

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LUCIANA CARVALHO ACÁCIO**

**ESTUDOS SOBRE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE  
FALHAS UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS E  
COORDENADAS DE FASE**

Juiz de Fora, MG - Brasil

Novembro de 2014

**LUCIANA CARVALHO ACÁCIO**

**ESTUDOS SOBRE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE  
FALHAS UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS E  
COORDENADAS DE FASE**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para conclusão do curso de Engenharia Elétrica/Energia.

Orientador: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo.

Juiz de Fora, MG - Brasil

Novembro de 2014

Acácio, Luciana Carvalho.

ESTUDOS SOBRE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE FALHAS  
UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS E COORDENADAS DE FASE /  
Luciana Carvalho Acácio. -- 2014.

100 p. : il.

Orientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade  
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2014.

1. Metodologias para Análise de Falhas. 2. Componente  
Simétrica. 3. Coordenadas de Fase. 4. Modelos Matriciais de  
Rede. I. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, orient. II.  
Titulo.

**LUCIANA CARVALHO ACÁCIO**

**ESTUDOS SOBRE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE  
FALHAS UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS E  
COORDENADAS DE FASE**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para conclusão do curso de Engenharia Elétrica/Energia.

Orientador: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo.

Aprovada em de novembro de 2014

---

Prof<sup>a</sup>. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D. Sc.

---

Prof. Leandro Ramos de Araujo, D. Sc.

---

Prof. Abílio Manuel Variz, D. Sc.

## **AGRADECIMENTOS**

À orientadora Débora pela oportunidade, paciência e, sobretudo, por todo conhecimento e auxílio prestado durante a elaboração do trabalho e, também, ao professor Leandro pelos questionamentos levantados durante a elaboração do mesmo. Minha gratidão e amizade serão para sempre.

Aos meus pais, Alexandre e Maria do Carmo, pelo apoio incondicional e por estarem sempre ao meu lado. Amor maior não há.

Às minhas irmãs, Leticia e Larissa, pelo exemplo de determinação, e por sempre me incentivarem a lutar pelos meus objetivos.

Ao meu namorado, Thiago, pela paciência durante os momentos de apreensão e nervosismo.

Aos professores da Faculdade de Engenharia, que compartilharam seus saberes, o meu muito obrigada.

A todos os amigos, que acompanharam esta caminhada e entenderam as minhas ausências em algumas atividades, todo meu carinho.

A FAPEMIG pelo apoio financeiro durante o projeto.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original.” (Albert Einstein)*

## **RESUMO**

# **ESTUDOS SOBRE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE FALHAS UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS E COORDENADAS DE FASE**

Luciana Carvalho Acácio

Novembro, 2014

Orientador: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

As análises de falhas são de grande importância, para que se consiga alcançar um bom planejamento dos sistemas elétricos de potência e condições operativas eficazes.

Existem várias metodologias que podem ser empregadas nestes estudos, sendo que as principais se dividem em: abordagem baseada em componentes simétricas, ou abordagem baseada em coordenadas de fase. Como quaisquer metodologias apresentam vantagens e desvantagens portanto, é importante que o engenheiro conheça as características de cada metodologia, para optar pela a que se melhor adequa a cada caso específico.

Neste trabalho realiza-se um estudo detalhado de metodologias para análise de falhas em regime permanente utilizando componentes simétricas e coordenadas de fase. Procura-se comparar as metodologias, suas abordagens específicas, simplificações, limitações, vantagens e desvantagens, de forma a entender qual metodologia é mais adequada para se utilizar em cada caso e para cada sistema elétrico, considerando suas características diferenciadas.

A partir dos estudos e resumos efetuados montou-se um material didático sobre os temas e implementou-se uma parte da abordagem de representação matricial de equipamentos gerando rotinas de auxílio para modelagens.

# **ABSTRACT**

## **STUDIES ON METHODS FOR ANALYSIS OF FAILURES USING SYMMETRICAL COMPONENTS AND PHASE COORDINATES**

Luciana Carvalho Acácio

November, 2014

Supervisor: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

The fault analysis is very important to reach a good planning of electric power systems and effective operative conditions.

There are many methods that can be used in this field, and the mainly procedures are divided in two: analysis based on symmetrical components, or analysis based on phase coordinates. As many methods, there are advantages and disadvantages. Therefore, it is important that an engineer knows the characteristics of each method in order to choose the most appropriate to each specific case.

This paper performs a detailed study of methodology in faulty analysis on steady-state using symmetrical components and phase coordinates. It seeks to compare the methods, their specific approaches, simplifications, limitations, advantages, and disadvantages, with the purpose of understand which methodology best fits each case and each electrical system, considering their different characteristics.

From studies and abstracts made, it was built a didactic material about this area and it was implemented a portion of the approach of a matrix representation of devices, creating modeling assistance routines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Circuito RL série .....	24
Figura 2 Modelo Simplificado de Máquinas Síncronas - Sequência Positiva.....	29
Figura 3 Modelo Simplificado de Máquina Síncrona - Sequência Negativa .....	30
Figura 4 Modelo Simplificado de Máquina Síncrona - Sequência Zero (Delta ou Y sem aterramento).....	30
Figura 5 Modelo Simplificado de Máquina Síncrona - Sequência Zero (Y com aterramento)	30
Figura 6 Modelo Simplificado - Linhas e Cabos (Sequência Positiva e Negativa) .....	31
Figura 7 Modelo Simplificado - Linhas e Cabos (Sequência Zero) .....	31
Figura 8 Modelo Simplificado - Transformador (Sequência Positiva e Negativa) .....	31
Figura 9 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Y-Delta) .....	32
Figura 10 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Y Aterrado por Impedância - Delta) .....	33
Figura 11 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Y-Y) Aterrado por Impedância.....	33
Figura 12 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Delta-Delta) .....	33
Figura 13 Modelo Simplificado de Motor de Indução - Sequência Positiva.....	34
Figura 14 Modelo Simplificado de Motor de Indução - Sequência Negativa.....	34
Figura 15 Modelo Simplificado de Motor de Indução - Sequência Zero .....	35
Figura 16 Modelo Simplificado de Carga Estática.....	35
Figura 17 Gerador Síncrono Equilibrado (SAADAT, 2002) .....	37
Figura 18 Redes de Sequências (SAADAT, 2002) .....	40
Figura 19 Falta Fase-Terra (SAADAT,2002).....	40
Figura 20 Conexão das Redes de Sequência - Falta Fase-Terra (SAADAT,2002).....	41
Figura 21 Falta Fase-Fase (SAADAT,2002).....	43
Figura 22 Conexão das Redes de Sequência para uma - Falta Fase-Fase (SAADAT,2002) ...	44
Figura 23 Faltas Fase-Fase-Terra .....	44
Figura 24 Conexão das Redes de Sequência para uma Falta:Fase-Fase-Terra (ANDERSON, 1973).....	45
Figura 25 Falta Trifásica-Terra (ANDERSON,1973) .....	46
Figura 26 Conexão das Redes de Sequência para uma Falta: Fase-Fase-Fase-Terra (ANDERSON,1973).....	47
Figura 27 Algoritmo da Metodologia Proposta (CARVALHO FILHO, 2014) .....	50
Figura 28 Elemento Genérico.....	51
Figura 29 Modelo de Linhas.....	53
Figura 30 Modelo de uma Carga Genérico .....	57
Figura 31 Modelo de gerador ou subestação .....	59
Figura 32 Modelo Matricial de um Transformador Genérico .....	61
Figura 33 Modelo de Componente RLC com Conexão Estrela Aterrada .....	63
Figura 34 Representação Esquemática dos Modelos de Falhas .....	65
Figura 35 Representação de um Elemento Genérico por Impedância.....	66
Figura 36 Representação de um Elemento Genérico por Admitância.....	67
Figura 37 Elementos Genéricos com Mútua .....	68
Figura 38 Exemplo Típico - Matriz Impedância .....	69
Figura 39 Matriz Impedância do Elemento - Componente de Sequência .....	70

