 - MATRIZ IMPEDÂNCIA DE BARRAS .....</b>	<b>27</b>
4.1 - Descrição da Matriz $Z_{barra}$ .....	28
4.2 - Aplicação da Matriz $Z_{barra}$ .....	29
<b>5 - CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO .....</b>	<b>33</b>
5.1 - Características Gerais .....	34
5.2 - Componentes da Corrente de Curto-Circuito .....	38
5.3 - Relação X/R e Constante de Tempo da Componente Unidirecional .....	41
5.4 - Curto-Circuito Trifásico Simétrico .....	42
5.5 - Curtos-Circuitos Assimétricos .....	42
5.6 - Exemplos de Cálculo de Curto-Circuito .....	43
5.7 - Exemplos de Cálculo de Curto-Circuito Utilizando a Matriz $Z_{barra}$ .....	51
<b>6 - TÉCNICAS DE PROTEÇÃO .....</b>	<b>54</b>
6.1 - Princípios Básicos de Proteção .....	55
6.2 - Relés de Sobrecorrente .....	57
6.2.1 – Relés de Sobrecorrente Instantâneos .....	60
6.2.2 – Relés de Sobrecorrente Temporizados .....	61
6.2.3 – Relés de Sobrecorrente Temporizados com Elemento Instantâneo .....	64
6.2.4 – Relés de Sobrecorrente de Neutro .....	66
6.2.5 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente .....	68

<b>7 - PROGRAMA ANAFAS .....</b>	<b>70</b>
7.1 - Principais Características .....	70
7.2 - Metodologia Implantada .....	71
<b>8 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>74</b>
8.1 - CASO1: Sistema sem Carregamento .....	75
8.1.1 – Diagramas de Seqüência do Sistema .....	77
8.1.2 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 operando .....	79
8.1.3 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT34-1 com o circuito LT34-2 operando ..	80
8.1.4 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado .....	82
8.1.5 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado	83
8.2 – CASO 2: Sistema com Carregamento .....	85
8.2.1 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 operando .....	87
8.2.2 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT34-1 com o circuito LT34-2 operando ..	88
8.2.3 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado .....	89
8.2.4 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado	90
8.3 - CASO 3: Ajuste de Proteção e Coordenação de um Sistema Radial .....	91
8.3.1 – Ajuste dos Relés de Sobrecorrente de Fase e de Neutro (Relés 50, 51 e 50N) .....	93
8.3.2 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente .....	96
<b>9 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>103</b>

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O progresso de uma nação pode ser medido pelo grau de desenvolvimento e aproveitamento de suas fontes de energia. A descoberta dessas fontes na natureza, o transporte da energia em suas várias formas de um lugar a outro e a conversão dessa energia para formas mais úteis são atividades essenciais que caracterizam uma economia forte e planejada. Um sistema elétrico de potência é um dos poucos veículos adequados para o transporte da energia, contribuindo, desta forma, para a melhoria da qualidade de vida em uma determinada região.

Um sistema elétrico de potência é constituído por três componentes principais: as estações geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. As linhas de transmissão ligam as estações geradoras aos sistemas de distribuição, enquanto um sistema de distribuição liga todas as cargas individuais de uma determinada área ao sistema de transmissão existente. Um sistema elétrico bem estruturado compreende um grande número de estações geradoras interligadas, de modo que a energia total produzida possa ser utilizada em toda a região coberta pelo sistema.

Contudo, um sistema elétrico de potência está constantemente sujeito às ocorrências que causam perturbações no seu estado normal. Estas perturbações alteram as grandezas elétricas (corrente, tensão e frequência), ocasionando violações nos vínculos operativos. Para estes casos, são necessárias providências preventivas e/ou corretivas com o objetivo explícito de sanar ou restringir as conseqüências dessas perturbações.

Para que haja um funcionamento adequado e eficiente de todo este sistema, são necessários estudos e análises posteriores das suas características, para que desta forma seja desenvolvida uma filosofia de proteção capaz de minimizar as perturbações em seu estado

normal de operação e de propiciar segurança aos operadores do sistema e aos equipamentos envolvidos.

As perturbações mais freqüentes e mais súbitas são os curtos-circuitos. Os curtos-circuitos ocorrem como resultado da ruptura do isolamento elétrico entre as fases ou entre uma das fases e terra do sistema elétrico. O conhecimento prévio das intensidades das correntes resultantes destes defeitos em uma rede de energia elétrica é imprescindível como subsídio para os seguintes tipos de estudos e análises:

- Determinação das capacidades nominais dos equipamentos;
- Cálculo de ajustes dos relés de proteção;
- Cálculo dos esforços mecânicos nos elementos estruturais dos equipamentos;
- Calculo da malha de aterramento.

Com isto, é fácil perceber que para dimensionamento do sistema de proteção de uma determinada rede elétrica e parametrização dos relés associados, devem-se tomar como referência para ajuste os valores das correntes de curto-circuito calculadas, residindo neste fato toda a importância da disponibilização de software para cálculo das intensidades das correntes necessárias à implementação destes estudos. Além disso, para assegurar uma proteção adequada, o perfil das tensões ao longo da rede deve também ser conhecido.

Na ocorrência de curtos-circuitos, é indispensável que a região atingida seja isolada rapidamente do restante da rede elétrica para evitar danos aos equipamentos e para reduzir, o máximo possível, a sua influência sobre o comportamento do sistema de potência.

Para avaliação das intensidades das correntes de curto-circuito em um sistema de potência, faz-se necessário o conhecimento das seguintes características:



- Impedâncias de seqüência dos elementos componentes do sistema;
- Grupo fasorial dos transformadores de potência;
- Tipo de aterramento no neutro dos equipamentos;
- Configuração das redes de seqüência;
- Forma de conexão das redes de seqüência de acordo com o tipo de curto-circuito.

Para os sistemas de menor porte, o cálculo das correntes de curto-circuito pode ser feito de forma relativamente simples. Entretanto, para sistemas mais complexos e de maior porte, uma opção efetiva para a determinação da severidade destas correntes é a utilização de métodos matriciais (via matriz  $Z_{barra}$ ) que, embora já disponíveis por algumas décadas, eram anteriormente inviáveis em virtude da falta de recursos computacionais realmente eficientes. Hoje, porém, com o desenvolvimento destes recursos tanto no aspecto de velocidade quanto no de disponibilidade de memória, a análise de curto-circuito de sistemas elétricos muito grandes pode ser realizada da maneira rápida e precisa usando o método da matriz  $Z_{barra}$ .

O conhecimento dos circuitos de seqüência e da decomposição em componentes simétricos é necessário tanto para o cálculo por meios analíticos como no auxílio aos métodos computacionais.

### **1.1 – Objetivo**

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar as facilidades proporcionadas pelo programa de Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS) desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), para implementação de ajustes dos relés e efetivação

de sua coordenação, atividades para as quais os cálculos das intensidades das correntes de curto-circuito são essenciais.

No projeto desenvolvido, o programa é utilizado como ferramenta de simulação e determinação das correntes de curto-circuito ao longo de um sistema elétrico de transmissão.

As simulações realizadas evidenciam as funcionalidades do programa para alguns casos de cálculo das correntes de curto-circuito, possibilitando, através dos valores encontrados, uma estimativa da posição do defeito ao longo da linha, a determinação do ajuste e a coordenação dos relés de proteção utilizados.

## **1.2 – Visão geral do texto**

Aqui fazemos uma breve introdução sobre o trabalho realizado, ficando a descrição da metodologia utilizada no presente projeto para ser apresentada no próximo capítulo.

Para uma melhor compreensão da metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito, é discutido, no capítulo 3, o método dos componentes simétricos. Para tanto, foi realizada uma análise simplificada do método e de suas aplicações, além de apresentados os circuitos de seqüência e discutidos alguns casos particulares. Este método é imprescindível para os cálculos realizados em caso de curtos-circuitos assimétricos, daí residindo a importância de sua apresentação e discussão.

No capítulo 4, são feitas uma descrição e apresentação das principais aplicações da matriz impedância de barras ( $Z_{barra}$ ) em casos de curto-circuito. Cabe adiantar que esta matriz é de grande valia nos cálculos realizados para sistemas com elevado número de barras.

Já no capítulo 5, é apresentada uma análise das correntes de curto-circuito e de suas principais propriedades e componentes. Além disso, são destacadas as particularidades dos casos de curtos-circuitos simétricos e assimétricos e apresentados os métodos de cálculo, tanto para sistemas com poucas barras quanto para sistemas com número elevado de barras e que utilizam a matriz  $Z_{barra}$  como ferramenta de auxílio. Na caracterização dos métodos de cálculo, foram utilizados exemplos para facilitar o entendimento.

No capítulo 6, são detalhadas algumas das técnicas mais utilizadas para a implementação da proteção de linhas de transmissão. É feita uma descrição e posterior análise das principais características e do princípio de operação dos relés de proteção, além da demonstração dos cálculos realizados para a determinação dos ajustes considerados em alguns tipos de relé.

O programa de Análise de Falhas Simultâneas – ANAFAS é brevemente discutido no capítulo 7, sendo apresentadas as principais características e a metodologia implantada para que este seja capaz de simular e obter os resultados almejados em um estudo de curto-circuito.

No capítulo seguinte, são apresentados e comentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no ANAFAS, assim como é feita referência à utilização destes para o ajuste e coordenação dos relés de sobrecorrente em sistemas genéricos.

Finalmente, no capítulo 9, são apresentadas as conclusões do trabalho, destacando os objetivos alcançados através do estudo realizado com o auxílio do ANAFAS, evidenciando, portanto, como este se torna, cada vez mais, uma ferramenta imprescindível em estudos de casos de curto-circuito e proteção dos sistemas de potência.

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGIA DA PESQUISA**

O estudo de proteção desenvolvido baseou-se na solução de engenharia proposta na referência [1], na qual são apresentados os métodos de ajuste e a coordenação de relés de sobrecorrente. Além disso, as principais características construtivas e de operação dos relés utilizados, tiveram como base as informações contidas em [1] e [9].

Os cálculos de curto-circuito foram efetuados através da ferramenta computacional ANAFAS. Tendo como referências [2], [3] e [4], o programa foi usado na simulação de diferentes condições de curto-circuito de forma a evidenciar todas as vantagens e eficiência disponibilizadas pelo programa em estudos e análises que servem de referência para uma posterior parametrização dos relés utilizados para proteção de um sistema elétrico.

Os métodos de cálculos e análise de curto-circuito desenvolvidos ao longo do trabalho tiveram como base a teoria apresentada em [2].

As informações sobre a metodologia dos Componentes Simétricos e a utilização da Matriz Impedância de Barras foram apresentadas com o intuito de oferecer um melhor entendimento dos métodos de curto-circuito utilizados e do funcionamento do programa ANAFAS. Estas informações tiveram [2] e [7] como referência.

Para contextualizar e justificar o trabalho procura-se ressaltar a importância dos estudos de curto-circuito e da proteção de um sistema de energia elétrica nos dias de hoje. Algumas dissertações de mestrado do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ foram as principais fontes de pesquisa neste tema.

O material disponibilizado em algumas disciplinas do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFRJ, em especial Análise de Defeitos em Sistemas de Potência, Proteção de Sistemas Elétricos e Subestações, também foi fonte inspiradora deste projeto e

por isso foi utilizado como referência em conjunto com informações obtidas através de consultas à Internet em sites relacionados ao assunto.

## CAPÍTULO 3: MÉTODO DOS COMPONENTES SIMÉTRICOS

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

Como qualquer defeito assimétrico origina a circulação de correntes desequilibradas em uma rede de energia elétrica, este método tem se revelado, até os dias atuais, de grande serventia para a determinação das correntes e tensões ao longo do sistema após a ocorrência do defeito.

### 3.1 – Análise do método

O trabalho de Fortescue estabelece que um sistema desequilibrado de  $n$  fasores correlacionados pode ser decomposto em  $n$  sistemas de fasores equilibrados denominados componentes simétricos dos fasores originais.

Em termos de sinais elétricos alternados, pode-se dizer que um conjunto assimétrico polifásico de senóides com tensões ou correntes alternadas constituídas de  $m$  fases pode ser decomposto em um conjunto simétrico polifásico de componentes de tensões ou correntes alternadas de  $m$  fases.

Para sistemas trifásicos com seqüência de fases  $abc$  e direção dos fasores na direção anti-horária, por exemplo, e assumindo que as tensões sejam desequilibradas, mas cada uma delas constituída apenas por sua componente fundamental, tem-se, a princípio, um conjunto de três fasores de tensão desequilibrados, conforme a Figura 1.

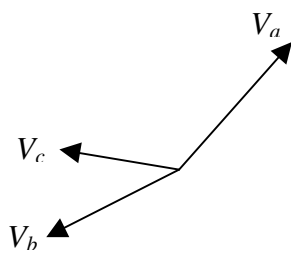


Figura 1 – Conjunto assimétrico constituído por três fasores desequilibrados.

Desta maneira, de acordo com o teorema de Fortescue, estes três fasores desequilibrados podem ser substituídos por três sistemas equilibrados de fasores, conforme é mostrado na Figura 2. Estes sistemas 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  $120^\circ$  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  $120^\circ$  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.

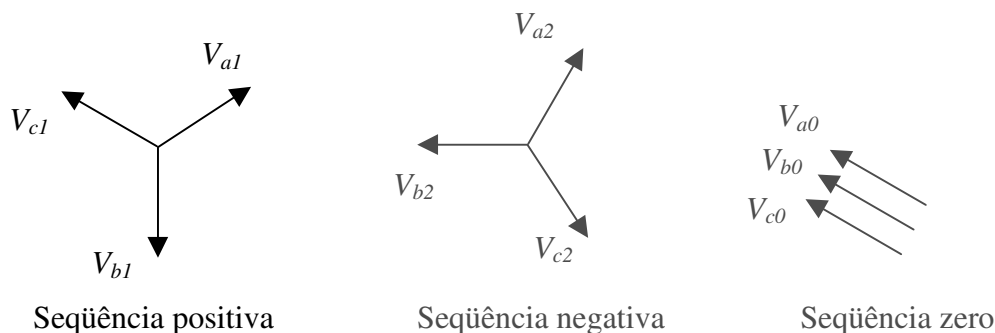


Figura 2 – Três conjuntos constituídos por três fasores equilibrados que representam os conjuntos de fasores das seqüências positiva, negativa e zero.

Estes conjuntos equilibrados de fasores devem, portanto, ser combinados para formarem os fasores do sistema desequilibrado da Figura 1, como visto na Figura 3.

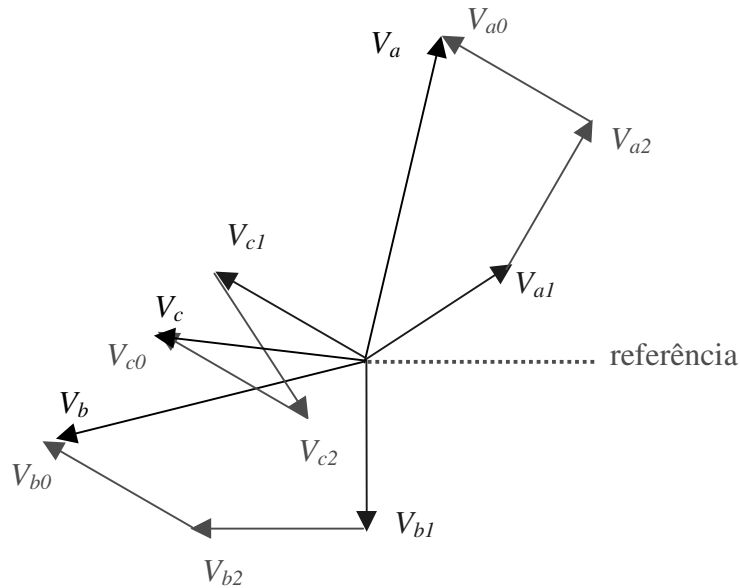


Figura 3 – Composição do conjunto de fasores desequilibrados a partir dos conjuntos de fasores equilibrados da Figura 2.

Se considerarmos cada um dos fasores do conjunto original desequilibrado como constituído pela soma fasorial de seus componentes equilibrados, podemos escrever:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.1.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (3.1.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (3.1.3)$$

### 3.2 – Operadores

A forma pela qual este método é comumente referido na análise de desempenho dos sistemas de potência trifásicos exige a utilização de operadores com o objetivo de indicação simples da rotação de um determinado fasor.



Desta maneira, para estabelecimento da defasagem dos componentes simétricos das tensões e correntes em um sistema trifásico, a letra  $a$  é geralmente usada para indicar o operador que representa uma rotação de  $120^\circ$  entre fasores. Tal operador é um número complexo de módulo unitário e fase  $120^\circ$  e é definido como:

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j2\pi/3} = -0.5 + j0.866 \quad (3.2.1)$$

Se o operador  $a$  for aplicado a um fasor duas vezes, sucessivamente, fará o fasor girar  $240^\circ$ , segundo a equação 3.2.2:

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = e^{j4\pi/3} = -0.5 - j0.866 \quad (3.2.2)$$

A Figura 4 mostra os fasores representando várias potências de  $a$ .

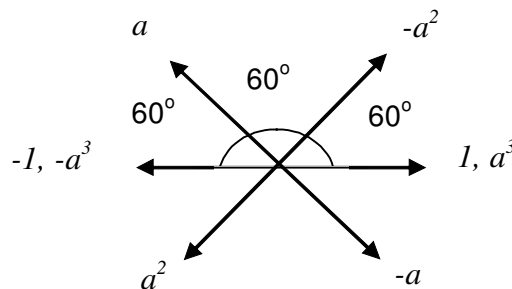


Figura 4 – Diagrama fasorial de várias potências do operador  $a$ .

Como já mencionado, a utilização de operadores possibilita uma formulação mais simples das relações fasoriais, aplicando-se a cada componente o produto de uma função do operador  $a$ , a partir de uma componente tomada como referência. Tomando o fasor  $V_a$  como referência, as seguintes relações são encontradas com a utilização dos operadores:

$$\begin{aligned}
V_{b1} &= a^2 \cdot V_{a1} & V_{c1} &= a \cdot V_{a1} \\
V_{b2} &= a \cdot V_{a2} & V_{c2} &= a^2 \cdot V_{a2} \\
V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0}
\end{aligned} \tag{3.2.3}$$

Utilizando a forma matricial, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \tag{3.2.4}$$

Onde  $A$  é a matriz formada pelos operadores referidos anteriormente, tal que:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{3.2.5}$$

A matriz inversa da matriz  $A$ , denominada  $A^{-1}$ , é dada por:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \tag{3.2.6}$$

Desta forma, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{3.2.7}$$

Esta última relação matricial indica como é possível decompor os três fasores representativos de um sistema assimétrico ou desequilibrado em seus componentes simétri-

cos e permite também afirmar que, quando a soma dos fasores desequilibrados  $V_a$ ,  $V_b$ , e  $V_c$  (tensões fase-fase) for nula, seus componentes de seqüência zero serão nulos.

As relações acima desenvolvidas poderiam ter sido escritas para quaisquer conjuntos de fasores correlacionados como, por exemplo, para equações envolvendo correntes. Portanto, as equações envolvendo correntes em um sistema trifásico desequilibrado podem ser expressas, para composição das correntes de fase na forma matricial, da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.2.8)$$

Ou, ainda, para decomposição destas correntes em suas componentes de seqüência, por:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.2.9)$$

Em um sistema trifásico, a soma das correntes de linha (ou de fase) é igual à corrente  $I_N$  de circulação pelo neutro, de forma que:

$$I_N = I_a + I_b + I_c = 3 \cdot I_{a0} \quad (3.2.10)$$

Na ausência de um retorno pelo neutro em um sistema trifásico, a corrente de neutro  $I_N$  é nula e então as correntes de linha não possuirão componentes de seqüência zero.

Um exemplo típico deste caso acontece com uma carga ligada em delta. Este tipo de ligação não apresenta retorno pelo neutro e, portanto, as correntes de linha que circulam

na alimentação deste tipo de carga também não apresentam componentes de seqüência zero.

### **3.3 – Impedâncias de seqüência**

A principal razão para obtenção dos valores das impedâncias de seqüência dos elementos componentes de um sistema de potência é permitir a construção dos circuitos de seqüência para o sistema completo.

Em qualquer parte de um circuito, a queda de tensão provocada por circulação de uma determinada componente de seqüência das correntes trifásicas desequilibradas depende da impedância de seqüência daquela parte do circuito oferecida à circulação destas correntes naquela mesma seqüência. A impedância de seqüência positiva de um determinado trecho de um circuito estruturalmente equilibrado pode envolver linhas de transmissão ou outros componentes e poderá apresentar valor diferente da impedância vista pelas correntes de uma outra seqüência.

As impedâncias de seqüência positiva e negativa de circuitos lineares, simétricos e estáticos são idênticas, já que tais impedâncias são independentes da seqüência de fases. Em contrapartida, a impedância de seqüência zero de uma linha de transmissão difere das impedâncias de seqüência positiva e negativa.

Quando numa linha de transmissão circula corrente de seqüência zero, ela é idêntica em todas as fases. O retorno da corrente é feito pela terra, por cabos aéreos aterrados, ou por ambos. Por serem iguais as correntes de seqüência zero em cada condutor, o campo magnético devido a essas correntes é muito diferente dos correspondentes às seqüências positiva e negativa. Essa diferença resulta no fato de a reatância de seqüência zero de uma linha de transmissão apresentar valores de 2 a 3,5 vezes maiores que o da reatância de

seqüência positiva. Essa relação apresenta valores ainda maiores para linhas de circuito duplo e para linhas sem cabos pára-raios.

As impedâncias de máquinas rotativas para as correntes nas três seqüências são, em geral, diferentes. A força magnetomotriz produzida pela corrente de armadura de seqüência negativa gira em sentido contrário ao do rotor, no qual se localiza o enrolamento do campo alimentado por corrente contínua. Em oposição ao fluxo produzido pelas correntes de seqüência positiva, e que é estacionário em relação ao rotor, o fluxo produzido pelas correntes de seqüência negativa varre rapidamente a face do rotor, também na rotação síncrona, mas em direção contrária ao movimento do rotor. Nesta varredura, este fluxo girante produz tensões e correntes induzidas nas bobinas de campo e de amortecimento. Essa condição é análoga à rápida variação de fluxo imediatamente após a ocorrência de um curto-circuito nos terminais da máquina. O trajeto do fluxo é o mesmo que o encontrado na avaliação da reatância subtransitória. Ao percorrer toda a periferia do rotor, a força magnetomotriz referente à corrente de seqüência negativa está constantemente variando sua posição em relação aos eixos direto e em quadratura do rotor. A reatância de seqüência negativa é freqüentemente definida como a média das reatâncias subtransitórias dos eixos direto e em quadratura.

Quando circula apenas corrente de seqüência zero na armadura de uma máquina trifásica, a corrente e a FMM (força magnetomotriz) de uma fase atingem o máximo no mesmo tempo que as correntes e FMM de cada uma das outras fases. As bobinas estão distribuídas de tal maneira ao longo da periferia da armadura que o ponto de máxima FMM produzida por uma fase está deslocado de  $120^\circ$  elétricos no espaço do ponto de máximo de cada uma das outras. Caso a FMM produzida pela corrente de uma fase apresente distribuição perfeitamente senoidal no espaço, a composição espacial de FMM ao longo do entreferro se faz a partir de três componentes senoidais cuja soma resulta zero em qualquer

ponto. Nenhum fluxo de entreferro é produzido neste caso e a única reatância de qualquer dos três enrolamentos de fase está associada aos fluxos de dispersão das bobinas de estator.

Embora os valores de reatância de dispersão de seqüência zero de transformadores trifásicos possam diferir um pouco dos valores relativos às seqüências positiva e negativa, estas reatâncias são consideradas iguais para os transformadores com núcleos trifásicos envolventes. Para transformadores com núcleo envolvido, a reatância de dispersão de seqüência zero apresenta valor menor que os das outras seqüências. Para resultar em simplificação nos cálculos, a admitância em paralelo correspondente ao efeito da corrente de excitação normalmente é desprezada nos cálculos de curto-circuito.

Na representação de cargas equilibradas ligadas em Y (estrela) ou  $\Delta$  (delta), a impedância de seqüência zero é suposta igual às de seqüência positiva e negativa.

### **3.4 – Circuitos de seqüência**

Uma vez que as componentes de seqüência das correntes de fase resultam em quedas de tensão somente de mesma seqüência e são praticamente independentes das componentes de corrente nas outras seqüências, em um sistema trifásico estruturalmente equilibrado, as correntes de qualquer seqüência podem ser consideradas como circulando em um circuito monofásico independente constituído apenas pelas impedâncias daquela seqüência. O circuito equivalente monofásico composto pela representação de seus elementos através das impedâncias de seqüência é conhecido como circuito de seqüência. O circuito de uma dada seqüência mostra todos os caminhos para a circulação das componentes de corrente naquela seqüência.

Cabe ressaltar que para sistemas trifásicos equilibrados não há componente de seqüência zero e que as tensões geradas são apenas de seqüência positiva, visto que o gerador

é projetado para fornecer tensões trifásicas equilibradas. Assim, o circuito de seqüência positiva é composto de uma FEM (força eletromotriz) em série com a impedância de seqüência positiva, enquanto os circuitos de seqüência negativa e de seqüência zero não apresentam fontes de tensão interna em suas composições.

Circuitos de seqüência conduzindo correntes  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{a0}$  são interligados com o intuito de representar as diversas condições de defeitos assimétricos. Desta maneira, para calcular o efeito de um curto-circuito pelo método dos componentes simétricos, faz-se necessário a determinação das impedâncias de seqüência, a combinação destas para formar os circuitos de seqüência e a conexão entre estes.

### 3.5 – Caso particular: Circuitos de Seqüência dos Geradores em Circuito Aberto

A Figura 5 mostra um gerador síncrono trifásico, comumente ligado em estrela aterrado, operando em vazio. Este caso particular tem a intenção de apresentar a esquematização dos circuitos de seqüência e servir como base para o entendimento de circuitos mais complexos, já que se trata de um caso mais simples. Adiante serão tratados circuitos constituídos pelos principais elementos presentes em um sistema de potência.

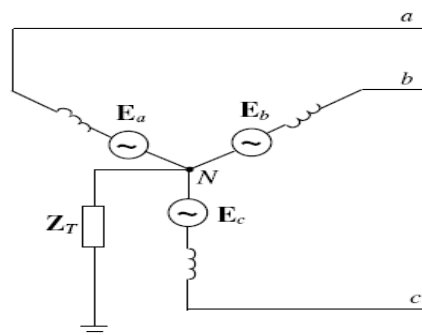


Figura 5 – Representação de um gerador síncrono trifásico operando em vazio.

Os circuitos de seqüência positiva, negativa e zero mostrados a seguir são os monofásicos equivalentes, através dos quais circulam os componentes simétricos das correntes de fase desequilibradas.

Para os casos demonstrativos analisados, a fase *a* é escolhida como a fase de referência. O potencial de referência para exprimir as amplitudes das tensões é o potencial de terra do gerador. Entretanto, como na impedância localizada entre o neutro e a terra circula apenas corrente de seqüência zero, a barra de referência é, no que diz respeito aos circuitos de seqüência positiva e negativa, o neutro do gerador. Portanto, o neutro pode ser considerado estar, no que diz respeito a estas mesmas seqüências, no potencial de terra.

Os circuitos de seqüência negativa e zero, como dito anteriormente, não contêm FEMs, porém incluem as impedâncias do gerador nas mesmas seqüências.

***Circuito equivalente de seqüência positiva***

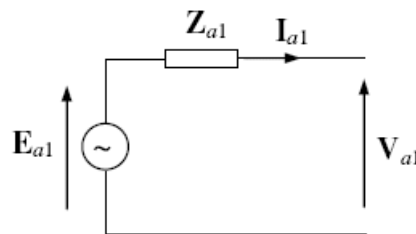


Figura 6 – Circuito equivalente de seqüência positiva para um gerador síncrono operando em vazio.

De acordo com o circuito tem-se que:

$$E_{a1} = V_{a1} - (Z_{a1} \cdot I_{a1}) \quad (3.5.1)$$



Onde  $E_{a1}$  é a tensão de seqüência positiva interna ao gerador,  $V_{a1}$  é a tensão de seqüência positiva nos seus terminais,  $I_{a1}$  é a corrente de seqüência positiva na fase  $a$  e  $Z_{a1}$  é a impedância de seqüência positiva do enrolamento da fase  $a$ .

***Circuito equivalente de seqüência negativa***

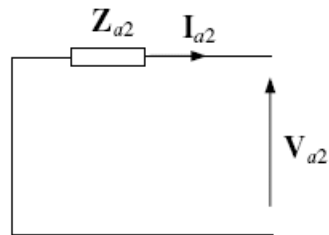


Figura 7 – Circuito equivalente de seqüência negativa para um gerador síncrono operando em vazio.

A equação que descreve esse circuito é:

$$V_{a2} = - (Z_{a2} \cdot I_{a2}) \quad (3.5.2)$$

Sendo  $V_{a2}$  a tensão de seqüência negativa nos terminais do gerador,  $I_{a2}$  a corrente de seqüência negativa na fase  $a$  e  $Z_{a2}$  a impedância de seqüência negativa do enrolamento da fase  $a$ .

### *Circuito equivalente de seqüência zero*

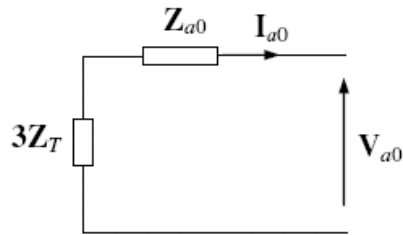


Figura 8 – Circuito equivalente de seqüência zero para um gerador síncrono operando em vazio.

Normalmente, os geradores síncronos são aterrados através de uma impedância de terra  $Z_T$  ou de neutro  $Z_N$  com o objetivo de limitar a corrente de curto-circuito fase-terra em seus terminais.

De acordo com a teoria de componentes simétricos, as correntes de seqüência zero nas três fases do gerador são iguais, ou seja:

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} \quad (3.5.3)$$

Essa condição faz circular uma corrente  $I_0$  na impedância de neutro ou de terra existente. Essa corrente é dada pela soma das correntes de seqüência zero nas três fases.

Portanto:

$$I_N = I_0 = I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} = 3 \cdot I_{a0} \quad (3.5.4)$$

Como a corrente que circula na impedância  $Z_T$  entre o neutro e a terra é  $3 \cdot I_{a0}$ , a tensão de seqüência zero na fase  $a$  para a terra,  $V_{a0}$ , pode ser descrita como:

$$V_{a0} = -(Z_{a0} \cdot I_{a0}) - (Z_T \cdot I_0) = -(Z_{a0} \cdot I_{a0}) - 3 \cdot (Z_T \cdot I_{a0}) = -(Z_{a0} + 3 \cdot Z_T) \cdot I_{a0} \quad (3.5.5)$$

Assim, como  $Z_{a0}$  é a impedância de seqüência zero do enrolamento da fase  $a$  do gerador e  $Z_T$  a impedância de neutro, pode-se dizer que o circuito de seqüência zero deve ter uma impedância total  $Z_0$  dada por:

$$Z_0 = (Z_{a0} + 3.Z_T) \quad (3.5.6)$$

Logo:

$$V_{a0} = -(Z_0) \cdot I_{a0} \quad (3.5.7)$$

### 3.6 – Circuitos de Seqüências Positiva e Negativa

A transição de um circuito de seqüência positiva para um de seqüência negativa é algo considerado simples. Os geradores e motores síncronos trifásicos apresentam tensões internas apenas de seqüência positiva, já que são projetados para gerar tensões equilibradas. Sendo as impedâncias destas seqüências iguais em um sistema estático equilibrado, a conversão é feita alterando apenas, caso necessário, as impedâncias que representam as máquinas rotativas e omitindo as forças eletromotrizes (FEMs) na seqüência negativa. Essa não representação das forças eletromotrizes na seqüência negativa é baseada na consideração de que as tensões geradas são equilibradas e de que não há tensões de seqüência negativa induzidas por fontes externas.

A FEM gerada no circuito de seqüência positiva é a tensão nos terminais em vazio em relação ao neutro, que também é igual às tensões atrás das reatâncias transitórias, subtransitórias e síncronas, uma vez que o gerador está operando em vazio. A reatância efetiva em um determinado instante reconhece que a evolução das correntes da máquina pode estar ocorrendo em seu regime transitório, em seu regime subtransitário ou no período final de regime permanente, respectivamente, dependendo das condições do circuito estudado.

Caso os pontos neutros de um sistema trifásico estejam todos no mesmo potencial, quando correntes equilibradas circulam, todos os pontos neutros estarão no mesmo potencial para as correntes de ambas as seqüências, positiva e negativa. Desta maneira, o neutro de um sistema trifásico simétrico representa a referência de potencial para especificar quedas de tensão e a barra de referência para os circuitos de seqüência positiva e negativa. A impedância ligada entre o neutro de uma máquina e a terra não faz parte de nenhum dos dois circuitos, uma vez que por ela não passarão nem as correntes de seqüência positiva nem as de seqüência negativa.

### **3.7 – Circuitos de Seqüência Zero**

As correntes de seqüência zero são as mesmas em módulo e fase em todos os pontos das três fases do sistema. Estas correntes circularão, apenas, quando existir um caminho de retorno pelo qual possam completar o circuito.

A referência para as tensões de seqüência zero é o potencial de terra. Como as correntes de seqüência zero podem estar circulando na terra, esta não estará necessariamente com o mesmo potencial em todos os pontos e a barra de referência do circuito não representa uma terra de potencial uniforme. As impedâncias de aterramento e dos cabos pára-raios devem estar incluídas na impedância de seqüência zero de uma linha de transmissão e o caminho de retorno no circuito é um condutor de impedância nula que representa a barra de referência do sistema. Quando a impedância de aterramento está incluída na impedância de seqüência zero, as tensões medidas em relação à barra de referência do circuito apresentam o valor correto em relação ao neutro do gerador.

Caso um circuito esteja ligado em Y (estrela), sem ligação do neutro para a terra ou para outro ponto neutro, a soma das correntes que vão para o neutro, nas três fases, é igual

a zero. Levando-se em conta que as correntes cuja soma é zero não possuem componentes de seqüência zero, a impedância para a corrente de seqüência zero será infinita além do ponto neutro, o que pode ser indicado por um circuito aberto entre o neutro do circuito ligado em Y e a barra de referência, como mostra a Figura 9.

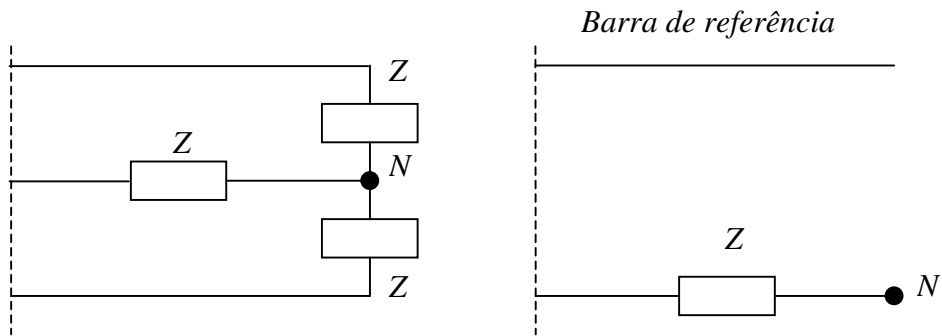


Figura 9 – Circuito equivalente de seqüência zero para carga ligada em Y sem ligação do neutro para terra.

Se o neutro de um circuito em Y estiver aterrado através de uma impedância nula, é colocada uma ligação de impedância zero entre o neutro e a barra de referência, como visto na Figura 10.

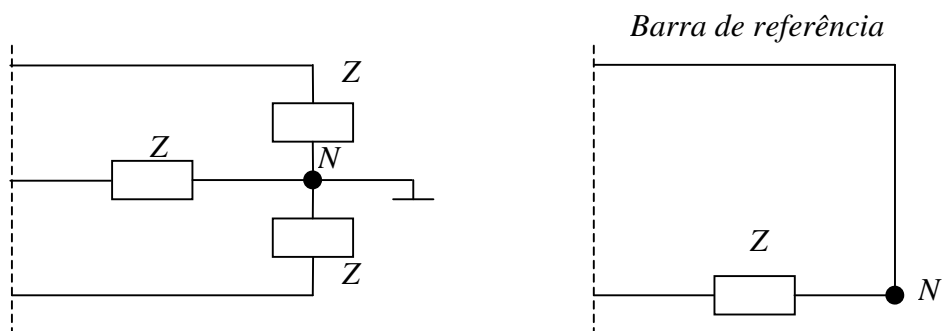


Figura 10 – Circuito equivalente de seqüência zero para carga ligada em Y com neutro aterrado através de impedância nula.

Entretanto, se a impedância  $Z_N$  estiver localizada entre o neutro e a terra em um circuito de ligação em Y, uma impedância de valor  $3.Z_N$  deverá ser colocada entre o ponto neutro e a referência do circuito de seqüência zero, como indica a Figura 11.

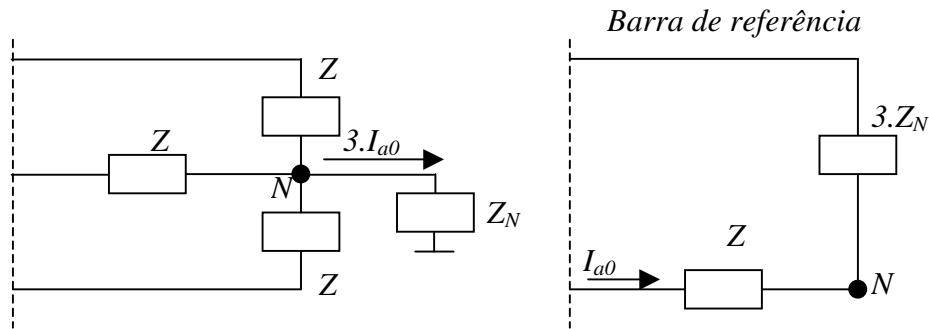


Figura 11 – Circuito equivalente de seqüência zero para carga ligada em Y, com neutro aterrado através de impedância.

Como explicado anteriormente, a queda de tensão de seqüência zero provocada no circuito por  $I_{a0}$  circulando através de  $3.Z_N$  é a mesma que no sistema onde  $3.I_{a0}$  circula por  $Z_N$ . Uma impedância constituída por um resistor ou por um reator é, em geral, ligada entre o neutro de um gerador e a terra, com o objetivo de limitar a corrente de seqüência zero quando na ocorrência de um curto-circuito assimétrico.

Já um circuito ligado em  $\Delta$  (delta), por não dispor de um caminho de retorno, oferece uma impedância infinita às correntes de linha de seqüência zero. Ou seja, o circuito de seqüência zero está aberto quando numa ligação em  $\Delta$ . As correntes de seqüência zero podem circular no interior do triângulo formado pelas fases, uma vez que este representa um circuito em série fechado para a circulação de correntes monofásicas. Tais correntes teriam, no entanto, que ser produzidas no triângulo por indução de uma fonte externa ou por tensões geradas de seqüência zero.

Cabe salientar que mesmo quando são geradas tensões de seqüência zero nas fases do triângulo, não haverá tensões de seqüência zero nos seus terminais, já que a elevação de tensão em cada fase do gerador é igual à queda de tensão na impedância de seqüência zero da mesma fase.

Nos estudos em geral, os circuitos de seqüência zero de um transformador merecem tratamento especial, pois as várias combinações possíveis dos enrolamentos primários e secundários em Y ou  $\Delta$ , alteram o circuito de seqüência zero. Na Figura 12 são mostradas cinco ligações possíveis de transformadores com dois enrolamentos.

As setas nos diagramas de ligação mostram os possíveis trajetos para a circulação da corrente de seqüência zero. A ausência da seta indica que a ligação do transformador é tal que a corrente de seqüência zero não pode circular.

As letras P e Q identificam os pontos correspondentes no diagrama de ligação e no circuito equivalente.

Além disso, nos circuitos equivalentes mostrados, são omitidas a resistência e o caminho de circulação da corrente de magnetização para cada tipo de ligação do transformador.

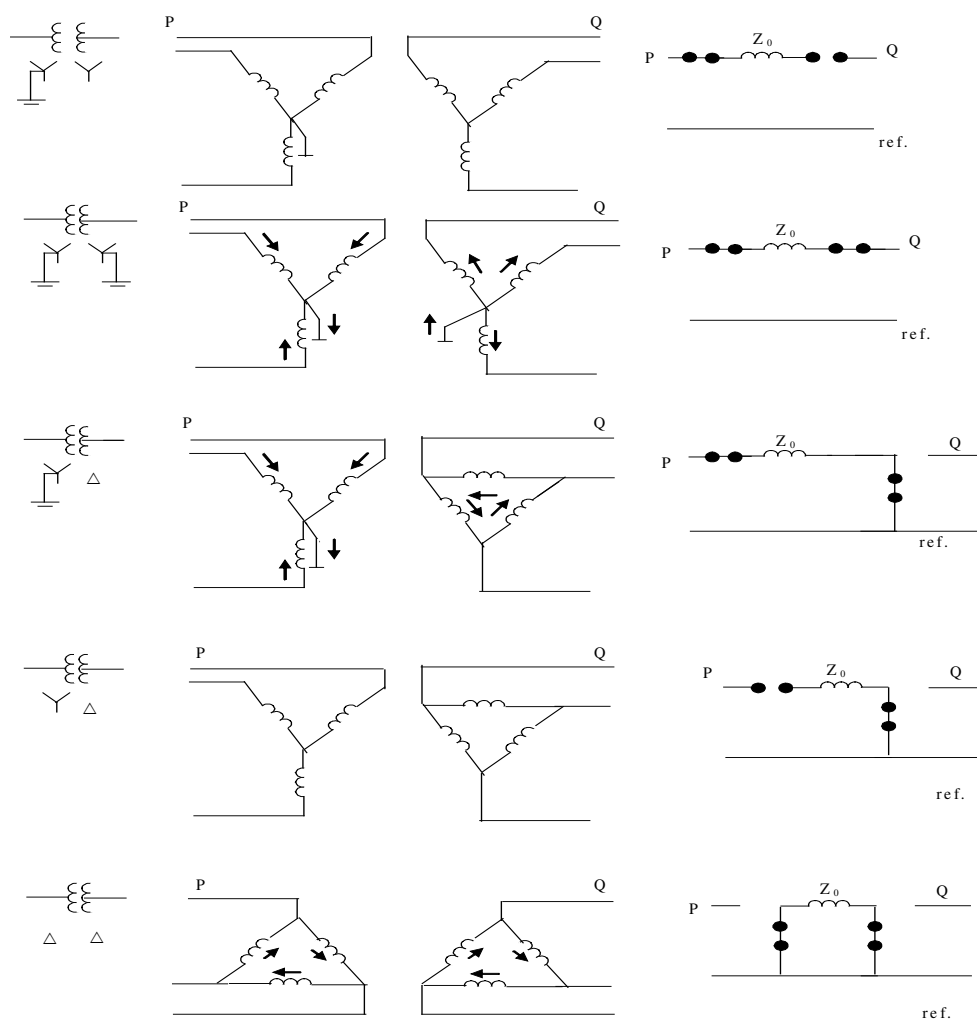


Figura 12 – Circuitos equivalentes de seqüência zero de bancos trifásicos de transformadores, com os diagramas de ligação e os símbolos para os diagramas unifilares.



## CAPÍTULO 4: MATRIZ 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 utilização computacional eficiente em avaliações do perfil de tensões na rede e das correntes durante condições de curto-circuito.