Figura 40 Circuito Exemplo .....	70
Figura 41 Grafo Orientado - Circuito Exemplo.....	72
Figura 42 Matriz Incidência - Caso exemplo .....	73
Figura 43 Matriz Circuito - Estudo de Caso.....	74
Figura 44 Circuito Exemplo - Montagem da Matriz Ybarra .....	79
Figura 45 Grafo Orientado - Circuito Exemplo.....	79
Figura 46 Matriz Incidência Reduzida - Circuito Exemplo .....	80
Figura 47 Matriz Zprim - Circuito Exemplo .....	80
Figura 48 Matrix Yprimitiva - Circuito Exemplo .....	80
Figura 49 Matriz Ybarra - Circuito Exemplo .....	81
Figura 50 Circuito - Exemplo 1 .....	83
Figura 51 Circuito sem Gerador - Exemplo 1 .....	83
Figura 52 Circuito sem Gerador - Curto entre a Fase "C" e a Referência.....	84
Figura 53 Curto-circuito entre as fases 'A' e 'B'.....	85
Figura 54 Circuito – Exemplo 2 .....	86
Figura 55 Grafo Orientado - Exemplo 2.....	86
Figura 56 Matriz Incidência - Exemplo 2.....	87
Figura 57 Disposição das Mútuas - Exemplo 2.....	88
Figura 58 Exemplo 2 – Desconsiderando o nó 'C'.....	89
Figura 59 Disposição das Mútuas - Exemplo 2 Modificado .....	90
Figura 60 Configurações das Mútuas .....	90
Figura 61 – Modelos de falhas .....	96
Figura 62 - Curto circuito trifásico - Barra 812 - Correntes da subestação.....	97
Figura 63 - Curto circuito trifásico - Barra 812 - Correntes no ponto de falha.....	97
Figura 64 - Sistema IEEE 13 barras .....	97
Figura 65 – Sistemas Teste NEV.....	98
Figura 66 - Poste 16.....	98
Figura 67 – Resultados do Sistema NEV – Casos.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Equipamentos e Respective Modelos .....	36
Tabela 2 - Correntes de curtos circuitos trifásicos – metodologia proposta.....	97
Tabela 3 - Correntes de curtos circuitos trifásicos – PSCAD.....	97
Tabela 4 - Módulo das correntes de curto circuito – IEEE 13 barras.....	98

## **LISTA DE SIGLAS**

SIN: Sistema Interligado Nacional;

PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia;

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

SEP: Sistema Elétrico de Potência

GD: Geração Distribuída

# SUMÁRIO

<b>LISTA E FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XII</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 Considerações Iniciais	16
1.2 Motivações	20
1.3 Revisão Bibliográfica	20
1.4 Objetivos do trabalho	21
1.5 Estruturas do trabalho	21
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>23</b>
<b>2. ESTUDOS DE FALHAS POR COMPONENTES SIMÉTRICAS</b>	<b>23</b>
2.1 Introdução	23
2.2 Curto-Circuito	23
2.3 Análise de Falhas através de Componentes Simétricas	25
2.4 Procedimentos para Cálculo da Corrente de Curto-Circuito	27
2.5 Equipamentos e Modelos para Componentes Simétricas	28
2.5.1 Geradores e Motores Síncronos	29
2.5.2 Linhas e Cabos	30
2.5.3 Transformadores	31
2.5.4 Motor de Indução	33
2.5.5 Carga Estática	35
2.5.6 Resumo dos Modelos	35
2.6 Redes de Sequência	37
2.6.1 Conexão de Redes de Sequências	40

2.6.1.1	Falta Fase-Terra	40
2.6.1.2	Falta Fase-Fase.	42
2.6.1.3	Falta Fase-Fase-Terra	44
2.6.1.4	Falta Trifásica-Terra	46
<b>CAPÍTULO 3</b>		<b>48</b>
<b>3. ESTUDOS DE FALHAS POR COORDENADAS DE FASE</b>		<b>48</b>
3.1	<b>Introdução</b>	<b>48</b>
3.2	<b>Resumo da Metodologia para Análise de Falhas em Sistemas Multifásicos</b>	<b>49</b>
3.3	<b>Modelagem de Equipamentos para Análise de Falhas</b>	<b>51</b>
3.3.1	Linhas de Transmissão e Alimentadores de Distribuição	52
3.3.2	Cargas	56
3.3.3	Geradores e Subestações	58
3.3.4	Transformadores	60
3.3.5	RLC	62
3.3.6	Sistemas de Aterramento	64
3.3.7	Modelagem dos Tipos de Falhas	64
<b>CAPÍTULO 4</b>		<b>66</b>
<b>4. MODELOS MATRICIAIS DE REDES</b>		<b>66</b>
4.1	<b>Modelagem Básica</b>	<b>66</b>
4.2	<b>Topologia das Redes</b>	<b>70</b>
4.3	<b>Grafo Orientado</b>	<b>71</b>
4.3.1	Matrizes de um Grafo Orientado	72
4.3.1.1	Matriz Incidência:	72
4.3.1.2	Matriz Circuito:	73
4.4	<b>Formulação das Equações das Redes</b>	<b>74</b>
4.4.1	Equações Nodais	75
4.4.2	Equações Circuitos	76
4.4.3	Algumas Considerações Importantes:	77
4.5	<b>Algoritmo para Montagem da <math>Y_{\text{BARRA}}</math></b>	<b>78</b>
4.5.1	Algoritmo para Montagem da $Y_{\text{barra}}$ em um Sistema Sem Mútuas:	81
4.6	<b>Cálculo da <math>Y_{\text{barra}}</math> em um Sistema Com Mútuas:</b>	<b>81</b>