Durante a ocorrência dos curtos-circuitos, o perfil de tensões é alterado sensivelmente de uma condição do sistema para a próxima. Tão logo um determinado barramento é curto-circuitado solidamente, sua tensão deve ser igualada a zero de forma que as barras mais acopladas eletricamente a este barramento terão suas tensões muito reduzidas em relação ao valor normal. Qualquer procedimento de cálculo implementado sem a utilização de alguma ferramenta computacional adequada não seria conveniente neste caso, pois um processo iterativo completo para se determinar um novo perfil de tensões do sistema deveria ser repetido seja para cada condição operativa anterior ao defeito, seja para modificação na localização do curto-circuito ou, ainda, quando de alteração na configuração do sistema.

Sendo assim, a se considerar que cada condição acima referida exigiria uma solução iterativa e de forma que uma análise completa de um sistema com mil barras pode resultar em cerca de vinte a trinta mil condições de curto-circuito, para sistemas elétricos muito complexos, qualquer método iterativo se mostra pouco eficiente para cálculos de curto-circuito.

A disponibilização de um método rápido para montagem da matriz  $Z_{barra}$  tornou obsoleta a utilização dos métodos iterativos anteriormente aplicados, de forma que os programas em utilização para a solução dos problemas de cálculo de curto-circuito utilizam métodos de solução com base na construção da matriz impedância de barras  $Z_{barra}$ .

Se a matriz  $Z_{barra}$  associada à determinada configuração de sistema elétrico estiver disponível, ou seja, já tiver sido computada, a determinação do perfil de tensões e das cor-

rentes de curto-circuito durante os defeitos pode ser realizada com um mínimo de operações aritméticas, visto que o algoritmo utilizado originalmente para computar a matriz  $Z_{barra}$  pode ser ainda usado para modificá-la para diferentes condições do sistema, com pouca carga adicional de computação.

#### 4.1 – Descrição da Matriz $Z_{barra}$

A matriz  $Z_{barra}$  contém as impedâncias próprias de cada barra do sistema em relação a uma barra de referência escolhida arbitrariamente e as impedâncias de transferência entre duas barras quaisquer do sistema, também referidas à barra de referência indicada anteriormente.

A impedância própria de uma determinada barra é a impedância equivalente entre esta e a barra de referência. As impedâncias de transferência de uma determinada barra são determinadas através do cálculo das tensões que existiriam em cada uma das outras barras do sistema em relação à referência, quando uma barra em particular recebe uma injeção de corrente de 1,0 p.u..

As principais características de uma matriz  $Z_{barra}$  são:

- Simétrica;
- Complexa;
- Quadrada de dimensão  $n$ , onde  $n$  é o número de barras do sistema, excluindo a barra de referência;
- Matriz cheia.

## 4.2 – Aplicação da Matriz $Z_{barra}$

A Figura 13 apresenta o diagrama de barras de um sistema simplificado para estudo de curto-circuito, com incorporação da representação usual dos geradores por uma fonte de tensão em série com sua reatância subtransitória.

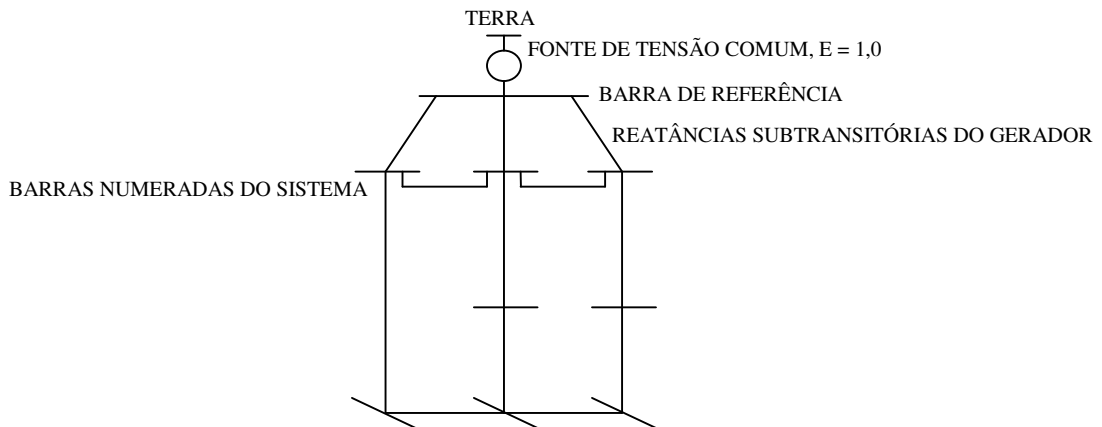


Figura 13 – Representação simplificada do sistema para estudo de curto-circuito.

Para os cálculos de curto-circuito é comum considerar que a tensão antes do defeito, no ponto de defeito, é de aproximadamente 1,0 p.u. e que todos os geradores ligados ao circuito estão operando com as mesmas tensões de 1,0 p.u. atrás de suas reatâncias internas. Além disso, também é assumida a hipótese de transferência nula de potência ativa, com os mesmos ângulos de fase. Um ponto comum, com tensão 1,0 p.u., é então definido atrás das reatâncias dos geradores e utilizado como referência. Portanto, é possível considerar que, nas condições acima referidas, o sistema elétrico está sendo alimentado por uma única fonte comum.

A equação matricial que relaciona a matriz  $Z_{barra}$  às correntes injetadas e às tensões nas barras é:

$$Z.I = E \quad (4.2.1)$$

Assim, sabendo que um circuito em determinada condição de curto-circuito pode operar apenas com uma corrente nodal, a equação matricial abaixo pode ser escrita:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & K & Z_{1k} & K & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & K & Z_{2k} & K & Z_{2m} \\ M & M & O & M & O & M \\ Z_{k1} & Z_{k2} & K & Z_{kk} & K & Z_{km} \\ M & M & O & M & O & M \\ Z_{m1} & Z_{m2} & K & Z_{mk} & K & Z_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ I_k \\ M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ M \\ E_k \\ M \\ E_m \end{bmatrix} \quad (4.2.2)$$

Nota-se, portanto, que o circuito está sujeito a uma única injeção de corrente  $I_k$  aplicada à barra  $k$ , a barra sujeita à condição de curto. Desta maneira, a coluna  $k$  permite a determinação do perfil de tensões do circuito quando ocorre um curto-circuito na barra  $k$ , desde que  $I_k$  tenha sido, ou possa ser, previamente determinada. O elemento  $Z_{kk}$  é a impedância própria da barra  $k$ . Os elementos fora da diagonal  $Z_{ik}$  representam as impedâncias de transferência entre as outras barras e a barra  $k$ .

A impedância equivalente de curto-circuito do sistema, a partir do ponto de defeito, é determinada a partir das impedâncias dos elementos do circuito (incluindo as impedâncias internas das máquinas), com as fontes de tensão internas todas curto-circuitadas.

A corrente de defeito é calculada a partir da superposição de efeitos devido a duas fontes: a corrente devido às tensões internas originais das fontes e a corrente provocada pela fonte de tensão superposta e que reduz a tensão no ponto de curto-circuito para zero. Esta tensão é, obviamente, igual ao negativo da tensão antes do curto-circuito, sendo, assim, igual a  $-1,0$  p.u. da terra ao ponto de defeito.

Quando qualquer barra é curto-circuitada solidamente, fica ligada à terra. A tensão total é, portanto, aplicada entre a barra de referência e a barra sujeita à condição de curto.

Por exemplo, para um curto na barra 6 abaixo, o diagrama associado pode ser desenhado como mostra a Figura 14.

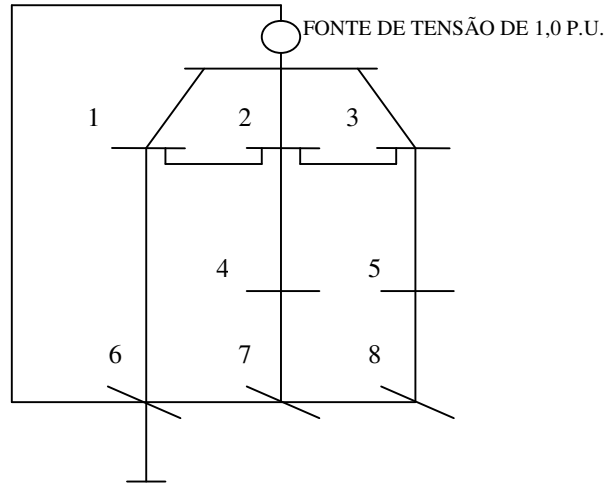


Figura 14 – Diagrama com a barra 6 em condição de curto-circuito.

A barra de referência aparece, portanto, com potencial 1,0 p.u. em relação à terra no sistema real. Por outro lado, o barramento em curto-circuito, aparece, em caso de curto sólido, com um potencial nulo em relação ao potencial de terra. Esta diferença de tensões, dependendo do ponto de referência tomado, não deve causar nenhuma dificuldade, mas deve ser levada em consideração ao se expressar os resultados de cálculo das correntes de curto-circuito. Podemos, portanto, escrever:

$$E_{p(g)} = 1 - E_{p(m)} \quad (4.2.3)$$

Onde  $E_{p(g)}$  é a tensão da barra  $p$  em relação à referência terra, da forma como seria medida no sistema real;  $E_{p(m)}$  é a tensão obtida do cálculo matricial e é medida em relação à barra de referência atrás das reatâncias transitórias do gerador.

O valor da corrente total de defeito para qualquer barra  $k$  sob condição de curto-circuito é determinado pelo valor de  $I_k$ . Este valor é obtido tomando-se o recíproco do elemento diagonal correspondente da matriz  $Z_{barra}$ .

$$I_k = \frac{1}{Z_{kk}} \quad (4.2.4)$$

As tensões que aparecem nas outras barras do sistema, quando a barra  $k$  está em condições de curto, dependem das impedâncias de transferência dadas pelos elementos fora da diagonal da coluna  $k$  da matriz  $Z_{barra}$ . Por exemplo, a tensão com relação à referência na barra  $p$  para um curto-circuito na barra  $k$  seria dada por:

$$E_p = Z_{pk} \frac{1}{Z_{kk}} \quad (4.2.5)$$

O valor da corrente em qualquer linha para um curto-circuito em uma barra  $k$  é obtido pela determinação de  $I_{pq}$ . Este valor representa a corrente que vai da barra  $p$  à barra  $q$  pela linha  $p-q$ , cuja impedância é  $Z_{linha\ p-q}$ , e pode ser escrita como:

$$I_{pq} = \frac{(Z_{qk} - Z_{pk})}{Z_{linha\ p-q}} \frac{1}{Z_{kk}} \quad (4.2.6)$$

O cálculo completo das correntes ao longo do sistema sob curto-circuito é realizado, então, por estas operações aritméticas simples, tão logo a matriz  $Z_{barra}$  tenha sido determinada.

## **CAPÍTULO 5: CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO**

Curto-circuito é o nome dado ao conjunto de fenômenos que ocorrem quando dois ou mais pontos de um circuito, que estão sob diferença de potencial, são ligados intencionalmente ou acidentalmente, através de uma impedância desprezível. Essa ligação pode ser metálica, quando se diz que há um curto-circuito franco, ou por um arco elétrico que é a situação mais comum. Uma situação intermediária é a dos curtos causados por objetos que caem sobre as linhas.

Os estudos de curto-circuito são de grande valia para os sistemas de potência, pois permitem a seleção de disjuntores e dos demais dispositivos de proteção. Através da análise que pode ser feita a partir de estudos de curto-circuito podemos definir os equipamentos que serão ou que não podem mais ser utilizados em um sistema.

Como o objetivo do projeto desenvolvido é poder apresentar e ponderar as facilidades proporcionadas pela ferramenta computacional ANAFAS quando na realização de um estudo de curto-circuito, faz-se oportuno, para um melhor entendimento e contextualização, uma descrição das formas de ocorrência e de cálculos das correntes de defeito. Por esta razão, este capítulo tem a intenção de oferecer os conceitos e a matemática assumidos quando em um estudo e posterior análise de curto-circuito.

## 5.1 – Características Gerais

Os curtos-circuitos são causados por uma falha da isolação sólida, líquida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores ou entre condutores e terra. Esta falha da isolação, dentre os seus principais motivos, apresenta:

- Dano mecânico – quebra de isoladores, quebra de suportes, queda de poste;
- Uso abusivo – exigir de um equipamento potência maior que a nominal, provocando uma deterioração rápida da isolação, fazendo esta trabalhar a uma temperatura mais alta que a de projeto;
- Umidade – isolantes porosos (orgânicos e inorgânicos) apresentam uma redução rápida da sua rigidez quando absorvem umidade;
- Descargas parciais – as isolações sólidas sempre apresentam alguns vazios em seu interior, e sob ação do campo elétrico, surgem nesses espaços descargas que por vários mecanismos (erosão, corrosão) vão lentamente reduzindo a rigidez dielétrica até sua perfuração;
- Sobretensões – as de manobra ou internas ocorrem quando se efetua um desligamento (voluntário ou provocado) ou um ligamento de um circuito, enquanto que as atmosféricas surgem nos condutores de um circuito quando cai um raio nas proximidades ou diretamente nas linhas do circuito.

Um curto-circuito é dito permanente quando é provocado por situações irreversíveis espontaneamente. Geralmente, necessita de reparos para ser sanado e causa o desligamento com bloqueio dos equipamentos de proteção.

Um curto-circuito é dito temporário ou transitório quando é provocado por situações reversíveis espontaneamente. Não necessita de reparos para ser sanado e, geralmente,



causa operação apenas parcial dos equipamentos de proteção, isto é, o circuito é desligado e restabelecido automaticamente.

Para o sistema trifásico, há maior possibilidade de ocorrência de quatro tipos de curto-circuito ou defeito:

- Trifásico;
- Bifásico ou dupla-fase;
- Bifásico para terra ou dupla-fase para terra;
- Monofásico ou fase-terra.

Levantamentos estatísticos indicam que a ocorrência dos tipos de defeitos em sistemas de potência se dá, na média, conforme a seguinte probabilidade:

- Curtos-circuitos trifásicos: 5%
- Curtos-circuitos bifásicos sem terra: 15%
- Curtos-circuitos bifásicos para terra: 10%
- Curtos-circuitos monofásicos: 70%

Cada uma dessas falhas traz, em diversas escalas, conseqüências indesejáveis a rede e aos equipamentos que a constituem. As principais implicações são:

- Superaquecimento;
- Tensões desbalanceadas que perturbam a carga e sobrecarregam o isolamento da geração e dos cabos;
- Forças eletromagnéticas atípicas e danos mecânicos;
- Perda de estabilidade síncrona.

As correntes de curto-circuito, geralmente, são bem mais elevadas que as correntes nominais dos componentes do sistema e caso não sejam interrompidas rapidamente, podem comprometer seriamente a vida útil dos equipamentos como também proporcionar riscos para as pessoas, principalmente nos casos que envolvem a terra.

No instante de um curto-circuito, ocorre uma rápida elevação da corrente atingindo valores de crista, em geral, superiores a 10 (dez) vezes a corrente nominal do circuito. Em seguida, diminui exponencialmente passando pelos valores subtransitório e transitório para alcançar, depois de vários ciclos, o valor permanente de curto-circuito.

No momento em que a corrente atinge o valor permanente, começa a ser mais relevante o efeito térmico. Os condutores ou partes condutoras dos equipamentos têm suas temperaturas aumentadas, podendo sofrer alterações na sua estrutura ou deterioração de sua isolamento, conforme o caso. Este possível estrago devido ao efeito térmico, decorrente das correntes de curto-circuito no sistema, tem o valor proporcional ao quadrado da corrente e ao tempo.

No caso dos curtos-circuitos através de arcos elétricos, podem ocorrer ainda explosões e incêndios.

Cabe ressaltar, também, que em algumas ocasiões, como em circuitos de distribuição longos, as correntes de curto-circuito podem ser da ordem das correntes de carga, o que exige técnicas especiais para sua identificação.

A intensidade das correntes de curto-circuito depende, principalmente, de:

- Tipo de curto-circuito ocorrido;
- Capacidade do sistema de geração;
- Topologia da rede elétrica;
- Tipo de aterramento do neutro dos equipamentos.

Dentre os tipos de curto-circuito mencionados, apenas o curto-circuito trifásico é equilibrado, ou seja, para os estudos envolvendo curtos trifásicos, apenas os circuitos de seqüência positiva são utilizados. Em contrapartida, para os curtos assimétricos (monofásicos e bifásicos com ou sem terra) são necessários, também, os circuitos de seqüência negativa e zero.

A análise por componentes simétricos é considerada fundamental, pois por este método, as correntes de curto-circuito causadas por defeitos assimétricos podem ser calculadas quase tão facilmente quanto às correntes de curto-circuito trifásicas ou simétricas, já que na determinação das correntes de curto-circuito, são empregados, geralmente, os equivalentes, por fase, de seqüência positiva, negativa e zero.

Vale também citar, que em estudos e análises, a condição mais severa de curto-circuito comumente considerada, pode acontecer em três situações: curto na barra; curto na linha e em condição de *line-out*, quer dizer, quando a extremidade oposta da linha onde o defeito está aplicado estiver aberta.

Além disso, cabe lembrar que os motores síncronos, que passam a funcionar como geradores quando na ocorrência de um curto-circuito, contribuem para aumentar o valor da corrente, enquanto que os transformadores, reatores e condutores contribuem para reduzi-lo.

## 5.2 – Componentes da Corrente de Curto-Circuito

As correntes de curto-circuito podem ser consideradas como constituídas por uma componente periódica (componente CA) e uma componente aperiódica (componente CC), tal que:

$$I_{CURTO} = \sqrt{2} \cdot i [\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-tR/L} \text{sen}(\alpha - \theta)] \quad (5.2.1)$$

A primeira parcela da equação representa a componente CA, que possui a frequência da rede. A magnitude da componente alternada (CA) decai exponencialmente com o tempo em função das reatâncias subtransitórias, transitórias e síncronas dos geradores e das tensões atrás dessas impedâncias.

A segunda parcela corresponde à componente contínua (componente CC), a qual apresenta um decaimento exponencial com o tempo em função da relação  $X/R$  da rede. Esta componente é responsável pela assimetria que as correntes de curto podem apresentar, tendo esta assimetria uma relação direta com o valor da tensão no ponto de aplicação do defeito, no instante da ocorrência do mesmo. Se essa tensão for nula, a assimetria será máxima ocasionando a situação mais desfavorável. Em contrapartida, quando a tensão no instante da ocorrência do defeito é máxima, a componente unidirecional CC se anula e a corrente de curto-circuito torna-se simétrica.

Por exemplo, considerando  $I_{CC0}$  como valor inicial da componente CC da corrente de curto, tem-se que:

Se  $(\alpha - \theta) = 0$  ou  $(\alpha - \theta) = \pi$ ; então  $I_{CC0} = 0$ .

Enquanto que, se  $(\alpha - \theta) = \pm \pi/2$ ; então  $I_{CC0} = \text{valor máximo de } I_{CC0}$ .

A Figura 15 mostra os primeiros ciclos de uma típica corrente de curto-circuito.

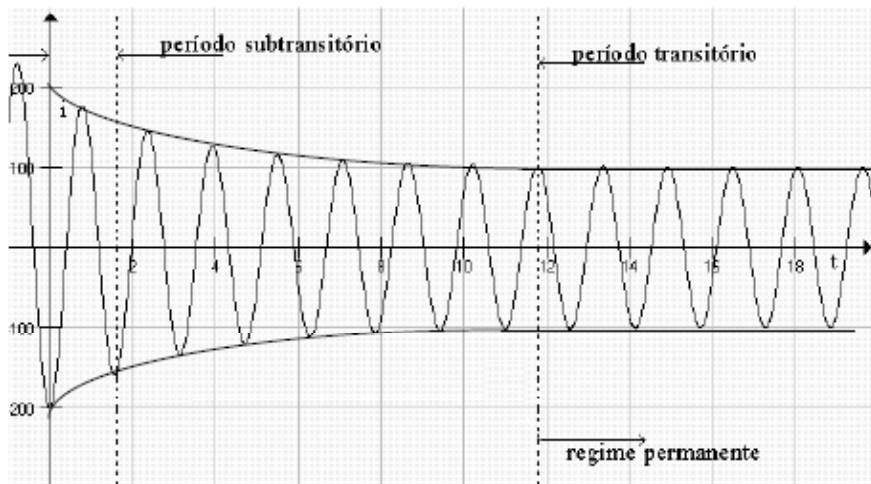


Figura 15 – Corrente típica de curto-circuito.

A corrente de curto-circuito apresenta a parte inicial da senoide deslocada em relação ao eixo dos tempos, em razão da componente contínua (CC) que, como dito, se anula mais ou menos rapidamente de acordo com a relação  $X/R$  da rede.

Durante o processo de interrupção de um curto-circuito por um disjuntor trifásico, as correntes em duas ou nas três fases terão certo grau de assimetria. Como o processo de interrupção em cada pólo do disjuntor é independente dos demais, é necessário que cada pólo seja capaz de operar satisfatoriamente na eventualidade da ocorrência simultânea dos valores mais desfavoráveis possíveis das componentes CA e CC na respectiva fase. A Figura 16 mostra a evolução detalhada da corrente assimétrica de curto-circuito ( $I_f$ ), formada pela soma das componentes CA e CC, ao longo do tempo.

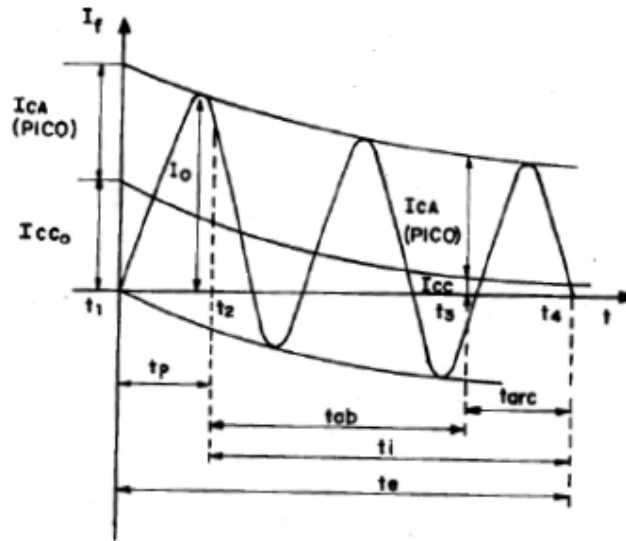


Figura 16 – Evolução da corrente assimétrica de curto ( $I_f$ ) ao longo do tempo.