<b>4.7</b>	<b>Observações Sobre a Matriz <math>Y_{\text{barra}}</math></b>	<b>81</b>
<b>4.8</b>	<b>Significado das Matrizes <math>Y_{\text{BARRA}}</math> e <math>Z_{\text{BARRA}}</math> no Curto-Circuito</b>	<b>82</b>
<b>4.9</b>	<b>Exemplos</b>	<b>82</b>
<b>4.10</b>	<b>Implementação</b>	<b>91</b>
	<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>92</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>92</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões Gerais</b>	<b>92</b>
<b>5.2</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>92</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>94</b>
<b>7.</b>	<b>APÊNDICE</b>	<b>95</b>
	<b>ARTIGO A SER APRESENTADO NO INDUSCON 2014</b>	<b>95</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

Um sistema elétrico de potência, normalmente pode ser subdividido em três áreas básicas: geração, transmissão e distribuição. Em termos de estudos elétricos, dependendo da área para a qual se deseja realizar o estudo, algumas simplificações podem ser feitas, sem perdas significativas dos resultados, porém, no sentido contrário, algumas simplificações adotadas em alguns estudos podem levar a resultados imprecisos e até mesmo incorretos.

Existem muitas características nos sistemas elétricos de potência, mas algumas delas recebem destaque, conforme as descritas a seguir.

Nos sistemas de transmissão, muitas vezes os desequilíbrios das redes são desconsiderados, já que na maioria das vezes as linhas são transpostas, e a divisão de cargas tende a ser mais equilibrada.

Já os sistemas de distribuição apresentam comumente, características que geram consideráveis desequilíbrios entre as fases: cargas distribuídas desequilibradas, assimetria nas linhas, circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos (PENIDO, 2008).

Várias configurações são utilizadas em sistema de distribuição, sendo a mais comum, a configuração trifásica a quatro condutores com múltiplo aterramento de neutro. Isso ocorre devido ao seu menor custo de instalação, além de proporcionar uma maior segurança para equipamentos e pessoas. Tal configuração apresenta, também, uma maior sensibilidade para proteção em comparação aos sistemas trifásicos a três condutores. (ARAUJO, 2005)

Ao passar dos anos, a necessidade de garantir a continuidade e qualidade no suprimento de energia ao mercado vem aumentando cada vez mais, já que a população está a cada dia mais ciente dos seus direitos. Para atender essa necessidade os sistemas elétricos operam cada dia mais interligados, formando redes complexas. Além do mais, o consumo de energia elétrica não para de crescer, fazendo necessário a diversificação da Matriz Energética Brasileira e consequentemente o aumento da capacidade instalada do SIN.

Assim sendo, o PROINFA com o intuito de promover tal diversificação da Matriz Energética Brasileira, incentiva o aumento da participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes alternativas, como eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN). Conforme pode-se observar nos balanços que são publicados pela EPE, nos Leilões de Fontes Alternativas (LFA), tem-se obtido um resultado crescente de potência agregada por estas fontes no SIN, desde o ano de 2010, quando ocorreu o primeiro leilão.

Especialmente com a inserção dessas fontes alternativas, como por exemplo, eólica e solar, tem ocorrido uma penetração mais forte da Geração Distribuída (GD) no SEP. Este termo em linhas gerais diz respeito a uma geração elétrica realizada próxima do consumidor, independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Muitas vezes, este gerador está conectado diretamente ao sistema de distribuição. Essa GD aumenta a complexidade de operação dos geradores com o eventual controle de cargas (ligamento/desligamento) para que estas se adaptem à oferta de energia.

Não menos importante para complexidade do SIN, está o paradigma dos *smarts-grids* (sistemas inteligentes), que em termos gerais intensifica a aplicação de tecnologia da informação para o SEP, integrada aos sistemas de comunicação e infraestrutura de rede automatizada. Especificamente, envolve a instalação de sensores nas linhas da rede de energia elétrica, o estabelecimento de um sistema de comunicação confiável em duas vias com ampla cobertura com diversos dispositivos e automação dos ativos, dentre outras características de modernização das redes.

Todos esses fatores levam a modificações estruturais do sistema elétrico. Assim sendo, se faz cada vez mais necessário, melhorias nos procedimentos de operação e planejamento do SIN, impulsionando, também, a busca de novas tecnologias que levem esse sistema a ter uma maior eficiência e confiabilidade. E conseqüentemente, para auxiliar nestas melhorias, estudos elétricos com melhores modelos também se tornam de suma importância.

Com relação a estudos elétricos, um de grande utilização e importância é a análise de falhas dos sistemas.

Segundo ELGERD (1978) o sistema de energia está sujeito a faltas maiores ou perturbações que resultam em flutuações dinâmicas de estados, que podem ser classificadas como de “larga escala”. Esses fenômenos dinâmicos do sistema são chamados, coletivamente, de “transitórios”, os quais podem ser classificados em três classes: Classe A: Transitórios ultrarrápidos – fenômenos de surto; Classe B: Transitórios meio-rápidos – fenômenos de curto-circuito; Classe C: Transitórios lentos – estabilidade transitória.

Para cada um destes fenômenos existem modelagens e metodologias mais apropriadas para estudá-los, considerando seus transitórios. Porém, para várias análises alguns destes estudos podem ser simplificados, obtendo-se a visão apenas de regime permanente destes fenômenos. Este é o caso dos curtos-circuitos, mais amplamente definidos como falhas, cuja análise de falhas em regime permanente é um estudo muito realizado e utilizado para vários procedimentos nos sistemas elétricos de potência.