Onde:

$t_1$  – instante de ocorrência da falta;

$t_2$  – instante de energização da bobina de abertura do disjuntor;

$t_3$  – instante da separação dos contatos do disjuntor;

$t_4$  – instante de interrupção da corrente;

$t_p$  – tempo de atuação da proteção;

$t_{ab}$  – tempo de abertura do disjuntor;

$t_{arc}$  – tempo de duração do arco elétrico;

$t_i$  – tempo de interrupção da falta pelo disjuntor;

$t_e$  – tempo para eliminação da falta;

$I_{CA(pico)}$  – valor de crista da componente CA da corrente de falta;

$I_{CC0}$  – valor inicial da componente CC da corrente de falta (notar que, para a condição de máxima assimetria admitida,  $I_{CC0} = I_{CA}$ ).

### 5.3 – Relação $X/R$ e Constante de Tempo da Componente Unidirecional

Como mencionado anteriormente, a relação  $X/R$  estabelece o decaimento exponencial da componente contínua (CC) que, por sua vez, define a assimetria da corrente 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 cálculos transitórios eletromagnéticos.

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

Embora diferentes valores de relação  $X/R$  possam ser calculados, faz-se conveniente definir um mesmo valor para todo o sistema considerado, com o intuito de padronizar.

Na Figura 17, é possível 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 equipamento, pois quanto maior for essa relação, mais lento é o decaimento da corrente, logo, maior será a componente unidirecional desta corrente.

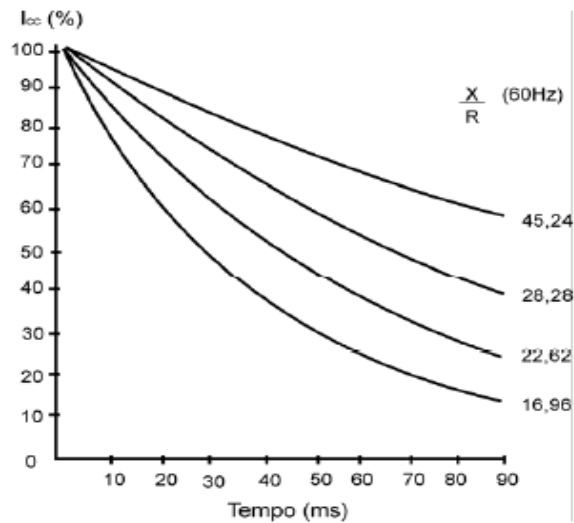


Figura 17 – Curva de decaimento exponencial da componente contínua (CC) da corrente de curto-circuito assimétrica em função do tempo, a partir do início do defeito.

#### 5.4 – Curto-Circuito Trifásico Simétrico

O curto-circuito trifásico não provoca desequilíbrio no sistema, pois se admite que o gerador síncrono gera tensões equilibradas e que todos os condutores da rede sejam solicitados de modo idêntico e conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de defeito.

Por esta razão são classificados como curtos simétricos e em seus cálculos considera-se o circuito equivalente de seqüência positiva, sendo irrelevante se o curto envolve ou não a terra.

#### 5.5 – Curtos-circuitos Assimétricos

Como já destacado, a maioria das perturbações que ocorrem nos sistemas de potência são os curtos assimétricos. Estes podem ocorrer entre linhas (bifásicos), entre linha e terra (monofásicos), ou entre duas linhas e terra (bifásicos para terra).



Tornou-se comum, também, distinguir este tipo de defeito entre defeito shunt e defeito série. O defeito shunt é aquele entre uma ou mais fases e neutro, enquanto entende-se por defeito série aquele envolvendo uma interconexão entre duas fases.

Como qualquer curto-circuito assimétrico provoca a circulação de correntes desequilibradas no sistema, 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.

Para os cálculos, os componentes de seqüências são considerados e conectados de acordo com a natureza do evento.

### 5.6 – Exemplos de Cálculo de Curto-Circuito

Para exemplificar o método de cálculo dos diferentes tipos de curto-circuito, será considerado um exemplo formado por uma linha de transmissão interligando dois sistemas de potência.

A Figura 18 ilustra o processo, sendo que os dois sistemas estão representados pelos seus equivalentes de Thévenin.

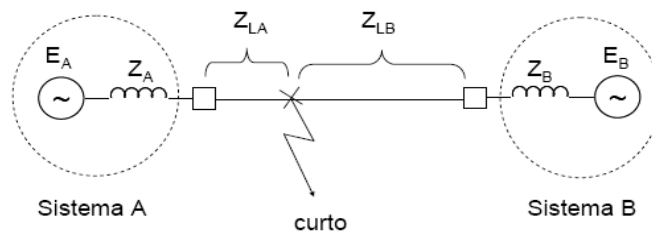


Figura 18 – Sistema exemplo para cálculo de curto-circuito.

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

$$I_{CURTO} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}} \quad (5.6.1)$$

Onde  $V_{TH}$  é a tensão no ponto de defeito e  $Z_{TH}$  é a impedância do circuito vista pelo ponto de curto.

### *Curtos-circuitos trifásicos ou simétricos*

Como explicado anteriormente, neste tipo de curto-circuito, consideramos apenas o circuito equivalente de seqüência positiva de uma fase do sistema. Considerando a Figura 18, o equivalente de seqüência positiva fica:

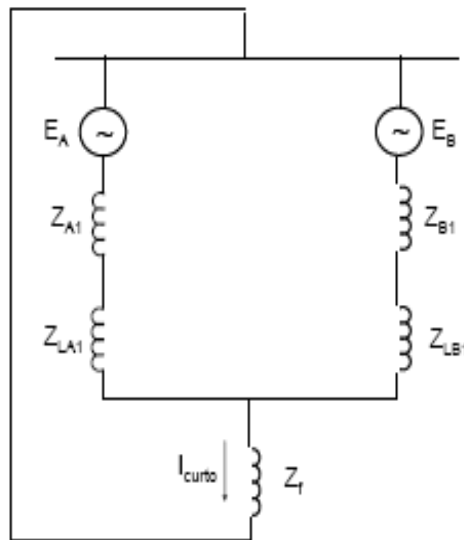


Figura 19 – Sistema equivalente para curto-circuito trifásico.

Onde:

$Z_{AI}$  - impedância equivalente do sistema A;

$Z_{LAI}$  - impedância da linha entre o sistema A e o ponto de curto;

$E_A$  - tensão do sistema A;

$Z_{BI}$  - impedância equivalente do sistema B;

$Z_{LBI}$  - impedância da linha entre o sistema B e o ponto de curto;

$E_B$  - tensão do sistema B;

$Z_f$  - impedância de defeito.

Calculando o equivalente de Thévenin no ponto de defeito, tem-se que:

$$Z_{TH} = Z_1 = (Z_{AI} + Z_{LAI}) // (Z_{BI} + Z_{LBI}) \quad (5.6.2)$$

A corrente de curto-circuito pode ser determinada por:

$$I_{CURTO} = \frac{E}{(Z_1 + Z_f)} \quad (5.6.3)$$

$E = V_{TH}$  - tensão equivalente no ponto de defeito

$I_{CURTO}$  - corrente de defeito

O circuito equivalente quando na ocorrência do curto-circuito trifásico, pode ser representado pela Figura 20:

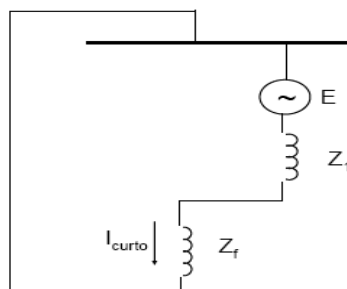


Figura 20 – Circuito equivalente para curto-circuito trifásico.

### *Curtos-circuitos assimétricos*

Os curtos assimétricos, como descritos acima, são os curtos bifásicos (com ou sem contato com a terra) e os monofásicos. Por serem curtos desequilibrados, seus cálculos são realizados através da utilização de componentes simétricos.

De acordo com a equação 3.2.8, sabe-se que:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

Onde  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  e  $I_{a0}$  são os fasores de seqüências positiva, negativa e zero respectivamente.

Para os cálculos de curtos monofásicos, a disposição dos componentes de seqüência está apresentada na Figura 21, considerando um curto da fase  $a$  para a terra.

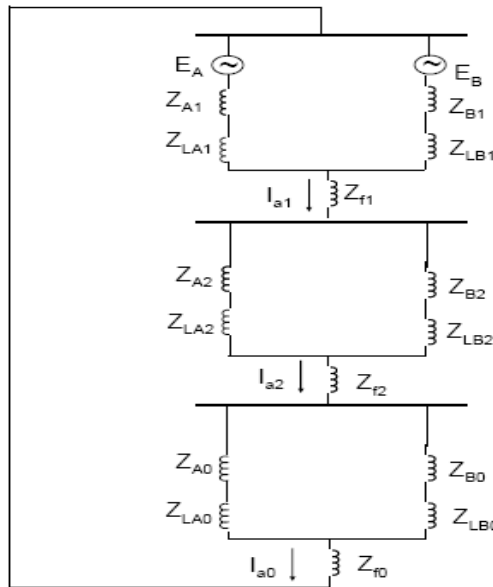


Figura 21 – Diagrama do sistema para curto-circuito monofásico.

Onde:

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

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

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

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

$Z_{f1}$  - impedância de defeito de seqüência positiva;

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

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

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

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

$Z_{f2}$  - impedância de defeito de seqüência negativa;

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

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

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

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

$Z_{f0}$  - impedância de defeito de seqüência zero.

Levando em conta que:

$$Z_{TH1} = Z_1 = (Z_{A1} + Z_{LA1}) // (Z_{B1} + Z_{LB1}) \quad (5.6.4)$$

$$Z_{TH2} = Z_2 = (Z_{A2} + Z_{LA2}) // (Z_{B2} + Z_{LB2}) \quad (5.6.5)$$

$$Z_{TH0} = Z_0 = (Z_{A0} + Z_{LA0}) // (Z_{B0} + Z_{LB0}) \quad (5.6.6)$$

$$Z_{f1} = Z_{f2} = Z_{f0} = Z_f \quad (5.6.7)$$

Então:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \cdot Z_f)} \quad (5.6.8)$$

$$I_{CURTO} = I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3 \cdot I_{a1} \quad (5.6.9)$$

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

$$I_b = I_c = 0 \quad (5.6.10)$$

Com isto, o circuito equivalente pode ser representado da seguinte maneira:

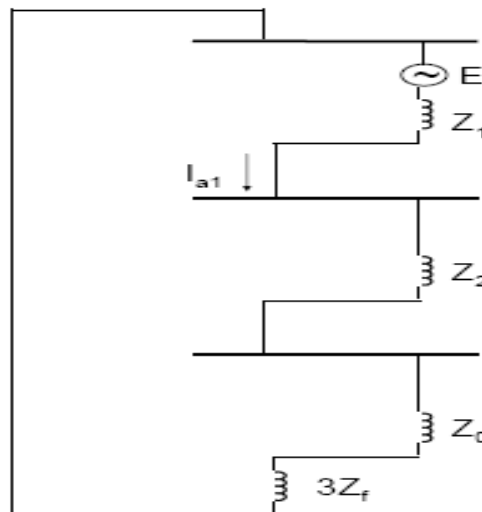


Figura 22 – Circuito equivalente para curto-circuito monofásico.

Já curtos bifásicos entre as fases *b* e *c*, podem ser representados pela Figura 23.

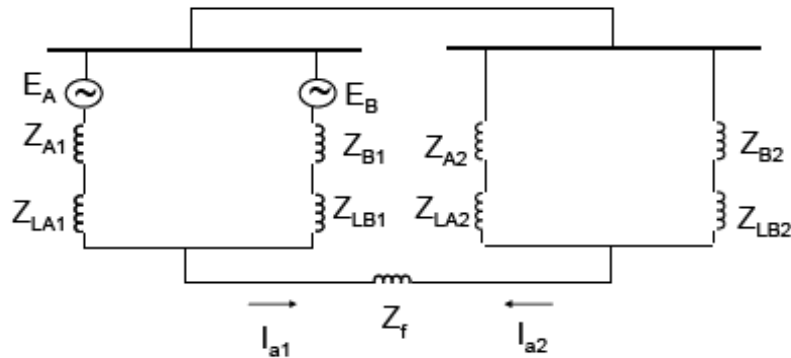


Figura 23 – Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico.

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

$$I_a = 0 \quad (5.6.11)$$

$$I_b = -I_c \quad (5.6.12)$$

Logo:

$$I_{a0} = 0 \quad (5.6.13)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (5.6.14)$$

Como  $Z_1$  e  $Z_2$  foram definidas conforme as equações apresentadas acima, para cálculos de curto-circuito monofásico, seguem que:

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)} \quad (5.6.15)$$

$$I_{CURTO} = I_{a1} \quad (5.6.16)$$

O circuito equivalente está apresentado na Figura 24.

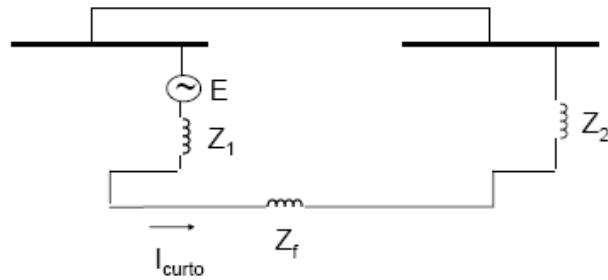


Figura 24 – Circuito equivalente para curto-circuito bifásico.

No caso em que os curtos bifásicos envolvem a terra, a representação se faz de acordo com a Figura 25, para curtos entre as fases *b* e *c*.

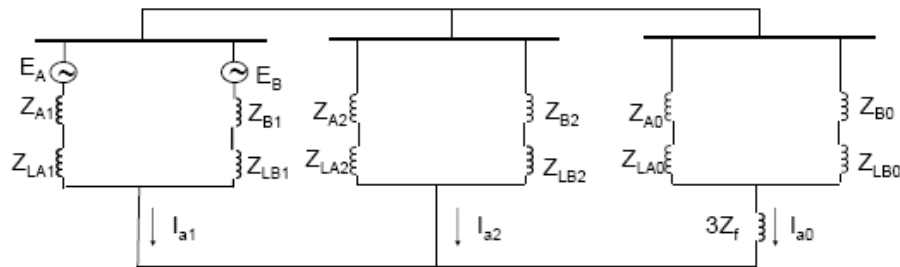


Figura 25 – Diagrama do sistema para curto-circuito bifásico para terra.

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

$$I_{a1} = \frac{E}{Z_1 + [Z_2 // (Z_0 + 3 \cdot Z_f)]} \quad (5.6.17)$$

$$I_{a2} = \frac{-I_{a1} \cdot (Z_0 + 3 \cdot Z_f)}{(Z_2 + Z_0 + 3 \cdot Z_f)} \quad (5.6.18)$$

$$I_{a0} = \frac{-I_{a1} \cdot Z_2}{(Z_2 + Z_0 + 3 \cdot Z_f)} \quad (5.6.19)$$



Visto que:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0 \quad (5.6.20)$$

Então:

$$I_{CURTO} = 2.I_{a0} - I_{a1} - I_{a2} \quad (5.6.21)$$

### 5.7 – Exemplos de Cálculo de Curto-Circuito utilizando a Matriz $Z_{barra}$

Para sistemas de grande porte, o cálculo dos diversos tipos de curto-circuito é feito com o auxílio da matriz de impedância de barra,  $Z_{barra}$ , que está relacionada com a matriz de admitância  $Y_{barra}$ , conforme a equação abaixo:

$$Z_{barra} = Y_{barra}^{-1} \quad (5.7.1)$$

A matriz de admitância de barra é obtida diretamente da rede elétrica por inspeção, e a partir dela, obtém-se a matriz de impedância de barra por inversão explícita ou com a execução de algoritmos computacionalmente mais profícuos.

Para análise em componentes de seqüência, as redes de seqüência positiva, negativa e zero têm associadas uma matriz  $Y_{barra}$  e, conseqüentemente, uma matriz  $Z_{barra}$ . Estas matrizes são mostradas a seguir.

$$Z_{barra(1)} = \begin{bmatrix} Z_{11(1)} & Z_{12(1)} & K & Z_{1m(1)} \\ Z_{21(1)} & Z_{22(1)} & K & Z_{2m(1)} \\ M & M & O & M \\ Z_{m1(1)} & Z_{m2(1)} & K & Z_{mm(1)} \end{bmatrix} \quad (5.7.2)$$

$$Z_{barra(2)} = \begin{bmatrix} Z_{11(2)} & Z_{12(2)} & K & Z_{1m(2)} \\ Z_{21(2)} & Z_{22(2)} & K & Z_{2m(2)} \\ M & M & O & M \\ Z_{m1(2)} & Z_{m2(2)} & K & Z_{mm(2)} \end{bmatrix} \quad (5.7.3)$$

$$Z_{barra(0)} = \begin{bmatrix} Z_{11(0)} & Z_{12(0)} & \mathbf{K} & Z_{1m(0)} \\ Z_{21(0)} & Z_{22(0)} & \mathbf{K} & Z_{2m(0)} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ Z_{m1(0)} & Z_{m2(0)} & \mathbf{K} & Z_{mm(0)} \end{bmatrix} \quad (5.7.4)$$

Como  $Z_{mm(1)}$ ,  $Z_{mm(2)}$  e  $Z_{mm(0)}$  representam as impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero, respectivamente, vistas pelo ponto de curto-circuito, ou seja, impedância equivalente de Thévenin, o cálculo do curto-circuito na barra  $m$  através da matriz  $Z_{barra}$  é realizado considerando as seguintes equações:

$$Z_{TH(1)} = Z_{mm(1)} \quad (5.7.5)$$

$$Z_{TH(2)} = Z_{mm(2)} \quad (5.7.6)$$

$$Z_{TH(0)} = Z_{mm(0)} \quad (5.7.7)$$

Desta forma, basta a substituição de  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_0$  das equações antes desenvolvidas por  $Z_{mm(1)}$ ,  $Z_{mm(2)}$  e  $Z_{mm(0)}$ , respectivamente.

### ***Curtos-circuitos simétricos***

Para curtos-circuitos trifásicos ou simétricos, a corrente de curto-circuito é dada por:

$$I_{CURTO} = \frac{E}{(Z_{mm(1)} + Z_f)} \quad (5.7.8)$$

### ***Curtos-circuitos assimétricos***

Para curtos-circuitos monofásicos, fase  $a$  para terra:

$$I_{CURTO} = \frac{3 \cdot E}{(Z_{mm(1)} + Z_{mm(2)} + Z_{mm(0)} + 3 \cdot Z_f)} \quad (5.7.9)$$

No caso de curtos bifásicos, nas fases  $b$  e  $c$ , sem a terra:

$$I_{CURTO} = \frac{E}{(Z_{mm(1)} + Z_{mm(2)} + Z_f)} \quad (5.7.10)$$

Já para curtos bifásicos, nas fases  $b$  e  $c$ , envolvendo a terra:

$$I_{a1} = \frac{E}{Z_{mm(1)} + [Z_{mm(2)} // (Z_{mm(0)} + 3 \cdot Z_f)]} \quad (5.7.11)$$

$$I_{a2} = \frac{-I_{a1} \cdot (Z_{mm(0)} + 3 \cdot Z_f)}{(Z_{mm(2)} + Z_{mm(0)} + 3 \cdot Z_f)} \quad (5.7.12)$$

$$I_{a0} = \frac{-I_{a1} \cdot Z_{mm(2)}}{(Z_{mm(2)} + Z_{mm(0)} + 3 \cdot Z_f)} \quad (5.7.13)$$

De acordo com a equação 3.2.8, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a0} + a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2} \\ I_{a0} + a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2} \end{bmatrix}$$

Portanto:

$$I_{CURTO} = I_b + I_c \quad (5.7.14)$$

## **CAPÍTULO 6: TÉCNICAS DE PROTEÇÃO**

Os sistemas de potência, quando na sua instalação, envolvem grandes quantias de dinheiro em projetos, implantação e manutenção. Trazem consigo também a dependência de diversos consumidores residenciais e industriais, quanto ao abastecimento de energia elétrica, tornando esta em um dos recursos fundamentais da sociedade moderna. Esta energia deve estar disponível a qualquer momento na tensão e frequência corretas e na quantidade que o consumidor precisa.

Com isto, fica notória a necessidade dos sistemas de transmissão e distribuição estarem funcionando na maior parte do tempo com perfeição, atingindo níveis satisfatórios pré-estabelecidos de frequência e duração de interrupções causadas por falhas, de qualidade da energia e de regulação de tensão.

Contudo, os sistemas de potência estão sujeitos a constantes distúrbios criados pelas variações das cargas, pelos curtos-circuitos oriundos de causas naturais ou provocados por falhas de equipamentos ou por falhas humanas.

Apesar destas constantes perturbações, o sistema se mantém em um estado quase permanente, e isto se deve, principalmente, à ação rápida e correta do sistema de proteção quando da ocorrência de imprevistos. Este desempenho elogiável é alcançado através de planejamento, construção e operação minuciosos de uma rede elétrica composta por geradores, transformadores, linhas de transmissão e de distribuição e outros equipamentos auxiliares.

## 6.1 – Princípios Básicos de Proteção

A proteção de um sistema de energia elétrica pode melhorar significativamente a continuidade de serviço do mesmo, pois interfere diretamente na frequência e duração das interrupções, evitando muitas vezes que o sistema seja desligado devido a um defeito transitório, e facilitando a localização do defeito, tornando assim menor o tempo de restabelecimento.

Como regra geral de proteção nas médias e altas tensões, considera-se que os efeitos mecânicos devem ser suportados pelos equipamentos e faz-se a proteção contra os efeitos térmicos. Para as baixas tensões (em alguns casos também para as médias tensões) foram desenvolvidos equipamentos de proteção limitadores (que cortam a corrente de curto antes de ela atingir o primeiro valor de crista) que conseguem proteger também contra os efeitos mecânicos.