De uma maneira simplificada, um curto-circuito pode ser caracterizado pela passagem de corrente elétrica acima do normal em um circuito devido à redução abrupta da impedância deste. Apesar do defeito ser indesejável, os curtos-circuitos ocorrem em pontos aleatórios da rede elétrica e se os mesmos não forem rapidamente eliminados, os danos nos equipamentos que integram a rede elétrica poderão ser elevados, o que poderá inviabilizar a continuidade e qualidade no suprimento de energia ao mercado. Devido as implicações de efeitos indesejados das falhas, suas análises tornam-se muito importantes.

Existem várias razões pelas quais é desejável ter dados tão acurados quanto possível sobre correntes e tensões de curto-circuito num sistema, por exemplo:

- A capacidade de interrupção de cada disjuntor em cada local de chaveamento deve ser baseada no caso mais severo de curto-circuito.

- O sistema de relés de proteção que deve “sentir” a falta e iniciar o chaveamento seletivo baseia seu funcionamento no valor e sentido das correntes de falta.

Apesar dos engenheiros projetarem o sistema elétrico sempre com o objetivo de terem um *layout* otimizado, com materiais de qualidade comprovada, prevendo a execução da obra e

instalação da melhor qualidade, o sistema provavelmente estará exposto às condições mais diversas e imprevisíveis, com as falhas aparecendo em pontos aleatórios do sistema.

As falhas podem ocorrer por vários motivos, entre eles: problemas de isolamento – onde as tensões nos condutores são elevadas, conseqüentemente, rupturas para a terra ou entre cabos poderão ocorrer (envelhecimento do próprio material); problemas mecânicos – oriundos da natureza que provocam ação mecânica no sistema (árvore); problemas elétricos – intrínsecos da natureza ou devido à operação do sistema (surtos de chaveamento, sobretensão no sistema, descargas atmosféricas diretas ou indiretas); problemas da natureza térmica – aquecimento nos cabos e equipamentos do sistema, que além de diminuir a vida útil, prejudica a isolamento (sobrecorrentes devido à sobrecarga do sistema); problemas de manutenção – substituição inadequada de peças e equipamentos, inspeção da rede não adequada; por fim, problemas de outra natureza – atos de vandalismo, queimadas, entre outros.

Entre os tipos de falhas existentes, estão: o curto-circuito trifásico (envolvendo as três fases simultaneamente); curto bifásico (envolvendo duas fases simultaneamente); curto monofásico (envolvendo uma fase e o terra); curto bifásico envolvendo terra (composto por duas fases e o terra). O curto mais comum de acontecer é o monofásico, já o que tem menor ocorrência, é o trifásico, porém quando este ocorre, seu valor de corrente de curto-circuito é o mais elevado dentre os quatro tipos.

Os curtos-circuitos ainda podem ser classificados como permanentes ou temporários. Os permanentes, como o próprio nome indica, são do tipo irreversíveis espontaneamente, necessitando de conserto na rede para restabelecer o sistema. Após a abertura do disjuntor, a equipe de manutenção deverá se deslocar até o local do defeito, e somente após o defeito ser consertado, o sistema será restabelecido. Já os curtos-circuitos temporários, são aqueles que ocorrem sem danos permanente na rede. Após a atuação da proteção o sistema pode ser restabelecido automaticamente (religamento automático satisfatório) sem problemas. Os curtos temporários são os que ocorrem com maior frequência.

Assim, verifica-se que há muitas situações diferentes de curto-circuito a serem analisadas nos sistemas elétricos de potência.

## 1.2 Motivações

Conforme já dito, para que se consiga alcançar condições operativas e um planejamento mais eficaz do SEP, é de grande importância o estudo de análise de falhas. A partir destes estudos pode-se conhecer o sistema e suas peculiaridades na presença de um tipo de falha, e isto permitirá ao engenheiro tomar decisões corretas em relação ao sistema de proteção, ou melhorar a operação do sistema. Assim, quanto mais precisos forem estes estudos - adequadamente a cada caso - melhor.

Existem várias metodologias para estudos de análises de falhas. Analisando-se as principais vê-se que elas são metodologias baseadas em componentes simétricas, ou então metodologias baseadas em coordenadas de fase. Cada uma das metodologias existentes apresenta suas respectivas vantagens e desvantagens. Sendo necessário um conhecimento prévio do engenheiro de suas características, para saber qual metodologia utilizar em cada caso específico.

Assim, a importância da análise de falhas e as diferentes possibilidades em termos de modelagens e de emprego de metodologias nestes estudos foram as principais motivações da realização deste trabalho.

## 1.3 Revisão Bibliográfica

Neste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica simplificada sobre metodologias de análise de falhas, a qual está apresentada por completo na dissertação (CARVALHO FILHO,2014) Para este trabalho não se consultou todos os trabalhos originais citados na dissertação, mas os mesmos foram conhecidos por seus resumos, e somente alguns (PENIDO, D.R.R,2008), (RIANI, L. M, 2008), (CARVALHO FILHO,2012), (CARVALHO FILHO,2014), foram revistos na íntegra.

Como a principal base de revisão bibliográfica foi a citada dissertação cabe aqui descrever seu conteúdo. Em CARVALHO FILHO (2014) apresenta-se uma metodologia de análise de falhas baseada no método de injeção de corrente a “n” condutores em coordenadas retangulares, onde utiliza-se o método de Newton-Raphson no processo de solução. A ferramenta é bastante abrangente sendo capaz de simular sistemas nas mais diversas configurações.

Somente os trabalhos revistos na íntegra estão citados como referências no final deste documento, mas indica-se para uma revisão geral sobre o tema, sobre as principais metodologias existentes, buscar a referência da dissertação de mestrado citada, pois várias outras referências podem ser lá encontradas.

## **1.4 Objetivos do trabalho**

O principal objetivo deste trabalho foi realizar um estudo detalhado de metodologias para análise de falhas em regime permanente utilizando componentes simétricas e também, coordenadas de fase. Nestes estudos objetiva-se comparar as metodologias, suas abordagens específicas, simplificações, limitações, vantagens e desvantagens, de forma a entender qual metodologia é mais adequada para se utilizar em cada caso e para cada sistema elétrico, considerando suas características diferenciadas.