Os barramentos, condutores e equipamentos das instalações elétricas e seus sistemas de proteção precisam ser dimensionados levando-se em conta os maiores valores das correntes de curto-circuito que podem ocorrer em cada parte do circuito.

Sempre que houver aumento da capacidade geradora, os cálculos precisam ser refeitos. Em alguns casos é possível, economicamente, ao invés de redimensionar os equipamentos e barramentos, introduzir reatores que limitam a corrente de curto-circuito deixando-a no valor anterior. Esse artifício é usado, geralmente, pelas concessionárias que instalam reatores de núcleo de ar na saída das subestações (SE) sempre que há aumento da capacidade de geração ou interligação com outros sistemas de geração.

Não obstante, a proteção dos sistemas elétricos de potência é desempenhada por esquemas que, por sua vez, são basicamente comandados por relés. A função primordial desses relés é identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar a

quem opera o sistema ou, dependendo do caso, promover a abertura do disjuntor associado, de modo a tentar isolar o defeito, mantendo a maior parte possível do sistema em operação normal, sem que os efeitos desse defeito prejudiquem sua normalidade. Com a abertura, o trecho defeituoso é desconectado do sistema, e assim este continua a operar com a mesma configuração, apenas desfalcado do trecho em que ocorreu o defeito.

As condições dos sistemas de potência são monitoradas constantemente pelos sistemas de medidas analógicas, que são compostos pelos transformadores de corrente (TC's) e de tensão (TP's). As correntes e as tensões transformadas em grandezas secundárias alimentam o sistema de decisões lógicas (relés de proteção), que por sua vez, compara o valor medido com o valor previamente ajustado no relé. A operação deste relé ocorrerá sempre que o valor medido exceder o valor ajustado, dando a sua atuação diretamente em um disjuntor.

Desta forma, torna-se claro que um sistema de proteção é composto, necessariamente, pelos seguintes equipamentos:

- Transformador de corrente;
- Transformador de potencial;
- Relé de proteção;
- Disjuntor.

Além desses equipamentos, o sistema de proteção precisa de uma fonte de corrente contínua fornecida pela bateria, pois se trata de um sistema vital ao bom funcionamento de qualquer circuito de energia elétrica.

Tendo em vista que a continuidade é um dos principais índices de avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, a proteção assume um papel fundamental na

estrutura de qualquer empresa do sistema elétrico, que tenha como meta apresentar um elevado índice de qualidade. Para atingir as metas destes indicadores, é necessário que tais falhas sejam identificadas e que algumas medidas sejam tomadas em intervalos de tempo convenientes, que variam, basicamente, de acordo com o nível de tensão da rede e o número de fases que se encontra com defeito, incluindo aí o contato ou não com o solo e o tempo em que a falha permanece no circuito.

Assim, com base no que foi apresentado, torna-se mais notável a seriedade do estudo de curto-circuito, pois se trata do ponto de partida para quaisquer ajustes em equipamentos que formam um sistema de proteção.

## **6.2 – Relés de Sobrecorrente**

Os relés de sobrecorrente são todos aqueles que atuam para uma corrente maior que a do seu ajuste. Eles incorporam um sensor de corrente, para se for o caso, prover a abertura da rede de energia elétrica. Por exemplo, quando a corrente de curto-circuito ultrapassa a corrente de ajuste do sensor do relé, o mesmo atua de forma instantânea ou temporizada, de acordo com a necessidade.

Os relés de sobrecorrente de fase devem atuar para curto-circuito trifásico e bifásico e o relé de terra deve atuar para curto-circuito monofásico ou fase-terra. Como mencionado acima, eles possuem dois elementos: o elemento temporizado e o elemento instantâneo. A Tabela 1 mostra os relés de sobrecorrente e os seus respectivos elementos e as nomenclaturas segundo simbologia da norma ASA (*American Standard Association*).

*Tabela 1 – Relés de sobrecorrente, elementos e nomenclaturas.*

<b>RELÉ</b>	<b>ELEMENTO</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
Fase	Temporizado	51
Fase	Instantâneo	50
Terra	Temporizado	51N ou 51GS
Terra	Instantâneo	50N

As nomenclaturas são números padrões que identificam os relés por função.

O elemento instantâneo indica que o relé é propositalmente não temporizado e nem tem característica temporizada.

O elemento temporizado tem na sua própria funcionalidade característica temporizada, ou seja, a sua atuação ocorre após certo tempo. Os relés de sobrecorrente temporizados podem ser de tempo definido e tempo inverso.

Para uma melhor compreensão da atuação e do funcionamento destes, cabe mencionar antes alguns termos essenciais:

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

**Múltiplo (M)** – indica quantas vezes a corrente de defeito é maior que o seu tap, tal que:

$$M = \frac{I_{SECUNDÁRIO\ DO\ TC}}{TAP} \quad (6.2.1)$$



**Pick-up** – termo designado para a menor corrente possível capaz de atrair o êmbolo ou a alavanca, quer dizer, 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 corrente de ajuste do relé.

**Drop-out** – termo que se refere à desoperação do relé, quer dizer, é a maior corrente capaz de iniciar o processo de desativação do relé.

Desta forma, tem-se que:

- $I < I_{PICK-UP}$  : relé em hipótese alguma irá fechar o seu contato NA (normalmente aberto);
- $I > I_{DROP-OUT}$  : relé em hipótese alguma irá desconectar (abrir) o seu contato NA que estará fechado.

De uma maneira geral, a classificação dos relés, é feita da seguinte forma:

#### ***Aspectos construtivos***

- Eletromecânicos;
- Estáticos;
- Digitais.

#### ***Atuação no circuito a proteger***

- Atuação direta;
- Atuação indireta.

### ***Instalação***

- Primário;
- Secundário.

### ***Corrente de ajuste***

- Tracionamento na mola;
- Variação de entreferro;
- Mudança de *TAP's* na bobina magnetizante;
- Variação de elementos no circuito;
- Controle por software.

### ***Tempo de atuação***

- Instantâneo;
- Temporizado de tempo definido;
- Temporizado de tempo inverso.

## **6.2.1 – Relés de Sobrecorrente Instantâneos**

Os relés de sobrecorrente instantâneos atuam de forma imediata para qualquer corrente maior que o seu ajuste. Eles não possuem, propositalmente, característica temporizada e são reconhecidos pelo número 50.

Entretanto, estes relés não são literalmente instantâneos, pois deve ser considerado o tempo correspondente à movimentação dos seus mecanismos de atuação. Este tempo depende do projeto, tipo e fabricação.

Para garantir uma segura e adequada operação do relé, é necessário ajustar sua corrente de tal forma que:

$$1,5 \cdot I_{\text{NOMINAL DE CARGA}} \leq I_{\text{AJUSTE DO RELÉ}} \leq \frac{I_{\text{CURTO MÍNIMO NO FINAL DO CIRCUITO PROTEGIDO}}}{1,5} \quad (6.2.2)$$

Cabe ressaltar que a corrente de ajuste do relé nada mais é do que a corrente de *pick-up* definida anteriormente.

Por conseguinte, analisando esta inequação, torna-se perceptível que a corrente nominal de carga deve ser multiplicada por um fator de 1,5 para garantir que o relé suporte as variações da carga sem atuar, ou seja, deve-se deixar uma folga de 40% a 50% na corrente de carga, para que desta forma o relé possa absorver sem operar as flutuações da carga. Esta margem possibilita, também, as transferências de carga devido a manobras na configuração da rede do sistema elétrico em operação.

Com relação ao fator aplicado a menor corrente de curto-circuito, este visa garantir a atuação do relé em caso de defeito. Ajusta-se a corrente de *pick-up* para um valor 1,5 vezes menor de forma que a corrente mínima de defeito possa ser muitas vezes maior que o limiar de operação, e desta forma, produza uma força de atuação no êmbolo ou na alavanca que sobrepuja todos os efeitos contrários ao movimento, garantindo confiabilidade na atuação do relé.

### **6.2.2 – Relés de Sobrecorrente Temporizados**

Os relés de sobrecorrente temporizados apresentam na sua própria funcionalidade característica temporizada, ou seja, a atuação de cada um destes ocorre, somente, após um tempo determinado.

Estes relés são conhecidos pelo número 51 e podem ser classificados como:

- Temporizado de tempo definido;
- Temporizado de tempo inverso.

Para os relés de tempo definido, basta escolher o tempo de atuação dos mesmos. Para a coordenação destes em um sistema, o relé mais afastado deve ter o menor ajuste de tempo possível, enquanto os relés, a montante, mais próximos, devem ter um tempo de ajuste cuja diferença de tempo é conhecida como  $\Delta t$ . Este valor é exclusivamente levantado pelo fabricante e depende do tipo de relé e do tipo de disjuntor envolvido.

Assim, o ajuste deve ser tal que:

$$t_{MONTANTE} = t_{JUSANTE} + \Delta t \quad (6.2.3)$$

Este tipo de coordenação é simples, mas apresenta a desvantagem de não atender a filosofia da proteção, ou seja, os curtos-circuitos mais próximos da fonte são os mais perigosos, e com este tipo de coordenação, os seus tempos de atuação tornam-se muito elevados. Desta maneira, para melhorar o desempenho desta proteção, utiliza-se relés de sobre-corrente com elemento instantâneo.

Contudo, para os relés de tempo inverso, não se escolhe o tempo de atuação, mas sim a sua curva de atuação. Esta curva é escolhida dependendo das características e condições da coordenação dos relés presentes na proteção, na qual estão integrados.

A Figura 26 mostra as zonas específicas de operação do relé, correspondente a sua corrente elétrica.

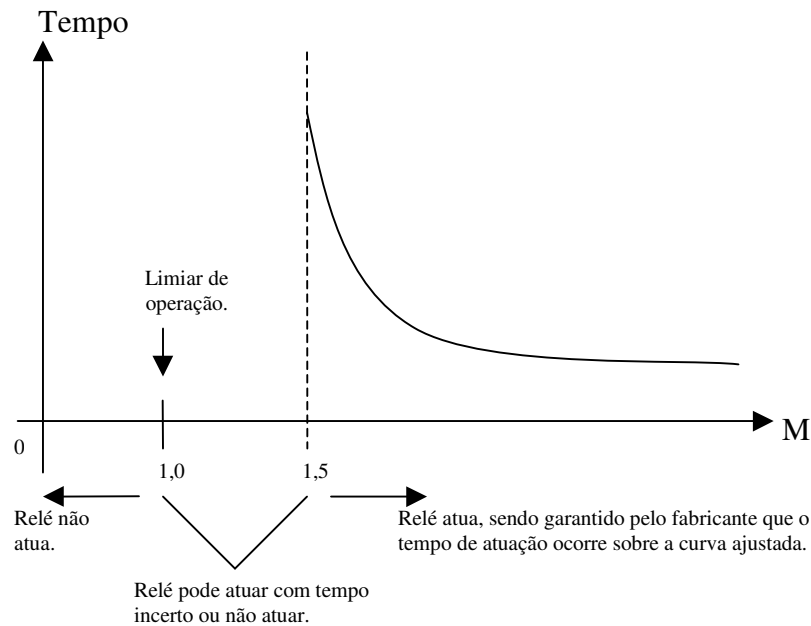


Figura 26 – Curva tempo inverso do relé de sobrecorrente.

Entre o múltiplo 1,0 e 1,5, os relés operam com um pequeno torque, não produzindo um bom desempenho no fechamento dos seus contatos e, desta maneira, não garantindo eficiência na atuação da proteção.

Este tipo de relé pode ter diferentes inclinações nas suas curvas, mas o ideal na proteção é que todos os relés tenham a mesma característica de inclinações das curvas.

A Figura 27 mostra as inclinações utilizadas.

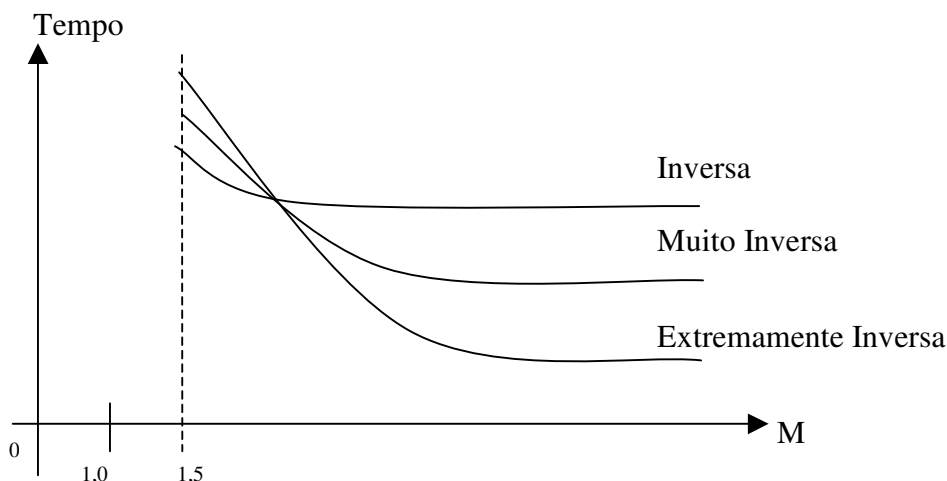


Figura 27 – Inclinações das curvas Tempo x M dos relés de tempo inverso.

Cabe salientar que para linhas de transmissão curtas são utilizados relés com curvas extremamente inversas, já que estas necessitam de uma maior sensibilidade na proteção pelo fato do nível de curto-circuito muito próximo ou quase igual em qualquer ponto da linha. Em contrapartida, para linhas médias, são aplicados relés com curvas muito inversas, enquanto para linhas longas são usados relés com curvas inversas, visto que os níveis de curto-circuito são bem diferentes ao longo deste tipo de linha de transmissão.

Assim, por apresentarem curvas de tempo inversas, estes relés são capazes de produzir uma proteção coordenada e adequada com a filosofia de proteção, quer dizer, os curtos-circuitos mais abruptos são eliminados rapidamente.

Entretanto, esta proteção pode ser melhorada com a utilização de um elemento instantâneo incorporado.

### 6.2.3 – Relés de Sobrecorrente Temporizados com Elemento Instantâneo

São relés de sobrecorrente temporizados que incorporam nos seus circuitos uma unidade instantânea. Estes relés são conhecidos como 50/51.

No circuito magnético, é incorporada uma alavanca para a atuação do elemento instantâneo.

Por exemplo, no relé de sobrecorrente eletromecânico de disco de indução, no eixo deste há um contato móvel cujo contato fixo está em paralelo com o contato fixo da unidade instantânea. Qualquer fechamento destes contatos corresponde à atuação do relé, provocando a ativação do dispositivo de abertura do disjuntor.

Vale destacar que o ajuste do relé instantâneo é feito em relação ao *TAP* escolhido do relé correspondente a sua unidade temporizada. Assim, dependendo da corrente de curto-circuito, atuará a unidade 50 ou 51 do relé.

Atuará a unidade temporizada 51 relativo à sua curva de tempo se:

$$1,5 \cdot I_{AJUSTE DO RELÉ} \leq I_{CURTO} \leq I_{AJUSTE DO RELÉ INSTANTÂNEO} \quad (6.2.4)$$

Neste caso, a corrente de curto produz um campo magnético dentro do circuito magnético. Este fluxo produz um torque suficiente para fazer o disco girar, enquanto que a força eletromagnética de atração é insuficiente para atrair a alavanca, não operando assim a unidade instantânea.

Atuará a unidade instantânea 50 se:

$$I_{CURTO} > I_{AJUSTE DO RELÉ INSTANTÂNEO} \quad (6.2.5)$$

Quando a corrente de curto-circuito for maior que a corrente do ajuste do relé instantâneo, o fluxo magnético dentro do circuito magnético é suficiente para atrair a alavanca, fechando o contato da unidade instantânea antes do fechamento do contato da unidade temporizada.

Para evitar a atuação de outros relés, o ajuste da unidade instantânea deve ser de tal maneira que não alcance os relés a jusante. Por este motivo, a corrente de ajuste do instantâneo deve ser calculada de modo a haver seletividade, sem sobreposição de zona de atuação.

Por exemplo, para linhas de transmissão, ajusta-se a corrente do relé instantâneo para um curto-circuito trifásico a 85% da linha protegida. Portanto, para qualquer curto trifásico entre o ponto de instalação do relé 50/51 e o ponto a 85% da linha de transmissão, ocorre a atuação da unidade instantânea 50.

#### **6.2.4 – Relés de Sobrecorrente de Neutro**

Estes relés são também conhecidos como relés de sobrecorrente de seqüência zero e apresentam um esquema com os três TC's em paralelo, no qual as correntes trifásicas primárias formam através do TC uma réplica de correntes trifásicas no secundário.

Aplicando-se a 1ª Lei de Kirchhoff, tem-se que:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (6.2.6)$$

Como já demonstrado, a soma das correntes corresponde somente a seqüência zero, ou seja:

$$I_N = 3 \cdot I_0 \quad (6.2.7)$$

Assim, torna-se claro que toda corrente do sistema elétrico que escoar pela terra, tem o seu reflexo no relé de neutro. O relé de neutro é sensível apenas às correntes que possuem seqüência zero.

A utilização do relé de neutro produziu um avanço na proteção quanto à sua sensibilidade para atuar em pequenos curtos-circuitos que envolvem a terra.



Na operação normal do sistema, as cargas estão equilibradas ou levemente desequilibradas. Portanto, não passa corrente ou apenas uma pequena corrente atravessa o relé de neutro. Deste modo, a corrente adequada de ajuste do relé de neutro deve satisfazer a inequação:

$$I_{AJUSTE\ DO\ RELÉ\ DE\ NEUTRO} \leq \frac{I_{CC-1\phi\ MINIMO\ NO\ FINAL\ DO\ TRECHO}}{1,5} \quad (6.2.8)$$

Porém, em geral, esta inequação não é levada em consideração, pois 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 expressão abaixo.

$$0,1 \cdot I_{NOMINAL} \leq I_{AJUSTE\ DO\ RELÉ\ DE\ NEUTRO} \leq 0,45 \cdot I_{NOMINAL} \quad (6.2.9)$$

Onde:

$I_{NOMINAL}$  : corrente nominal de carga do circuito protegido

O valor de ajuste da corrente do relé de neutro depende do local do sistema elétrico. Na zona de geração, a corrente está mais equilibrada e não se permite um desequilíbrio para não danificar o gerador, logo o ajuste tem que ser feito objetivando uma maior sensibilidade.

Na distribuição, sendo fim de linha, ou seja, praticamente circuitos terminais onde estão distribuídas as cargas trifásicas e monofásicas, o desequilíbrio é maior, dando maior folga no ajuste de corrente do relé de neutro. O valor de ajuste pode ser algo em torno de  $0,45 \cdot I_{NOMINAL}$ .

Na parte intermediária, isto é, na linha de transmissão, o ajuste é menor perto da geração e maior quanto mais próximo da distribuição.

### 6.2.5 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente

Os relés de sobrecorrente devem operar o mais rápido possível, dentro da sua seletividade de proteção.

Para formar uma cadeia com seqüência de proteção, onde o relé mais próximo do defeito atue prioritariamente, deve haver uma escada de tempos de atuação sucessivos dos relés, garantindo a proteção de vanguarda e sucessivas retaguardas.

Coordenação é uma estratégia de proteção, onde para qualquer corrente de curto-circuito, há uma escada de tempo no sentido do relé de vanguarda para os relés de retaguarda, de modo a garantir e permitir seletividade no desligamento do sistema.

A coordenação da proteção faz-se necessária, pois o sistema de proteção também está sujeito à falhas. Neste caso, a atuação da proteção de retaguarda torna-se imprescindível.

Dependendo do sistema, é possível utilizar os seguintes esquemas de proteção:

- Proteção Primária, onde as proteções são duplicadas. Se houver falha de um relé o outro atua. No caso, só se exige coordenação quando a falha ocorrer no sistema de abertura do disjuntor;
- Proteção Secundária, geralmente adotada em sistema de porte modesto, onde a falha do sistema de proteção é garantida pela proteção de retaguarda (a montante) de acordo com a respectiva coordenação.

Neste último esquema, a coordenação dos relés deve ser uma seqüência de proteção em que o relé mais próximo atue primeiro. Se este falhar, deve atuar o relé a montante mais próximo, ou seja, a primeira proteção de retaguarda. Na conseqüente falha desta últi-

ma, deve atuar a segunda retaguarda, ou seja, o próximo relé a montante; e assim sucessivamente.

## **CAPÍTULO 7: PROGRAMA ANAFAS**

O Programa de Análises de Falhas Simultâneas (ANAFAS) foi desenvolvido para ser utilizado de modo interativo em sistemas de potência de grande porte. Este programa computacional visa aperfeiçoar o tempo de simulação e de análises dos resultados nos diversos tipos de estudos que requerem a simulação de condições de defeito em sistemas de energia elétrica, como dimensionamento de equipamentos, análise de ocorrências e ajuste de proteção.

Este programa, portanto, constitui-se em uma poderosa ferramenta de auxílio para estudos e análise de curto-circuito. Como o objetivo maior deste trabalho é identificar, apresentar e analisar todas estas facilidades e possíveis dificuldades na utilização do ANAFAS, nada mais pertinente do que serem delineadas as principais características deste programa.

### **7.1 – Principais Características**

O ANAFAS é flexível, permitindo a execução de estudos individuais, onde o usuário define cada caso; e de estudos macro, onde os casos são gerados automaticamente pelo programa.

Ambos os estudos proporcionam solução orientada a ponto de falta, cujo relatório de resultados apresenta as tensões e correntes de defeito e de contribuição; e solução orientada a ponto de monitoração, cujo relatório de resultados apresenta o valor de grandezas definidas pelo usuário.