Também teve-se como objetivo resumir e documentar conjuntamente as teorias de duas metodologias para estudos de falhas, uma por componentes simétricas (básica) e outra por coordenadas de fase (CARVALHO FILHO,2014), montando um material didático sobre os temas.

E por último teve-se o objetivo de resumir a aplicação de modelagem matricial de equipamentos por componentes de sequência e de fases, e implementar uma parte desta abordagem para gerar rotinas de auxílio para modelagens.

## **1.5 Estruturas do trabalho**

Além deste capítulo introdutório, outros quatro capítulos compõem o trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da metodologia básica para análise de falhas por componentes simétricas e algumas análises qualitativas da mesma.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão de uma metodologia para análise de falhas por coordenadas de fase e também, suas respectivas análises qualitativas.

No capítulo 4 é apresentada uma revisão da modelagem de equipamentos por formulações matriciais, considerando representações por componentes simétricas e por coordenadas de fase, cuja parte foi implementada em rotinas.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões gerais do trabalho e as considerações finais.

E por fim, é colocado um apêndice com a reprodução de um artigo a ser apresentado no INDUSCON 2014, oriundo de atividades relacionadas também a este trabalho de conclusão de curso.

## Capítulo 2

### ESTUDOS DE FALHAS POR COMPONENTES SIMÉTRICAS

#### 2.1 Introdução

Nesse capítulo, primeiramente, serão discutidas brevemente características de um curto-circuito (que é a falha mais comumente analisada em sistemas elétricos). Em seguida, será apresentada a abordagem básica de modelagem da maioria das metodologias que utilizam componentes simétricas na solução das falhas, considerando a composição do sistema elétrico de potência, bem como as principais características de seus principais equipamentos, suas respectivas funções e modelos equivalentes. E por fim, será apresentada a metodologia propriamente dita.

A elaboração deste capítulo está baseada principalmente nas referências a seguir: (CABRAL,R.J, 2010), (SADAAT, H, 2002), (CARVALHO FILHO,2012), (ANDERSON, 1973) e (PINTO, D P, 2014).

#### 2.2 Curto-Circuito

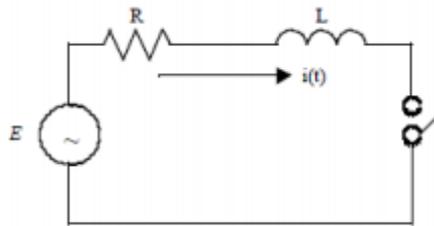
Como já dito, o curto-circuito é um dos principais tipos de falha que ocorre no sistema elétrico, e pode ser causado por falhas de isolamento de um circuito, por arcos elétricos, por fenômenos naturais ou pela própria ação humana, na maioria das vezes causando a circulação de altas correntes que podem afetar equipamentos, além de poder causar incêndios.

A corrente máxima de curto-circuito, está relacionada com o tamanho e a capacidade das fontes de energia que alimentam o sistema, além das características das redes elétricas em si. Os principais fatores determinantes da magnitude dessas correntes é o tipo de falta, presença de fontes de corrente de falha, a impedância entre as fontes e o ponto de curto-circuito. As máquinas síncronas e de indução, são as principais fontes dessa corrente. Tal corrente pode ser analisada em termos de suas duas componentes:

1. Corrente simétrica;
2. Corrente contínua.

Com isso, a corrente de curto circuito total é, na maioria das vezes, assimétrica, devido ao somatório dessas duas parcelas.

Segundo a norma IEEE Std 551 (2006), a maioria dos circuitos podem ser representados como uma impedância indutiva equivalente em série com uma fonte de tensão como apresentado na Figura 1. Assim sendo, ao aplicar um curto-circuito nos terminais da carga, neste caso, ao fechar a chave, irá circular uma corrente instantaneamente.



**Figura 1 Circuito RL série**

Ao fazer a análise de circuito, para a figura anterior, temos as equações: (2.1), (2.2) e (2.3).

$$V_R = R \cdot I \quad (2.1)$$

$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

$$E = R \cdot I + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Em princípio, imediatamente após o fechamento da chave ( $t_0$ ), a corrente em  $t_0$  é igual a zero e nos próximos milissegundos terá uma variação abrupta e de forma instantânea. Porém, devido a dependência da tensão na reatância indutiva em relação à derivada da corrente, essa grande variação não pode ocorrer. Então, para que isso não ocorra, é necessário que a corrente total de curto-circuito inicial seja igual a zero. Para isso, no momento em que se aplica o curto, há o aparecimento de uma corrente contínua de mesma magnitude, porém de sinal contrário à corrente no estado estacionário. Assim sendo, a corrente total será a soma das componentes do estado estacionário com a corrente contínua.

Essa corrente total é assimétrica, sendo máxima durante o primeiro ciclo do curto-circuito e decaindo para um valor estacionário. A componente contínua também decai em função da resistência e reatância do circuito, tendendo a zero em poucos ciclos.

Em sistemas de distribuição ou industriais, a corrente total de curto-circuito é geralmente fornecida a partir de um número de fontes, agrupados normalmente em três categorias:

1. Sistemas de geração que alimentam a distribuição como se fosse um gerador a grande distância.
2. Geradores locais ou próximos ao sistema.
3. Motores síncronos e de indução.

Em redes com maior proporção de motores de indução o decaimento da corrente de falha oriunda deles ocorrerá mais rapidamente, devido a mesma desaparecer de seus terminais após poucos ciclos. Em contrapartida, redes com máquinas síncronas, terão uma corrente mantida, devido à energização do seu campo.

Para diversos estudos, não é necessário analisar o transitório, assim, apenas a corrente de estado estacionário é calculada. A partir deste ponto neste trabalho, iremos tratar apenas dessa parcela da corrente de curto-circuito, ou seja, analisaremos apenas o regime permanente.

### **2.3 Análise de Falhas através de Componentes Simétricas**

A utilização de componentes simétricas (compostas pelas sequências positiva, negativa e zero e em algumas transformações podem aparecer outras sequências “intersequência”) em metodologias para análise de falhas é bastante comum, sendo considerado um artifício matemático que garante uma maior simplicidade de cálculos. No entanto, sabe-se também que em termos de aplicação de metodologia pode acarretar em perda na exatidão quando são desconsiderados os componentes “intersequenciais”, o que é feito em vários métodos.