O ANAFAS tem baixo custo de instalação, ou seja, tem poucos requisitos de “hardware” e “software”. As suas principais características funcionais são:

- Facilidade e flexibilidade na definição dos casos, permitindo a modelagem de defeitos simultâneos (compostos) aplicados sobre barras e/ou pontos intermediários de linhas de transmissão; modelagem de diversos tipos de defeito, incluindo curtos-circuitos “shunt”, com ou sem impedância; e de aberturas (interrupção) de circuito;
- Grande capacidade, permitindo a solução direta de curtos-circuitos em sistemas elétricos de grande porte, aliada a alta eficiência computacional, devido ao uso de técnicas de esparsidade (matrizes e vetores esparsos), resultando em execução rápida, independentemente do porte do sistema;
- Permite modelagem fiel do sistema elétrico, com possibilidade de representação do carregamento pré-falta, defasamento de transformadores, “tap” dos transformadores fora da posição nominal, etc;
- Execução de estudos macro especificados pelo usuário;
- Solução orientada a ponto de falta ou a ponto de monitoração, onde o usuário define as grandezas a serem observadas;
- Outros serviços auxiliares como: cálculo de equivalentes de curto-circuito, estudo de superação de disjuntores, diversos tipos de relatórios de dados, comparação de configurações e evolução de nível de curto-circuito.

## **7.2 – Metodologia Implantada**

A metodologia utilizada combina a representação em componentes de seqüência para o sistema balanceado com a representação trifásica para a parte desbalanceada do sistema (defeito). Esta combinação permite a representação acurada de defeitos assimétricos simultâneos.

A rede elétrica é modelada por duas matrizes de admitâncias de barra esparsas, uma assimétrica com estrutura simétrica para a seqüência positiva (a de seqüência negativa é a transposta desta) e uma simétrica para a seqüência zero.

O algoritmo geral de solução, para qualquer situação de curto, segue os seguintes passos principais:

- i. Construção de equivalentes em coordenadas de seqüência referentes às barras envolvidas na falta;
- ii. Alterações balanceadas nos equivalentes (criação das barras fictícias devido às aberturas e às faltas intermediárias);
- iii. Construção de equivalente trifásico contendo somente as barras afetadas pela falta;
- iv. Alteração do equivalente trifásico para representar as alterações desbalanceadas referentes às faltas;
- v. Solução do sistema equivalente trifásico;
- vi. Transformação novamente para os equivalentes em componentes de seqüência, obtendo injeções correspondentes às correntes de curto;
- vii. Obtenção, a partir das injeções de corrente, das tensões pós-falta em todas as barras do sistema desejadas.

Os equivalentes do passo i do algoritmo de solução apresentado são modelados por duas matrizes cheias de dimensões reduzidas, uma assimétrica para a seqüência positiva e uma simétrica para a seqüência zero, como dito anteriormente.

Na construção destes equivalentes e para obtenção das tensões pós-defeito (passo vi do algoritmo) são utilizadas técnicas de vetores esparsos, que garantem a eficiência computacional do algoritmo de solução.

Por conseqüência da utilização de equivalentes de dimensões reduzidas e de técnicas de esparsidade, o tempo total gasto na simulação de uma falta é quase independente do porte do sistema, dependendo basicamente do número de barras em que se deseja calcular grandezas pós-defeito.

## **CAPÍTULO 8: RESULTADOS DE SIMULAÇÃO**

Para as simulações realizadas com o auxílio do programa ANAFAS, foram escolhidos sistemas genéricos.

Em um primeiro momento foi considerado um sistema A em anel sem carregamento pré-falta. No segundo caso, o mesmo sistema A foi simulado considerando o carregamento pré-defeito. Os resultados destes dois casos foram apresentados e comentados em seguida, evidenciando a facilidade de se determinar as intensidades das correntes de curto-circuito ao longo de uma linha de transmissão utilizando o programa.

Para finalizar, foi considerado um sistema radial B, onde foram definidos os ajustes e realizada uma coordenação dos relés de sobrecorrente utilizados.



## 8.1 – CASO 1: Sistema A sem Carregamento Pré-Falta

O diagrama unifilar do sistema A encontra-se na Figura 28 abaixo.

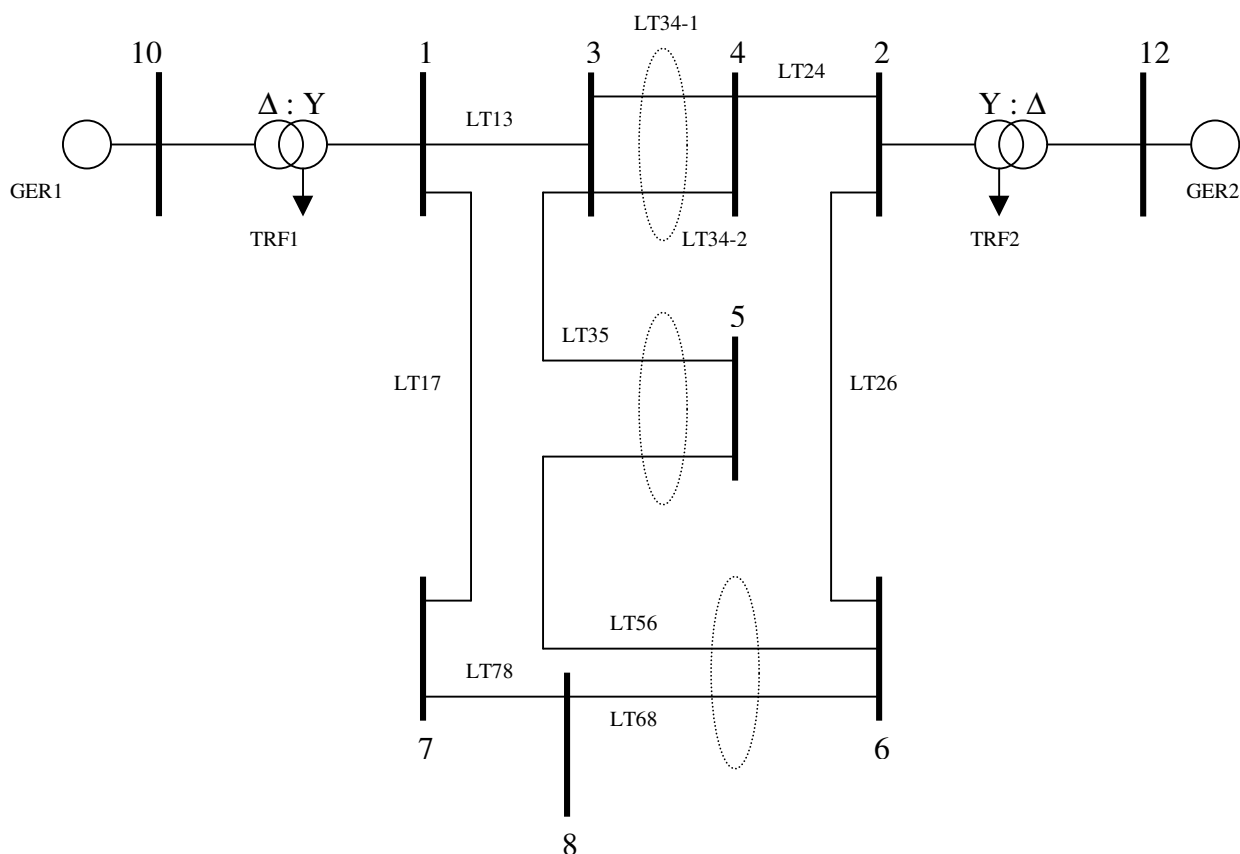


Figura 28 – Diagrama unifilar do sistema genérico A.

Os dados gerais dos circuitos e dos elementos do sistema genérico A considerado sem carregamento pré-falta encontram-se nas tabelas abaixo. Todos os dados estão expressos na base 100 MVA de potência aparente, ou seja,  $S_{BASE} = 100$  MVA.

Tabela 2 – Dados gerais das barras do sistema A em repouso.

<b>DADOS DE BARRAS</b>			
<b>NÚMERO</b>	<b>NOME</b>	<b>TIPO</b>	<b>TENSÃO BASE (kV)</b>
1	B.HUM	Normal	230.00
2	B.DOIS	Normal	230.00
3	B.TRES	Normal	230.00
4	B.QUATRO	Normal	230.00
5	B.CINCO	Normal	230.00
6	B.SEIS	Normal	230.00
7	B.SETE	Normal	230.00
8	B.OITO	Normal	230.00
9	B.NOVE	Mid-point	230.00
10	B.DEZ	Normal	6.60
11	B.ONZE	Mid-point	230.00
12	B.DOZE	Normal	6.60

Tabela 3 – Dados gerais dos circuitos do sistema A em repouso.

<b>DADOS DE CIRCUITOS</b>				
<b>CIRCUITOS</b>	<b>IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS</b>			
	<b>R<sub>1</sub> (%)</b>	<b>X<sub>1</sub> (%)</b>	<b>R<sub>0</sub> (%)</b>	<b>X<sub>0</sub> (%)</b>
LT13	0.12	2.80	0.22	4.80
LT17	0.12	2.80	0.22	4.80
LT24	0.10	1.92	0.20	3.92
LT26	0.10	1.92	0.20	3.92
LT34 – 1	0.08	1.75	0.17	3.46
LT34 – 2	0.08	1.75	0.17	3.46
LT35	0.15	3.47	0.53	10.63
LT56	0.16	3.68	0.49	10.23
LT68	0.15	3.47	0.53	10.63
LT78	0.16	3.68	0.49	10.23

Tabela 4 – Dados gerais dos elementos do sistema A em repouso.

<b>DADOS DE ELEMENTOS</b>				
<b>ELEMENTOS</b>	<b>R<sub>1</sub> (%)</b>	<b>X<sub>1</sub> (%)</b>	<b>R<sub>0</sub> (%)</b>	<b>X<sub>0</sub> (%)</b>
GER1	0.00	5.27	INFINITO	INFINITO
GER2	0.00	4.47	INFINITO	INFINITO
TRF1	0.00	4.58	0.00	4.58
TRF2	0.00	3.78	0.00	3.78

Tabela 5 – Dados gerais das impedâncias mútuas do sistema A em repouso.

<b>DADOS DE IMPEDÂNCIAS MÚTUAS</b>			
<b>CIRCUITO 1</b>	<b>CIRCUITO 2</b>	<b>R<sub>M</sub> (%)</b>	<b>X<sub>M</sub> (%)</b>
LT34 – 1	LT34 – 2	0.52	2.19
LT35	LT56	0.32	1.12
LT56	LT68	-0.58	-2.88

### 8.1.1 – Diagramas de Seqüência do Sistema A

Para uma melhor visualização do processo de cálculo e um melhor entendimento dos resultados provenientes das simulações, nas figuras abaixo são apresentados os diagramas de seqüência positiva e zero do sistema genérico A estudado.

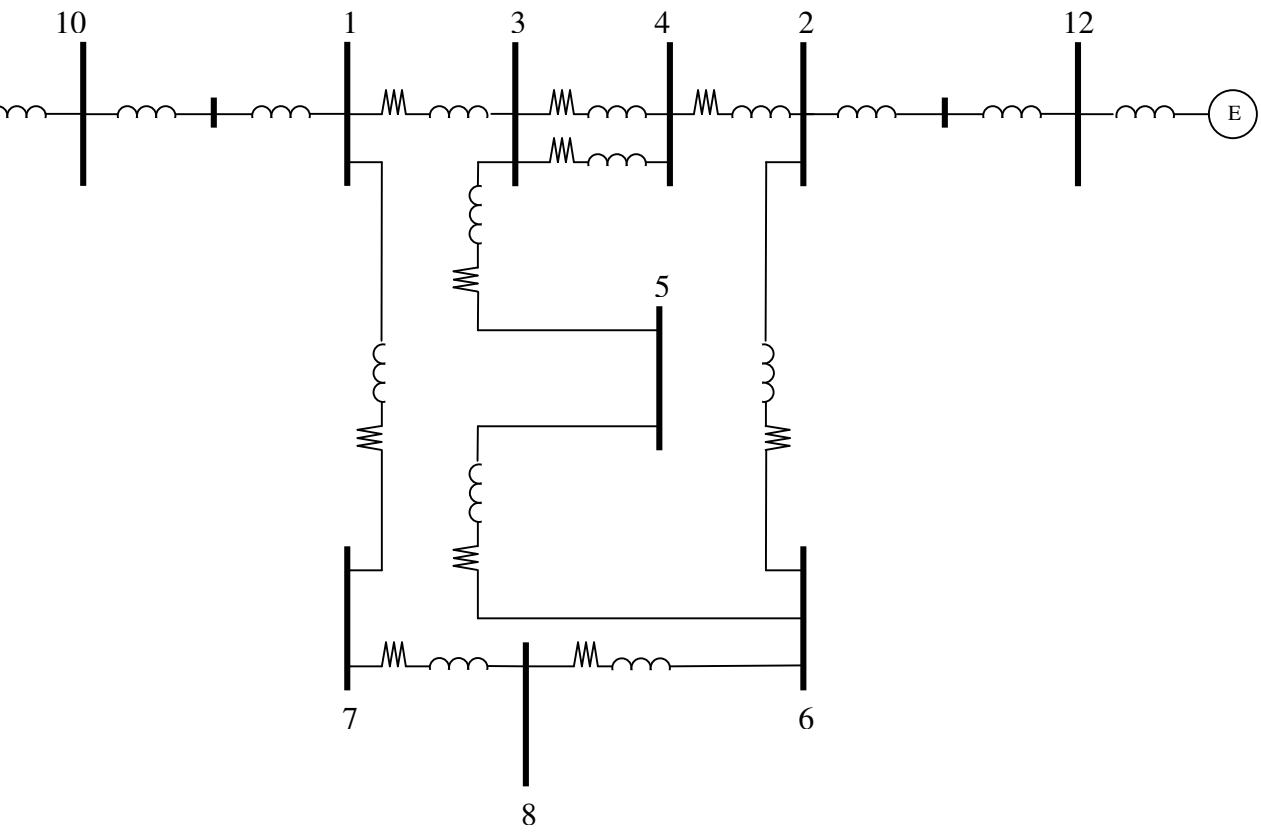


Figura 29 – Diagrama unifilar de seqüência positiva do sistema A.

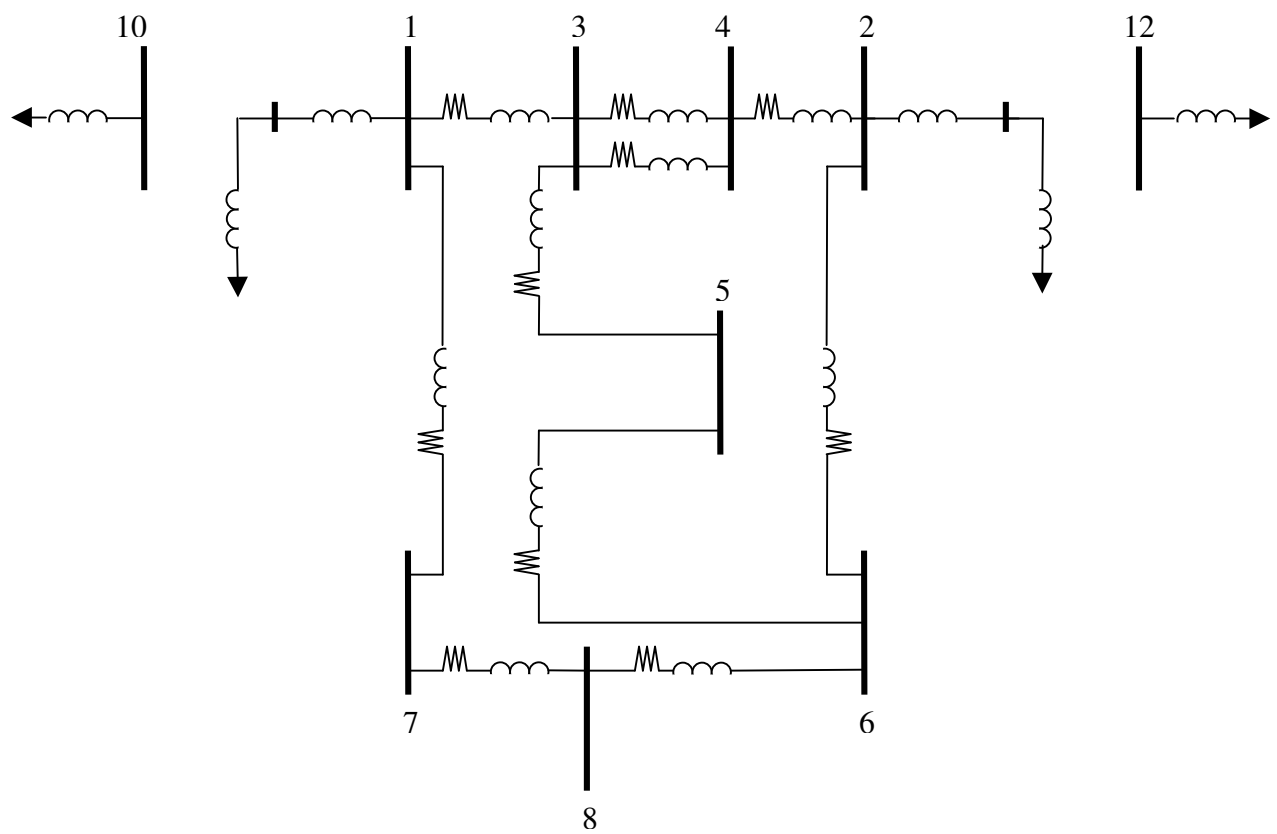


Figura 30 – Diagrama unifilar de seqüência zero do sistema A.

**8.1.2 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 operando.**

Corrente de curto-circuito		BARRA 3				BARRA 4				Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição		Tensão		Corrente de contribuição		Tensão		
(A)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	Porcentagem (%)
4407	17.556			0.0	0.000	948	3.776	8.8	0.066	0
4371	17.411	3310	13.185	1.5	0.012	1061	4.227	9.3	0.070	5
4338	17.283	3165	12.608	2.9	0.022	1173	4.675	9.8	0.074	10
4310	17.171	3025	12.051	4.2	0.032	1285	5.120	10.1	0.076	15
4286	17.074	2889	11.510	5.4	0.040	1397	5.564	10.4	0.078	20
4266	16.993	2757	10.984	6.4	0.048	1508	6.009	10.5	0.079	25
4249	16.926	2629	10.472	7.3	0.055	1620	6.454	10.5	0.079	30
4236	16.874	2503	9.972	8.1	0.061	1732	6.901	10.4	0.079	35
4226	16.835	2381	9.483	8.8	0.066	1846	7.352	10.3	0.077	40
4220	16.811	2260	9.004	9.4	0.071	1960	7.807	10.0	0.075	45
4217	16.800	2142	8.533	9.9	0.075	2075	8.268	9.6	0.072	50
4218	16.803	2025	8.068	10.3	0.078	2193	8.735	9.1	0.069	55
4222	16.820	1910	7.610	10.6	0.080	2312	9.209	8.6	0.065	60
4230	16.850	1797	7.157	10.8	0.082	2433	9.693	7.9	0.059	65
4241	16.894	1684	6.708	10.9	0.082	2557	10.186	7.1	0.054	70
4256	16.953	1572	6.262	10.9	0.082	2684	10.691	6.2	0.047	75
4274	17.026	1460	5.817	10.8	0.082	2814	11.209	5.2	0.039	80
4296	17.114	1349	5.373	10.6	0.080	2947	11.741	4.1	0.031	85
4322	17.217	1237	4.928	10.3	0.078	3085	12.289	2.9	0.022	90
4352	17.336	1125	4.482	9.9	0.075	3227	12.855	1.5	0.011	95
4386	17.471	1012	4.033	9.4	0.071			0.0	0.000	100

**8.1.3 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT34-1 com o circuito LT34-2 operando.**

Corrente de curto-circuito (fase A)		BARRA 3					BARRA 4					Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			
(A)	pu	(A)	pu	A	B	C	(A)	pu	A	B	C	Porcentagem (%)
4715	18.782			0.000	0.961	0.973	987	3.933	0.118	0.946	0.948	0
4670	18.604	3560	14.181	0.015	0.961	0.972	1110	4.424	0.120	0.947	0.950	5
4631	18.447	3398	13.537	0.029	0.960	0.971	1233	4.910	0.121	0.948	0.951	10
4596	18.310	3242	12.917	0.042	0.960	0.970	1354	5.394	0.122	0.949	0.953	15
4567	18.192	3092	12.317	0.054	0.959	0.969	1475	5.876	0.121	0.950	0.955	20
4542	18.093	2946	11.736	0.065	0.959	0.968	1596	6.357	0.120	0.951	0.956	25
4521	18.011	2804	11.171	0.075	0.958	0.967	1717	6.840	0.118	0.952	0.957	30
4505	17.947	2666	10.622	0.084	0.957	0.965	1839	7.325	0.115	0.953	0.959	35
4493	17.900	2532	10.086	0.092	0.957	0.964	1962	7.815	0.112	0.954	0.960	40
4486	17.870	2400	9.561	0.099	0.956	0.963	2086	8.309	0.107	0.955	0.961	45
4482	17.856	2271	9.047	0.105	0.955	0.962	2211	8.810	0.102	0.955	0.963	50
4483	17.859	2144	8.541	0.111	0.955	0.961	2339	9.318	0.096	0.956	0.964	55
4488	17.878	2019	8.043	0.115	0.954	0.960	2469	9.836	0.089	0.957	0.965	60
4497	17.915	1895	7.550	0.119	0.953	0.958	2602	10.365	0.081	0.957	0.966	65
4510	17.967	1773	7.062	0.122	0.952	0.957	2738	10.905	0.073	0.958	0.967	70
4528	18.038	1651	6.577	0.124	0.951	0.956	2877	11.460	0.063	0.959	0.969	75
4550	18.125	1530	6.095	0.126	0.950	0.955	3020	12.031	0.053	0.959	0.970	80
4576	18.231	1409	5.613	0.126	0.949	0.953	3168	12.619	0.041	0.960	0.971	85
4608	18.355	1288	5.130	0.126	0.948	0.952	3320	13.226	0.029	0.960	0.972	90
4644	18.499	1166	4.644	0.125	0.947	0.950	3478	13.855	0.015	0.961	0.973	95
4685	18.664	1043	4.156	0.123	0.946	0.949			0.000	0.961	0.974	100

Com o auxílio do programa, torna-se possível obter as amplitudes das correntes para qualquer tipo de curto-circuito ao longo de uma linha de transmissão. O programa é capaz de gerar um relatório com os valores das correntes de curto-circuito a cada 1%, se for o caso, do comprimento da linha de transmissão entre as barras consideradas no estudo.