Esta metodologia apresenta algumas vantagens, dentre elas: transformação de um sistema desequilibrado em três equilibrados; modelos dos equipamentos são simplificados; análise simplificada. Em contrapartida, essas simplificações, podem levar a resultados imprecisos ou até mesmo errôneos dependendo do estudo realizado. Se forem considerados modelos dos equipamentos mais completos e se for representado o desequilíbrio da rede, pode-se gerar acoplamento entre as redes de sequência (intersequências), eliminando a principal

vantagem do método. Além disso, as simplificações podem afastar o sistema do real, devido à transformação que é feita para componentes simétricas.

Existem vários tipos de falhas, algumas são simétricas (ou equilibradas) e outras são assimétricas (ou desequilibradas). Para analisar as falhas assimétricas, sejam elas linha-terra, linha-linha ou dupla linha-terra, não é possível utilizar apenas o equivalente monofásico ou a sequência positiva, diferentemente de falhas trifásicas (que são simétricas). Uma das soluções, no caso de uma metodologia com abordagem por componentes simétricas, é realizar uma combinação das sequências positiva, negativa e zero, de acordo com o tipo de curto, para fazer a análise desejada. Na maioria das vezes desconsidera-se os acoplamentos entre as sequências, se existentes, devido a características do sistema elétrico. Este é o tipo de abordagem mais comum nas metodologias de análise de falhas por componentes simétricas. Esta metodologia básica será descrita na sequência deste texto.

Na aplicação desta metodologia, algumas condições são definidas na maioria das vezes, as quais estão descritas a seguir, sendo que algumas são simplificações. Assim sendo, será discutida a aplicabilidade e os limites de utilização de cada uma delas.

1. A frequência da fonte de corrente alternada deve ser constante.

Na realidade geralmente isto não ocorre, mas para a maioria dos estudos da parcela estática da corrente de curto-circuito, essa consideração não é de grande importância.

2. Os coeficientes de impedâncias R, L, C devem ser constantes.

Existem tipos de falhas em que essa restrição será violada. No caso de uma falha com arco, onde este arco torna-se uma série de componentes de impedância do circuito, a resistência não é constante. Um tipo similar de não linearidade pode acontecer em elementos eletromagnéticos, uma vez que 'L' depende da densidade de fluxo magnético, conforme a equação (2.4). Se a densidade de fluxo sofrer variação, o valor de 'L' também se modificará.

$$L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad (2.4)$$

3. A tensão e o ângulo de fase são mantidos constantes.

Em máquinas, a tensão interna varia com a carga e com o tempo. Durante uma falha, a tensão interna da máquina se reduz de forma mais rápida do que a capacidade do campo desta máquina em aumentar esta tensão. Um artifício utilizado para simplificar a matemática é manter a tensão constante e variar a impedância da máquina.

4. A fonte de corrente de falha deve ser senoidal

Nos estudos estáticos de falha são utilizadas apenas a componente fundamental e no máximo mais a componente de corrente contínua para cálculo do valor de assimetria máxima. No caso de transmissão e na utilização de energia elétrica, a forma de onda em regime permanente pode ser considerada para a maioria dos estudos bastante próxima de uma senóide pura.

5. A tensão pré-falta no ponto de falha será considerada como 1 P.U.

Tal consideração é bastante crítica e deve ser aplicada de forma cuidadosa. Dependendo da norma ou do procedimento, podem ser definidas outras considerações.

## **2.4 Procedimentos para Cálculo da Corrente de Curto-Circuito**

Na metodologia básica, que utiliza componentes simétricas para análise de falhas, para calcular as correntes de curto-circuito é indicado seguir um algoritmo para auxiliar no processo e facilitar a obtenção dos resultados. A seguir será descrito tal algoritmo, que será detalhado nos próximos tópicos.

1. Desenhar o diagrama unifilar do sistema a ser analisado. Esse diagrama deve apresentar todos os elementos a serem incluídos na análise e identificar os nós que serão considerados na análise.
2. Escrever as condições de contorno relacionadas com as correntes conhecidas para cada tipo de curto-circuito (no caso de falta monofásica, por exemplo, a

corrente na fase da falta é considerada diferente de zero e nas outras fases iguais a zero). Tais condições de contorno serão melhor entendidas no item 2.6.

3. Transformar as correntes e tensões do item anterior para componentes simétricas.
4. Determinar a conexão das redes de sequência, a partir do exame das condições de contorno de correntes do item 3, e se necessário adicionar impedâncias para satisfazer a condição de contorno.
5. Desenvolver um circuito equivalente para as sequências positiva, negativa e zero. Será discutido mais à frente.
6. Calcular as componentes simétricas das correntes de curto-circuito nas barras
7. Transformar as correntes do item 6 para as coordenadas de fase.

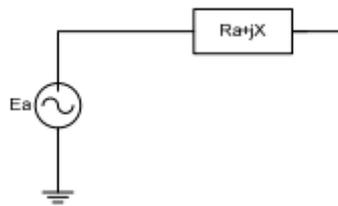
## **2.5 Equipamentos e Modelos para Componentes Simétricas**

Para o estudo de curto-circuito é necessário modelar os principais equipamentos que existem no sistema elétrico de potência. Cada um deles possui funções específicas dentro do sistema, para se obter o melhor resultado para operação, desde a geração até a carga. Dentre eles estão: máquinas síncronas, motores de indução, transformadores, cargas estáticas, linhas e cabos. Na maioria dos estudos de curto-circuito, todos esses equipamentos são modelados como um arranjo de resistência, reatância e fonte de tensão e/ou corrente, dependendo de cada tipo de equipamento. Na sequência, serão apresentados os modelos mais comumente adotados em metodologias que utilizam componentes simétricas na solução da falha.

### 2.5.1 Geradores e Motores Síncronos

De forma genérica, podemos dizer que o gerador fornece potência ativa para o sistema e o motor consome potência ativa da rede. Assim sendo, a única coisa que difere nos modelos é o sentido da corrente.

Para a sequência positiva o modelo é composto por uma fonte de tensão seguida de uma impedância em série, como mostra a Figura 2. A tensão  $E_a$  é representada apenas na sequência positiva, devido a consideração de que as tensões na máquina síncrona estão em equilíbrio.



**Figura 2 Modelo Simplificado de Máquinas Síncronas - Sequência Positiva**

Onde:

$E_a$ : fonte de tensão interna;

$R_a$ : resistência de armadura;

$X$ : reatância síncrona.