Sabendo isto, tomando como base os resultados alcançados nas simulações dos casos 8.1.2 e 8.1.3, torna-se clara e rápida a percepção quanto ao pior caso de curto-circuito em uma determinada condição de operação do sistema considerado. Neste caso, é fácil

notar que o curto-circuito monofásico resulta nos valores mais altos de correntes, constituindo o pior caso para a atual configuração do sistema.

**8.1.4 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado.**

Corrente de curto-circuito		BARRA 3				BARRA 4				Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição		Tensão		Corrente de contribuição		Tensão		
(A)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	Porcentagem (%)
4297	17.117			0.0	0.000	1668	6.644	15.5	0.116	0
4283	17.062	2579	10.274	1.2	0.009	1704	6.789	15.0	0.113	5
4271	17.013	2530	10.077	2.3	0.018	1741	6.936	14.5	0.109	10
4259	16.968	2481	9.885	3.4	0.026	1778	7.083	14.0	0.105	15
4250	16.929	2434	9.697	4.5	0.034	1815	7.232	13.5	0.101	20
4241	16.895	2388	9.513	5.5	0.042	1853	7.383	12.9	0.097	25
4234	16.866	2343	9.332	6.5	0.049	1891	7.535	12.3	0.092	30
4228	16.842	2298	9.154	7.5	0.056	1930	7.688	11.6	0.088	35
4223	16.823	2254	8.979	8.4	0.063	1969	7.844	10.9	0.082	40
4219	16.809	2211	8.808	9.2	0.069	2009	8.001	10.2	0.077	45
4217	16.799	2169	8.639	10.0	0.076	2049	8.161	9.5	0.071	50
4216	16.795	2127	8.472	10.8	0.082	2089	8.323	8.7	0.066	55
4216	16.795	2086	8.309	11.6	0.087	2130	8.487	7.9	0.059	60
4217	16.800	2045	8.147	12.3	0.093	2172	8.653	7.0	0.053	65
4220	16.810	2005	7.988	13.0	0.098	2215	8.822	6.2	0.046	70
4223	16.825	1966	7.831	13.7	0.103	2258	8.994	5.2	0.039	75
4228	16.844	1927	7.675	14.3	0.108	2302	9.169	4.3	0.032	80
4234	16.869	1888	7.522	14.9	0.112	2346	9.347	3.3	0.025	85
4242	16.898	1850	7.370	15.4	0.116	2392	9.529	2.2	0.017	90
4250	16.933	1812	7.220	16.0	0.120	2438	9.714	1.1	0.009	95
4260	16.972	1775	7.071	16.4	0.124			0.0	0.000	100



**8.1.5 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado.**

Corrente de curto-circuito (fase A)		BARRA 3					BARRA 4					Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			
(A)	pu	(A)	pu	A	B	C	(A)	pu	A	B	C	Porcentagem (%)
4663	18.577			0.000	0.962	0.958	1854	7.384	0.139	0.947	0.963	0
4629	18.442	2748	10.947	0.014	0.962	0.959	1882	7.497	0.138	0.948	0.963	5
4599	18.323	2688	10.710	0.027	0.961	0.959	1911	7.614	0.136	0.949	0.963	10
4573	18.218	2632	10.484	0.040	0.960	0.960	1941	7.734	0.134	0.950	0.963	15
4550	18.127	2578	10.269	0.051	0.960	0.960	1973	7.859	0.131	0.950	0.963	20
4531	18.050	2526	10.062	0.062	0.959	0.961	2005	7.988	0.128	0.951	0.963	25
4515	17.985	2476	9.864	0.072	0.958	0.961	2039	8.122	0.124	0.952	0.963	30
4502	17.934	2428	9.674	0.082	0.958	0.962	2073	8.260	0.119	0.953	0.963	35
4492	17.895	2383	9.492	0.090	0.957	0.962	2109	8.404	0.114	0.954	0.963	40
4486	17.869	2339	9.317	0.098	0.956	0.962	2147	8.553	0.108	0.955	0.962	45
4482	17.856	2297	9.149	0.106	0.955	0.962	2186	8.707	0.102	0.955	0.962	50
4482	17.855	2256	8.987	0.112	0.955	0.963	2226	8.867	0.095	0.956	0.962	55
4485	17.866	2217	8.832	0.119	0.954	0.963	2268	9.034	0.087	0.957	0.962	60
4491	17.890	2179	8.682	0.124	0.953	0.963	2311	9.208	0.079	0.958	0.961	65
4500	17.926	2143	8.539	0.129	0.952	0.963	2357	9.388	0.070	0.958	0.961	70
4512	17.975	2109	8.400	0.133	0.952	0.963	2404	9.576	0.060	0.959	0.961	75
4528	18.037	2075	8.266	0.137	0.951	0.963	2453	9.771	0.050	0.960	0.960	80
4546	18.112	2043	8.137	0.140	0.950	0.963	2504	9.975	0.038	0.960	0.960	85
4569	18.200	2012	8.013	0.143	0.949	0.963	2558	10.188	0.026	0.961	0.959	90
4594	18.303	1981	7.893	0.145	0.948	0.963	2613	10.411	0.014	0.962	0.959	95
4624	18.420	1952	7.778	0.147	0.947	0.963			0.000	0.962	0.958	100

Com o auxílio do programa, torna-se possível, também, obter as correntes de qualquer tipo de curto-circuito para condições de operação distintas de um mesmo sistema. Nos casos 8.1.4 e 8.1.5, o programa obteve os valores das correntes de curto-circuito trifásico e monofásico considerando o sistema operando sem o circuito LT34-2.

Esta propriedade do software é de grande importância para estudos de curto-circuito, pois na ocorrência de um problema que tire de operação o circuito LT34-2, o sistema deve continuar operando sob tal condição, e fazendo uso desta ferramenta computa-

cional, os novos valores das correntes de curto-circuito são obtidos com maior rapidez e precisão nos cálculos.

Vale ressaltar, também, que pelos resultados obtidos nos casos acima, torna-se perceptível a influência do circuito duplo nos valores das correntes de curto-circuito. Com a operação normal do sistema, as amplitudes das correntes de curto-circuito atingem valores superiores aos registrados para as correntes de curto-circuito com o circuito LT34-2 fora de serviço, evidenciando o fato de que a impedância equivalente total proporcionada pelos circuitos LT34-1 e LT34-2 em paralelo possui um valor menor do que a impedância total do circuito da linha de transmissão LT34-1.

## 8.2 – CASO 2: Sistema A com Carregamento Pré-Falta

Os dados gerais dos circuitos e dos elementos do sistema genérico A considerado com carregamento pré-falta encontram-se nas tabelas abaixo. Todos os dados estão expressos na base 100 MVA de potência aparente, ou seja,  $S_{BASE} = 100$  MVA.

*Tabela 6 – Dados gerais das barras do sistema A com carregamento pré-falta.*

DADOS DE BARRAS					
NÚMERO	NOME	TIPO	TENSÃO BASE (kV)	TENSÃO PRÉ-DEFEITO (pu)	POT. INJETADA (MVA)
1	B.HUM	Normal	230.00	0.953 $\angle$ -6.2°	–
2	B.DOIS	Normal	230.00	0.954 $\angle$ -6.1°	–
3	B.TRES	Normal	230.00	0.948 $\angle$ -6.8°	–
4	B.QUATRO	Normal	230.00	0.950 $\angle$ -6.6°	–
5	B.CINCO	Normal	230.00	0.935 $\angle$ -8.3°	-120 - j60
6	B.SEIS	Normal	230.00	0.948 $\angle$ -7.1°	–
7	B.SETE	Normal	230.00	0.946 $\angle$ -7.5°	-60 - j30
8	B.OITO	Normal	230.00	0.949 $\angle$ -7.8°	-45 - j40
9	B.NOVE	Mid-point	230.00	0.963 $\angle$ -4.7°	–
10	B.DEZ	Normal	6.60	0.974 $\angle$ -3.2°	–
11	B.ONZE	Mid-point	230.00	0.964 $\angle$ -4.6°	–
12	B.DOZE	Normal	6.60	0.974 $\angle$ -3.2°	–

Tabela 7 – Dados gerais dos circuitos do sistema A com carregamento pré-falta.

DADOS DE CIRCUITOS				
CIRCUITOS	IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS			
	R <sub>1</sub> (%)	X <sub>1</sub> (%)	R <sub>0</sub> (%)	X <sub>0</sub> (%)
LT13	0.12	2.80	0.22	4.80
LT17	0.12	2.80	0.22	4.80
LT24	0.10	1.92	0.20	3.92
LT26	0.10	1.92	0.20	3.92
LT34 – 1	0.08	1.75	0.17	3.46
LT34 – 2	0.08	1.75	0.17	3.46
LT35	0.15	3.47	0.53	10.63
LT56	0.16	3.68	0.49	10.23
LT68	0.15	3.47	0.53	10.63
LT78	0.16	3.68	0.49	10.23

Tabela 8 – Dados gerais dos elementos do sistema A com carregamento pré-falta.

DADOS DE ELEMENTOS				
ELEMENTOS	R <sub>1</sub> (%)	X <sub>1</sub> (%)	R <sub>0</sub> (%)	X <sub>0</sub> (%)
GER1	0.00	5.27	INFINITO	INFINITO
GER2	0.00	4.47	INFINITO	INFINITO
TRF1	0.00	4.58	0.00	4.58
TRF2	0.00	3.78	0.00	3.78
CAPSH8	0.00	-166.67	0	-166.67

Tabela 9 – Dados gerais das impedâncias mútuas do sistema A com carregamento pré-falta.

DADOS DE IMPEDÂNCIAS MÚTUAS			
CIRCUITO 1	CIRCUITO 2	R <sub>M</sub> (%)	X <sub>M</sub> (%)
LT34 – 1	LT34 – 2	0.52	2.19
LT35	LT56	0.32	1.12
LT56	LT68	-0.58	-2.88

**8.2.1 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 operando.**

Corrente de curto-circuito		BARRA 3				BARRA 4				Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição		Tensão		Corrente de contribuição		Tensão		Porcentagem (%)
(A)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	
4081	16.258			0.0	0.000	910	3.625	8.4	0.064	0
4049	16.129	3035	12.092	1.4	0.011	1015	4.044	8.9	0.067	5
4020	16.015	2902	11.562	2.7	0.020	1119	4.459	9.3	0.070	10
3995	15.916	2774	11.049	3.9	0.029	1223	4.873	9.6	0.073	15
3974	15.831	2648	10.551	4.9	0.037	1327	5.286	9.8	0.074	20
3956	15.759	2527	10.066	5.9	0.044	1430	5.699	9.9	0.075	25
3941	15.701	2408	9.593	6.7	0.050	1534	6.113	10.0	0.075	30
3930	15.655	2292	9.131	7.4	0.056	1639	6.529	9.9	0.074	35
3922	15.623	2179	8.679	8.1	0.061	1744	6.948	9.7	0.073	40
3917	15.602	2067	8.236	8.6	0.065	1850	7.371	9.4	0.071	45
3915	15.595	1958	7.800	9.1	0.068	1958	7.800	9.1	0.068	50
3916	15.599	1850	7.370	9.4	0.071	2067	8.234	8.6	0.065	55
3920	15.617	1744	6.946	9.7	0.073	2178	8.676	8.1	0.061	60
3928	15.646	1638	6.526	9.9	0.074	2291	9.125	7.4	0.056	65
3938	15.689	1534	6.110	9.9	0.075	2406	9.584	6.7	0.050	70
3952	15.744	1430	5.696	9.9	0.075	2524	10.054	5.8	0.044	75
3969	15.813	1326	5.283	9.8	0.074	2645	10.535	4.9	0.037	80
3990	15.895	1223	4.871	9.6	0.073	2769	11.029	3.8	0.029	85
4014	15.990	1119	4.458	9.3	0.070	2896	11.538	2.7	0.020	90
4042	16.100	1015	4.044	8.9	0.067	3028	12.062	1.4	0.011	95
4073	16.226	911	3.627	8.4	0.064			0.0	0.000	100

**8.2.2 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT34-1 com o circuito LT34-2 operando.**

Corrente de curto-circuito (fase A)		BARRA 3					BARRA 4					Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			
(A)	pu	(A)	pu	A	B	C	(A)	pu	A	B	C	Porcentagem (%)
4385	17.467			0.000	0.909	0.920	951	3.787	0.112	0.898	0.899	0
4344	17.307	3281	13.070	0.014	0.909	0.920	1065	4.245	0.114	0.899	0.901	5
4309	17.166	3132	12.475	0.027	0.908	0.919	1179	4.698	0.115	0.900	0.902	10
4278	17.044	2988	11.902	0.039	0.908	0.918	1292	5.149	0.115	0.901	0.904	15
4252	16.939	2848	11.347	0.050	0.907	0.917	1405	5.598	0.115	0.902	0.905	20
4230	16.850	2713	10.808	0.060	0.907	0.916	1518	6.048	0.114	0.902	0.906	25
4212	16.778	2582	10.285	0.069	0.906	0.915	1631	6.498	0.112	0.903	0.908	30
4198	16.722	2454	9.776	0.077	0.906	0.914	1745	6.952	0.109	0.904	0.909	35
4187	16.681	2329	9.278	0.085	0.905	0.913	1860	7.408	0.106	0.905	0.910	40
4181	16.656	2207	8.791	0.091	0.905	0.912	1976	7.870	0.101	0.905	0.912	45
4179	16.646	2087	8.313	0.097	0.904	0.911	2093	8.338	0.096	0.906	0.913	50
4180	16.651	1969	7.843	0.102	0.903	0.910	2212	8.813	0.091	0.907	0.914	55
4185	16.672	1852	7.379	0.106	0.902	0.908	2334	9.297	0.084	0.907	0.915	60
4194	16.707	1737	6.921	0.110	0.902	0.907	2458	9.791	0.077	0.908	0.916	65
4207	16.758	1623	6.466	0.112	0.901	0.906	2585	10.296	0.069	0.908	0.917	70
4223	16.825	1510	6.015	0.114	0.900	0.905	2715	10.815	0.060	0.909	0.918	75
4244	16.908	1397	5.565	0.116	0.899	0.904	2848	11.347	0.050	0.909	0.919	80
4269	17.007	1284	5.115	0.116	0.898	0.902	2986	11.896	0.039	0.910	0.920	85
4298	17.124	1171	4.665	0.116	0.897	0.901	3129	12.463	0.027	0.910	0.921	90
4332	17.258	1057	4.213	0.115	0.896	0.900	3276	13.050	0.014	0.911	0.922	95
4371	17.411	943	3.757	0.113	0.895	0.898			0.000	0.911	0.923	100

**8.2.3 – Curto-Circuito Trifásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado.**

Corrente de curto-circuito		BARRA 3				BARRA 4				Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição		Tensão		Corrente de contribuição		Tensão		Porcentagem (%)
(A)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	(A)	pu	(kV)	pu	
3977	15.844			0.0	0.000	1602	6.381	14.8	0.112	0
3966	15.799	2334	9.298	1.1	0.008	1636	6.518	14.4	0.108	5
3956	15.758	2289	9.119	2.1	0.016	1671	6.655	13.9	0.105	10
3946	15.722	2245	8.945	3.1	0.024	1705	6.794	13.4	0.101	15
3939	15.690	2202	8.773	4.1	0.031	1740	6.933	12.9	0.097	20
3932	15.663	2160	8.605	5.0	0.038	1776	7.075	12.3	0.093	25
3926	15.640	2119	8.440	5.9	0.044	1812	7.217	11.8	0.089	30
3922	15.622	2078	8.277	6.7	0.051	1848	7.362	11.1	0.084	35
3918	15.609	2038	8.117	7.6	0.057	1885	7.508	10.5	0.079	40
3916	15.600	1998	7.960	8.3	0.063	1922	7.656	9.8	0.074	45
3915	15.595	1959	7.806	9.1	0.068	1959	7.805	9.1	0.068	50
3915	15.594	1921	7.653	9.8	0.074	1997	7.957	8.3	0.063	55
3916	15.598	1883	7.503	10.5	0.079	2036	8.111	7.5	0.057	60
3918	15.607	1846	7.355	11.1	0.084	2075	8.268	6.7	0.051	65
3921	15.619	1810	7.209	11.7	0.088	2115	8.427	5.9	0.044	70
3925	15.636	1773	7.064	12.3	0.093	2156	8.588	5.0	0.038	75
3931	15.658	1737	6.921	12.9	0.097	2197	8.753	4.1	0.031	80
3937	15.684	1702	6.780	13.4	0.101	2239	8.920	3.1	0.023	85
3945	15.715	1667	6.640	13.9	0.105	2282	9.090	2.1	0.016	90
3954	15.750	1632	6.502	14.4	0.108	2325	9.264	1.1	0.008	95
3964	15.790	1598	6.365	14.8	0.112			0.0	0.000	100

**8.2.4 – Curto-Circuito Monofásico no circuito LT 34-1 com o circuito LT34-2 desligado.**

Corrente de curto-circuito (fase A)		BARRA 3					BARRA 4					Posição relativa do curto-circuito na LT 34-1
		Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			Corrente de contribuição (fase A)		Tensão (pu)			
(A)	pu	(A)	pu	A	B	C	(A)	pu	A	B	C	Porcentagem (%)
4334	17.264			0.000	0.910	0.906	1779	7.089	0.134	0.899	0.913	0
4304	17.145	2500	9.958	0.013	0.909	0.907	1807	7.197	0.133	0.900	0.913	5
4278	17.041	2446	9.743	0.025	0.908	0.907	1835	7.308	0.131	0.901	0.914	10
4255	16.949	2394	9.536	0.037	0.908	0.908	1863	7.424	0.128	0.902	0.914	15
4235	16.870	2344	9.339	0.047	0.907	0.908	1893	7.543	0.125	0.903	0.914	20
4218	16.803	2297	9.150	0.057	0.906	0.909	1924	7.666	0.122	0.903	0.914	25
4204	16.748	2251	8.969	0.066	0.906	0.909	1956	7.793	0.118	0.904	0.914	30
4193	16.706	2208	8.795	0.075	0.905	0.909	1989	7.924	0.114	0.905	0.914	35
4186	16.674	2166	8.628	0.083	0.904	0.910	2023	8.061	0.109	0.906	0.913	40
4181	16.655	2126	8.468	0.090	0.904	0.910	2059	8.202	0.103	0.906	0.913	45
4179	16.646	2087	8.314	0.097	0.903	0.910	2096	8.348	0.097	0.907	0.913	50
4179	16.649	2050	8.166	0.103	0.902	0.910	2134	8.500	0.090	0.908	0.913	55
4183	16.664	2014	8.023	0.108	0.902	0.911	2173	8.658	0.083	0.908	0.913	60
4189	16.690	1980	7.886	0.113	0.901	0.911	2214	8.821	0.075	0.909	0.912	65
4199	16.727	1946	7.754	0.118	0.900	0.911	2257	8.992	0.066	0.910	0.912	70
4211	16.776	1915	7.627	0.121	0.899	0.911	2302	9.169	0.057	0.910	0.912	75
4226	16.837	1884	7.504	0.125	0.898	0.911	2348	9.353	0.047	0.911	0.911	80
4245	16.910	1854	7.386	0.128	0.897	0.911	2396	9.545	0.036	0.911	0.911	85
4266	16.995	1825	7.272	0.130	0.897	0.911	2446	9.745	0.025	0.912	0.910	90
4291	17.093	1798	7.162	0.131	0.896	0.911	2499	9.954	0.013	0.913	0.910	95
4319	17.205	1771	7.056	0.133	0.895	0.911			0.000	0.913	0.909	100

Os casos 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3 e 8.2.4 foram simulados com o intuito de apresentar a capacidade do programa em obter os valores das correntes de curto-circuito de um sistema, considerando o seu carregamento pré-defeito.

A interpretação dos resultados obtidos para os casos 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4 e 8.1.5 se repete, porém, vale salientar que com este tipo de simulação, podemos alcançar valores mais próximos do real, mesmo que a diferença para os valores encontrados em um sistema sem carregamento pré-defeito seja pequena. Este tipo de estudo aumenta a confiabilidade dos



valores obtidos para as intensidades das correntes de curto-circuito, já que os cálculos são efetuados considerando o sistema em operação plena e real de carga.

### 8.3 – CASO 3: Ajuste de Proteção e Coordenação de um Sistema Radial B

O diagrama unifilar do sistema radial B utilizado encontra-se na Figura 31 a seguir.

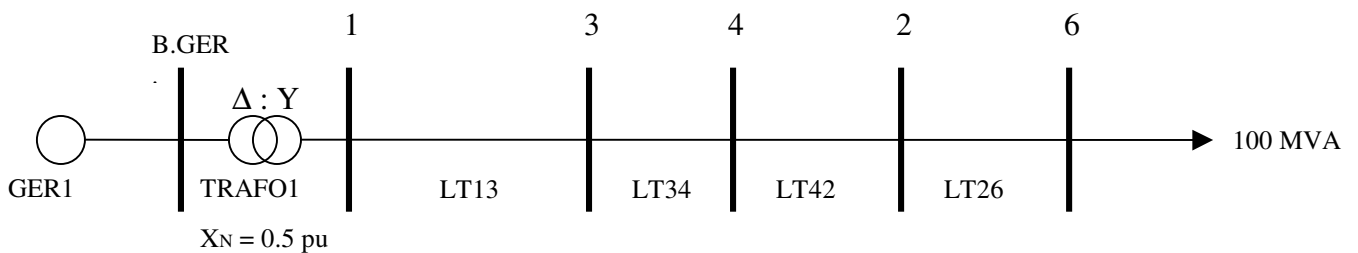


Figura 31 – Diagrama unifilar do sistema radial B.

Os dados gerais dos circuitos e dos elementos do sistema radial C considerado encontram-se nas tabelas abaixo. Todos os dados estão expressos na base 100 MVA de potência aparente, ou seja,  $S_{BASE} = 100$  MVA, enquanto a tensão de base é tal que  $V_{BASE} = 230$  kV.

Tabela 10 – Dados gerais dos circuitos do sistema B.

DADOS DE CIRCUITOS				
CIRCUITOS	IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS			
	R <sub>1</sub> (%)	X <sub>1</sub> (%)	R <sub>0</sub> (%)	X <sub>0</sub> (%)
LT13	0.12	1.50	0.22	3.00
LT34	0.12	2.80	0.22	4.80
LT42	0.10	1.92	0.20	3.92
LT26	0.10	1.92	0.20	3.92

Tabela 11 – Dados gerais dos elementos do sistema B.

<b>DADOS DE ELEMENTOS</b>				
<b>ELEMENTO</b>	<b>Xd'' (%)</b>	<b>Xd' (%)</b>	<b>Xd (%)</b>	<b>X<sub>0</sub> (%)</b>
GER1	0.09	0.15	1.00	0.5
<b>ELEMENTO</b>	<b>X<sub>1</sub> (%)</b>	<b>X<sub>0</sub> (%)</b>	<b>X<sub>n</sub> (%)</b>	<b>Defasamento</b>
TRAFO1	2.00	2.00	0.5	30°

Para a determinação dos ajustes de proteção e para uma posterior coordenação dos relés de sobrecorrente do sistema B, foram simulados, com o auxílio do programa ANA-FAS, curtos-circuitos trifásicos e monofásicos nas linhas do sistema radial B apresentado.

Os valores das correntes de curto-circuito convenientes para determinação do ajuste e coordenação dos relés de sobrecorrente são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 12 – Valores das correntes de curto-circuito em cada circuito do sistema B.

<b>CIRCUITOS</b>	<b>CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO</b>			<b>CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO</b>	
	<b>I<sub>MAX</sub></b>	<b>I<sub>85%LT</sub></b>	<b>I<sub>MIN</sub></b>	<b>I<sub>MAX</sub></b>	<b>I<sub>MIN</sub></b>
LT13	12011	7456	6988	9806	5502
LT34	6988	5873	5712	5502	4353
LT42	5712	4783	4650	4353	3452
LT26	4650	4015	3921	3452	2860

### 8.3.1 – Ajuste dos Relés de Sobrecorrente de Fase e de Neutro (Relés 50, 51 e 50N)

Para a determinação dos ajustes de proteção em cada circuito, faz-se necessário, antes de tudo, o cálculo dos valores de base e da corrente nominal do sistema.

Feito isto, são apresentados, em seguida, os cálculos realizados na determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente de fase e de neutro em cada linha do sistema radial B estudado.

Cabe salientar que, para este estudo, os relés de fase são do tipo IAC51A101A enquanto o de neutro é do tipo IAC51A3A, todos da GE (*General Electric*). Além disso, o TC é do tipo de alta reatância com erro de 10%.

As curvas temporizadas dos relés podem ser consultadas no ANEXO A.

#### Valores de base e corrente nominal:

$$V_{BASE} = 230 \text{ kV}$$

$$S_{BASE} = 100 \text{ MVA}$$

$$I_{BASE} = \frac{S_{BASE}}{\sqrt{3} \cdot V_{BASE}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 251 \text{ A}$$

$$Z_{BASE} = \frac{(V_{BASE})^2}{S_{BASE}} = \frac{(230)^2}{100} = 529 \Omega$$

$$I_N = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 10^3} = 251 \text{ A} = 1,0 \text{ p.u.}$$

## Ajuste dos Relés de Sobrecorrente:

- **LT13:**

a) Dimensionamento do TC pela norma ASA

- Critério de carga:

$$I_N = 251 \text{ A}$$

$$RTC = \frac{300}{5}$$

- Critério de curto-circuito:

$$FS = \frac{I_{CCMAX}}{I_N} = 20$$

$$\Rightarrow I_N = \frac{12011}{20} = 600,55 \text{ A}$$

$$RTC = \frac{800}{5}$$

$$\Rightarrow RTC_1 = \frac{800}{5}$$

b) Corrente de ajuste do relé de fase temporizado (relé 51)

$$1,5 \cdot \frac{251}{\frac{800}{5}} \leq I_{51} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{6988}{\frac{800}{5} \cdot 1,5} \Rightarrow 2,35 \leq I_{51} \leq 25,22$$

$$\Rightarrow I_{51} = TAP_{51} = 5 \text{ A}$$

c) Corrente de ajuste do relé de fase instantâneo (relé 50), como múltiplo do TAP do relé 51

$$I_{50} = \frac{7456}{\frac{800}{5}} = 46,6 \text{ A}$$

$$M_{50} = \frac{46,6}{TAP_{51}} = 15,53$$

- d) Corrente de ajuste do relé de neutro (relé 50N), de modo a suportar um desequilíbrio de 30%

$$I_{50N} = 0,3 \cdot \frac{251}{\frac{800}{5}} \Rightarrow I_{50N} = 0,471 \text{ A}$$

$$\Rightarrow I_{50N} = \text{TAP}_{50N} = 0,8 \text{ A}$$

- e) Determinação da Classe de Exatidão do TC pela norma ASA

- i) Carregamento no secundário do TC pela soma das impedâncias dos relés de fase e de neutro

$$Z_{\text{TOTAL}} = \sum Z_{\text{Relés de Fase}} + \sum Z_{\text{Relé de Neutro}}$$

$$Z_{\text{Relés de Fase}} = 0,35 \cdot \frac{4^2}{5^2} \Rightarrow Z_{\text{Relés de Fase}} = 0,23 \Omega$$

$$Z_{\text{Relé de Neutro}} = 22,0 \cdot \frac{0,5^2}{0,8^2} \Rightarrow Z_{\text{Relé de Neutro}} = 8,59 \Omega$$

$$\Rightarrow Z_{\text{TOTAL}} = 0,23 + 8,59 = 8,82 \Omega$$

- ii) Tensão máxima no secundário do TC para o curto-circuito na barra 1

$$V_{\text{MAX}} = \frac{I_{\text{CC}3\phi 1}}{\text{RTC}_1} \cdot Z_{\text{TOTAL}} = \frac{12011}{\frac{800}{5}} \cdot 8,82 \Rightarrow V_{\text{MAX}} = 662,11 \text{ V}$$

- iii) Classe de exatidão do TC

TC - Classe de Exatidão : 10H800

Considerando os valores das correntes de curto-circuito fornecidos pelo programa ANAFAS apresentados na Tabela 12 e seguindo a mesma forma de cálculo desenvolvida acima, são apresentados na Tabela 13 os demais valores de ajustes dos relés de sobrecorrente do sistema B.

*Tabela 13 – Valores das correntes de curto-circuito em cada circuito do sistema B.*

<b>CIRCUITO</b>	<b>RTC</b>	<b>TAP<sub>51</sub></b>	<b>M<sub>50</sub></b>	<b>TAP<sub>50N</sub></b>	<b>Classe de Exatidão do TC</b>
LT13	800/5	5,0 A	15,53	0,8 A	10H800
LT34	400/5	5,0 A	14,68	1,0 A	10H800
LT42	300/5	7,0 A	11,39	1,3 A	10H400
LT26	300/5	7,0 A	9,56	1,3 A	10H400

### **8.3.2 – Coordenação dos Relés de Sobrecorrente**

Esta filosofia de proteção utilizando relés de sobrecorrente de tempo inverso com elemento instantâneo é a melhor possível com este tipo de relé. Como cada linha do sistema de transmissão tem um disjuntor em apenas um dos terminais de linha, a notação foi simplificada, designando os relés pelas barras como mostrado no diagrama unifilar do sistema B abaixo.

O disjuntor de cada barra abrirá as três fases quando comandado por qualquer um dos três relés associados. Os três relés da barra 1, por exemplo, são igualmente representados como RELÉ1.

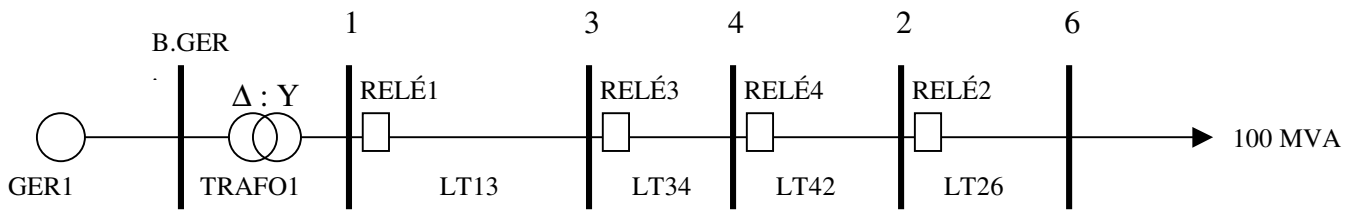


Figura 32 – Diagrama unifilar do sistema radial B utilizado com a localização dos relés de sobrecorrente.

Cabe ressaltar que os cálculos feitos anteriormente devem ser considerados, já que, a primeira providência em uma coordenação consiste no ajuste das unidades instantâneas de todos os relés.

#### **Coordenação dos Relés de Sobrecorrente:**

Calculados os ajustes dos relés de sobrecorrente instantâneos, deve-se escolher a menor curva de tempo para o relé mais afastado. Posteriormente, a coordenação deve ser desenvolvida da forma seqüencial mostrada abaixo.

Conforme antes destacado, as curvas de tempo x corrente dos relés IAC51 da GE (*General Electric*) estão no ANEXO A.

Cabe destacar, também, que foi considerado um tempo de coordenação de 0,3 segundos entre os relés.

- **RELÉ 2:**

Como para o relé mais afastado deve-se escolher a menor curva de tempo, foi determinada a curva  $\frac{1}{2}$  para o RELÉ2.

- **RELÉ 4:**

- a) Cálculo dos múltiplos do RELÉ2 e do RELÉ4 para a corrente de curto-circuito trifásico a 85% da LT26

$$M_2 = \frac{I_{85\%LT26}}{RTC_2 \cdot TAP_2} = \frac{4015}{\frac{300}{5} \cdot 7} \Rightarrow M_2 = 9,56$$

$$M_4 = \frac{I_{85\%LT26}}{RTC_4 \cdot TAP_4} = \frac{4015}{\frac{300}{5} \cdot 7} \Rightarrow M_4 = 9,56$$

- b) Tempo de atuação do RELÉ2 para um curto-circuito trifásico a 85% da LT26

$$M_2 = 9,56$$

$$\Rightarrow t_2 \cong 0,1 \text{ segundos}$$

curva 1/2

- c) Tempo de atuação desejado para o RELÉ4, considerando um curto-circuito trifásico a 85% da LT26, de modo a coordenar com o RELÉ2

$$t_{4D} = t_2 + \Delta t$$

$$\Rightarrow t_{4D} = 0,4 \text{ segundos}$$

$$\Delta t = 0,3 \text{ segundos}$$

- d) Com o tempo e o múltiplo do RELÉ4, para um curto-circuito trifásico a 85% da LT26, determinar a curva do RELÉ4

$$M_4 = 9,56$$

$$\Rightarrow \text{curva 3} \Rightarrow t_4 \cong 0,5 \text{ segundos}$$

$$t_{4D} = 0,4 \text{ segundos}$$



e) Verificação da curva escolhida

i) Cálculo do múltiplo do RELÉ4 para a corrente de curto-circuito trifásico na barra 2

$$M_4 = \frac{I_{CC3\phi b2}}{RTC_4 \cdot TAP_4} = \frac{4650}{\frac{300}{5} \cdot 7} \Rightarrow M_4 = 11,07$$

ii) Determinação do tempo de atuação do RELÉ4 para a corrente de curto-circuito trifásico na barra 2, considerando a curva previamente escolhida

$$M_4 = 11,07$$

$$\Rightarrow t_{4b2} \cong 0,4 \text{ segundos}$$

curva 3

iii) Verificação da coordenação

$$\Delta t = 0,3 \text{ segundos}$$

$$t_{4b2} \geq \Delta t \Rightarrow \text{curva do RELÉ4 coordena com o RELÉ2}$$

Considerando os valores das correntes de curto-circuito fornecidos pelo programa ANAFAS apresentados na Tabela 12 e seguindo a mesma forma de cálculo desenvolvida acima, são apresentadas na Tabela 14 as demais curvas de tempo x corrente dos relés de sobrecorrente utilizados na coordenação do sistema B.

*Tabela 14 – Curvas de ajuste dos relés de sobrecorrente do sistema B.*

<b>RELÉ</b>	<b>CURVA TEMPO x CORRENTE</b>
2	curva 1/2
4	curva 3
3	curva 6
1	curva 7

Tomando como base o processo de ajuste e coordenação dos relés de sobrecorrente apresentado, constata-se que o programa ANAFAS é, hoje, um grande aliado neste tipo de estudo.

Em estudos desta natureza, os cálculos das correntes de curto-circuito demandam a maior parte do tempo gasto. Assim, com o auxílio do programa, tanto a parametrização quanto a coordenação da proteção de um sistema torna-se muito mais eficiente e confiável, pois este fornece com rapidez e considerável precisão os valores das correntes de curto-circuito necessários à definição dos parâmetros e coordenação dos relés utilizados.

## CAPÍTULO 9: CONCLUSÕES

De acordo com o trabalho desenvolvido, tornaram-se incontestáveis as facilidades que o programa ANAFAS proporciona em estudos de curto-circuito e proteção de sistemas de energia elétrica.

Como já destacado anteriormente, em estudos de parametrização e coordenação de relés de sobrecorrente, os cálculos das correntes de curto-circuito demandam a maior parte do tempo necessário. Isto ocorre devido, principalmente, a complexidade conceitual e ao grande número de operações matemáticas existentes na realização dos cálculos para a obtenção destas correntes.

Diante disto, pela simplicidade dos cálculos apresentados, tanto no ajuste quanto na coordenação dos relés de sobrecorrente, torna-se notória a praticidade alcançada com a utilização do programa. A memória de cálculos é reduzida de uma forma considerável em razão da capacidade que a ferramenta computacional ANAFAS tem de prover, com rapidez e com baixa probabilidade de erros, os valores das correntes de curto-circuito de um sistema elétrico.

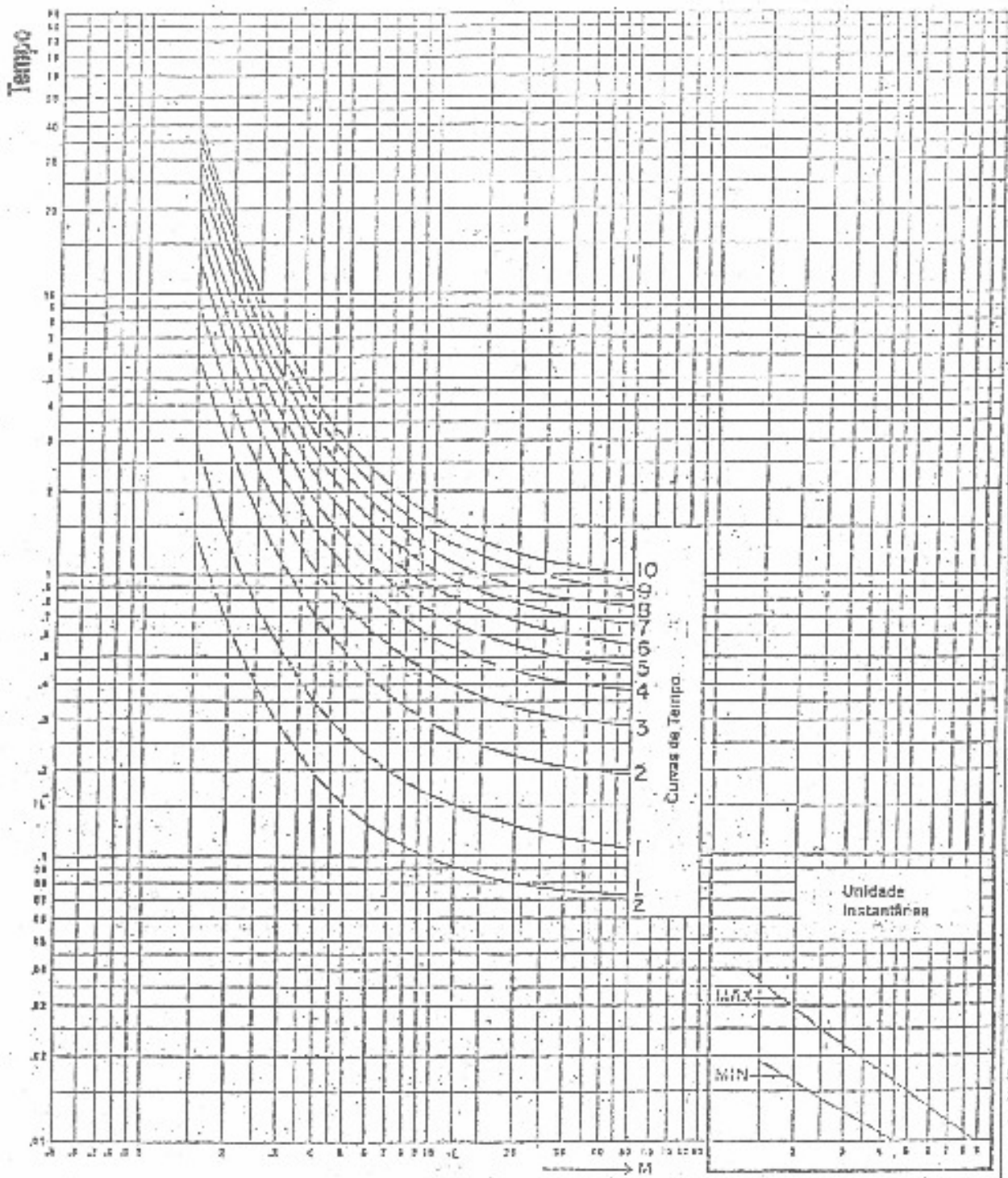
Além disso, o ANAFAS mostrou ser capaz de prover estes valores de correntes considerando o carregamento de carga anterior ao defeito estudado, diminuindo a probabilidade de erros e, conseqüentemente, refinando os ajustes de proteção a serem inseridos nos relés de sobrecorrente.

Com isto, pode-se concluir que a utilização do programa ANAFAS em trabalhos de curto-circuito e proteção de sistemas de potência tornou-se algo imprescindível para todos aqueles que buscam alta confiabilidade nos cálculos e eficiência no serviço. Cabe ressaltar, entretanto, que como qualquer ferramenta computacional, o programa ANAFAS pode e

deve ser continuamente desenvolvido para um aumento de suas atribuições funcionais e de sua precisão nos cálculos efetuados.

Desta forma, de acordo com o trabalho desenvolvido, o que pode ser sugerido é o desenvolvimento de ferramentas dentro do programa para que este seja capaz de executar a parametrização de relés de sobrecorrente. Ou seja, fica a sugestão do desenvolvimento do acoplamento entre os cálculos das correntes de curto-circuito e a parametrização dos relés de sobrecorrente em um só programa, para que assim haja um aumento das atribuições do programa ANAFAS, e este consiga cada vez mais competir de igual para igual com os programas estrangeiros existentes para esta área de conhecimento.

# **ANEXO A**



## BIBLIOGRAFIA

[1] KINDERMANN, Geraldo, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Volume I, 2ª Edição, Florianópolis, SC, 1999.

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

[3] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, *ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas*, Manual do Usuário, Versão 4.3, Abril 2006.

[4] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, *ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas*, Tutorial, Versão 4.3, Abril 2006.

[5] D'AJUZ, Ary, RESENDE, Fábio M., CARVALHO, Francisco M. S., NUNES, Irapoan G., AMON, Jorge F., DIAS, Luiz Eduardo N., PEREIRA, Marco P., KASTRUP, Oscar F., MORAIS, Sérgio A., *Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*, UFF, FURNAS, 1985.

[6] BROWN, Homer E., *Grandes Sistemas Elétricos – Métodos Matriciais*, Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A., 1977.

[7] ROBBA, Ernesto J., *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas*, Ed. Edgard Blucher Ltda., 1973.

[8] FERREIRA, Clarissa S., *Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito em Redes de Energia Elétrica utilizando Algoritmos Genéticos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Elétrica/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

[9] SATO, Fujio, *Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, 3ª Versão, Campinas, SP, 2005.

[10] CARVALHO, Adriano A., DECOURT, Pedro C. K., *Relés de Sobrecorrente – Funcionamento, Utilidade e Algumas Aplicações em Sistemas de Potência*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Subestações, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

[11] ALMEIDA, Clarivaldo, CAYRES, Sylvio, *Implementação de Rotinas em Programas de Curto-Circuito para Viabilizar Aplicações em Testes de Proteções de Linhas de Transmissão*.

[12] SILVA, Fabrício L., *Modelagem de Transformadores Trifásicos de Distribuição para Estudos de Fluxo de Potência*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Engenharia Elétrica, Juiz de Fora, MG, 2004.

[13] SATO, Fujio, *Análise de Curto-Circuito Trifásico em Sistemas Interligados*, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, Cálculo de Curto-Circuito em Sistemas de Energia Elétrica, Campinas, SP.

[14] CAMARGO, Robinson F., *Contribuição ao Estudo de Filtros Ativos de Potência*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Engenharia Elétrica, Santa Maria, RS, 2002.

[15] CARVALHO, Antônio J. B., CHARONE, W. J., NUNES, Marcus V. A., MACHADO, José M., JUNIOR, Ghendy C., SILVA, Jucileno S., GARCEZ, Jurandyr N., ALMEIDA, Sanmy C., *Análise do Comportamento das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) utilizando Comparação entre os Programas ATP e ANAFAS*, Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Universidade Federal do Pará/NESC, Belém, PA, 2005.

[16] ONS, *Estudos de Curto-Circuito Período 2006-2009*, Volume 1, Janeiro de 2007.