O modelo de sequência negativa para máquinas de polos lisos é similar ao da sequência positiva, porém com a fonte de tensão curto-circuitada, como mostra a Figura 3. Já para máquinas síncronas de polos salientes, o valor da impedância de sequência negativa é dado pela equação (2.5).

$$X = \frac{X''_d + X''_q}{2} \quad (2.5)$$

Onde:

$X''_d$  : representa a reatância subsíncrona de eixo direto;

$X''_q$  : representa a reatância subsíncrona de eixo de quadratura;



**Figura 3 Modelo Simplificado de Máquina Síncrona - Sequência Negativa**

Já o modelo de sequência zero depende do tipo de conexão que a máquina se encontra no sistema.

A conexão delta não permite a circulação de corrente de sequência zero no sistema. Assim sendo, o modelo é representado como um circuito aberto, de acordo com a Figura 4.



**Figura 4 Modelo Simplificado de Máquina Síncrona - Sequência Zero (Delta ou Y sem aterramento)**

Se a ligação da máquina for Y com aterramento  $Z_t$ , o que garante a circulação de corrente, o modelo simplificado fica similar a Figura 5. O aparecimento do multiplicador “3” junto a impedância de aterramento será explicado mais adiante na seção das redes de sequência. Caso o  $Z_t$ , seja igual a zero, basta substituir  $3Z_t$  por um curto-circuito, no mesmo modelo. E ainda, caso esteja em Y sem aterramento, basta substituir  $3Z_t$  por um circuito aberto, no mesmo modelo conforme Figura 5.



**Figura 5 Modelo Simplificado de Máquina Síncrona - Sequência Zero (Y com aterramento)**

## 2.5.2 Linhas e Cabos

Normalmente são representadas pelo modelo PI equivalente. A vantagem deste modelo em relação ao T consiste na eliminação de um nó, reduzindo a complexidade dos cálculos matemáticos. Para a análise por componentes simétrica é normalmente negligenciada a impedância shunt, uma vez que a corrente que passa por esse ramo é muito menor do que a que passa pelo ramo série. Considera-se também que as impedâncias mútuas são iguais. Para facilitar o entendimento, será definido que:

$Z_s$ : impedância em série.

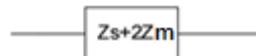
$Z_m$ : impedância mútua.

No caso da sequência positiva e negativa o modelo está representado na Figura 6:



**Figura 6 Modelo Simplificado - Linhas e Cabos (Sequência Positiva e Negativa)**

Para o caso da sequência zero, a impedância equivalente será,  $Z_s + 2Z_m$ , assim sendo, o modelo simplificado é o apresentado na Figura 7.



**Figura 7 Modelo Simplificado - Linhas e Cabos (Sequência Zero)**

### 2.5.3 Transformadores

Na maioria das modelagens desconsidera-se as impedâncias do ramo de magnetização, uma vez que a corrente que passa pelo mesmo é muito inferior à corrente que passa no ramo de dispersão. Para facilitar o entendimento será considerado:

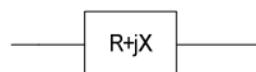
$R = R_1 + R_2 =$  somatório das resistências do primário e secundário refletido do transformador.

$X = X_1 + X_2 =$  somatório das reatâncias do primário e secundário refletido do transformador.

$Z_p =$  impedância de aterramento do primário do transformador.

$Z_s =$  impedância de aterramento do secundário do transformador.

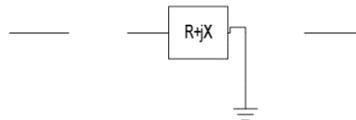
A modelagem de um transformador para sequências positivas e negativas se resume, basicamente em uma impedância série, como é mostrado na Figura 8.



**Figura 8 Modelo Simplificado - Transformador (Sequência Positiva e Negativa)**

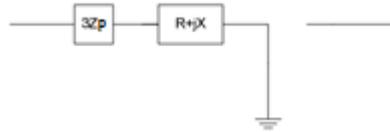
Já para sequência zero o modelo simplificado do transformador depende de como o primário e o secundário do mesmo estão conectados. Os modelos têm como base as premissas e a impedância série conforme apresentado anteriormente, representando o transformador propriamente dito, mas são ainda acrescentados elementos em relação às conexões dos lados do primário e do secundário do transformador. A seguir serão apresentados os modelos, para os casos de transformadores com dois enrolamentos. Para transformadores de três enrolamentos há uma modelagem semelhante que pode ser melhor vista em (KINDERMANN, G.,1992).

1. **Conexão Y - Delta:** Como o lado do primário possui conexão Y sem aterramento, o mesmo não permite passagem de corrente de sequência zero pelo transformador, devendo ser representado como um circuito aberto. O secundário por estar conectado em delta também não permite a passagem de corrente de sequência zero pelo transformador, mas permite uma corrente interna ao mesmo, com isso o secundário deve estar em circuito aberto em relação ao terminal de conexão do transformador, propriamente dito, mas em curto-circuito em relação ao terra, devido a corrente circulante no mesmo. Assim, o modelo simplificado do transformador desse tipo de conexão o que está representado na Figura 9.



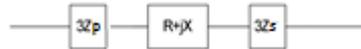
**Figura 9 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Y-Delta)**

2. **Conexão Y Aterrado por Impedância - Delta:** Como o primário está conectado em Y aterrado por impedância, a circulação de corrente de sequência zero é garantida no primário do transformador, e devemos considerar a impedância do lado primário igual a  $3Z_n$  (O porquê do fator multiplicativo “3” será explicado adiante na seção sobre conexões das redes de sequência). Já o secundário por não permitir a passagem de corrente de sequência zero pelo transformador (até o seu terminal secundário) deve ser representado como circuito aberto em relação ao terminal de conexão secundário do transformador, mas em curto-circuito em relação ao terra, devido a corrente interna circulante. O modelo simplificado está apresentado na Figura 10



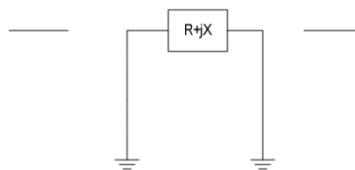
**Figura 10 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Y Aterrado por Impedância - Delta)**

3. **Conexão: Y Aterrado - Y Aterrado:** As conexões do lado do primário e do secundário são semelhantes, com exceção dos valores das impedâncias de aterramento que podem ser diferentes, e permitem passagem de corrente de sequência zero pelo transformador. Assim sendo, devem ser representados por um circuito com as impedância de aterramento, multiplicadas por três, em ambos os lados, conforme a .Figura 11. Mais uma vez, o valor “3” será explicado adiante.



**Figura 11 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Y-Y) Aterrado por Impedância**

4. **Conexão Delta - Delta:** Como ambos os lados estão em Delta, não permitem passagem de corrente de sequência zero entre os terminais de conexão do transformador, mas existe uma corrente circulante internamente no mesmo. Sendo assim devem ser representadas como circuito aberto as conexões com os terminais do transformador, mas representando curto-circuitos em relação ao terra, como está apresentado na Figura 12



**Figura 12 Modelo Simplificado - Transformadores - Sequência Zero (Delta-Delta)**

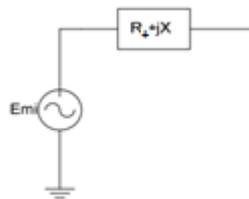
Quaisquer outras formas de conexão serão uma junção dessas apresentadas anteriormente, sendo necessário apenas inverter a ordem do primário com o secundário, se for o caso, e/ou considerar impedâncias de aterramento do primário e/ou secundário nulas.

#### 2.5.4 Motor de Indução

O modelo simplificado do motor de indução é muito parecido com o de um transformador, já que o motor de indução baseia-se na indução efetuada pelo circuito do estator

de tensão e correntes no circuito do rotor (ação do transformador), sendo assim, o mesmo é conhecido para efeitos de modelagem simplificada como transformador girante. A analogia entre os dois modelos pode ser feita, considerando o primário do transformador como o enrolamento estator da máquina e o secundário como o enrolamento rotor da mesma. Como foi feito no transformador será considerado apenas o ramo de dispersão do modelo, pelo mesmo motivo dito anteriormente.

Para a sequência positiva o modelo simplificado será representado por uma fonte interna seguido de uma resistência equivalente, conforme apresentado na Figura 13.



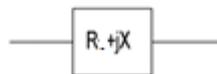
**Figura 13 Modelo Simplificado de Motor de Indução - Sequência Positiva**

Onde:

$R_+ = R_1 + \frac{R_2}{s}$  = somatório das resistências do primário com a resistência do secundário refletido do transformador (dividido pelo escorregamento).

$E_{m1}$ : tensão interna.

Já a sequência negativa, é representada apenas por uma impedância equivalente, de acordo com a Figura 14.



**Figura 14 Modelo Simplificado de Motor de Indução - Sequência Negativa**

Onde:

$R_- = R_1 + \left(\frac{R_2}{2-s}\right)$  : resistência do equivalente do estator, envolvendo o escorregamento.

$X = X''$  : reatância subsíncrona.

$E_{mi}$ : tensão interna.

Por fim, a sequência zero é representada por um circuito aberto. Uma vez que, normalmente, o motor de indução possui conexão delta, não permitindo assim, a passagem de corrente de sequência zero. A representação da sequência zero está na Figura 15

**Figura 15 Modelo Simplificado de Motor de Indução - Sequência Zero**

### 2.5.5 Carga Estática

Na maioria das metodologias baseadas em componentes simétricas, para estudo de análise de falhas não consideramos a carga estática em nenhuma das sequências (positiva, negativa, zero), uma vez que se considera que a mesma não contribui para corrente de curto-circuito. Assim sendo, em termos de modelo considera-se a carga estática, como um circuito aberto, conforme a Figura 16.

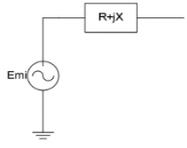
**Figura 16 Modelo Simplificado de Carga Estática**

### 2.5.6 Resumo dos Modelos

A seguir, na Tabela 1 será apresentada uma lista com os equipamentos, explicado nos tópicos anteriores, e seus respectivos modelos. O objetivo deste tópico é servir para consultas rápidas, a fim de lembrar sobre os modelos simplificados dos equipamentos.

**Tabela 1 Equipamentos e Respective Modelos**

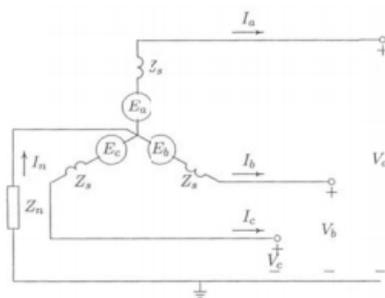
Equipamento	Seqüência Positiva	Seqüência Negativa	Seqüência Zero
Gerador e Motor síncrono		$X = \frac{X''_d + X''_q}{2}$	<p>Delta:</p> <p>Y – sem aterramento:</p> <p>Y – com aterramento:</p>
Linhas e Cabos			
Transformadores de 2 enrolamentos			<p>Y (sem aterramento) – Delta:</p> <p>Y (com aterramento) – Delta:</p> <p>Y – Y (ambos com aterramento):</p> <p>Delta – Delta:</p>

<p>Motor de Indução</p>			<p>_____</p>
<p>Carga Estática</p>	<p>_____</p>	<p>_____</p>	<p>_____</p>

### 2.6 Redes de Sequência

No item 2.4 de procedimento para cálculo de corrente de curto-circuito indica-se que para cada curto a metodologia por componentes simétricas necessita de uma determinada conexão entre redes de sequência para solucionar o problema. Nesta seção as redes de sequência serão descritas, exemplificando sua definição na modelagem de um gerador trifásico equilibrado alimentando uma carga trifásica equilibrada, considerando estas condições em componentes simétricas, e mais adiante serão explicadas as principais conexões das redes de sequência para cada caso de falta, considerando as condições de contorno de cada caso.

Considere um gerador síncrono trifásico com neutro aterrado através de uma impedância  $Z_n$ , conforme Figura 17. Considere também que o gerador alimenta uma carga trifásica equilibrada.



**Figura 17 Gerador Síncrono Equilibrado (SAADAT, 2002)**

Este gerador síncrono gera três forças eletromotrizes (FEMS) internas balanceadas, que são representadas por um vetor de fasores de sequência positiva, como mostra a equação (2.6).

$$E^{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot E^a \quad (2.6)$$

Onde:

$$a^2 = 1 \angle -120^\circ$$

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

Como dito anteriormente, essa máquina abastece uma carga trifásica equilibrada. Ao aplicar a lei de Kirchoff das tensões nos circuitos das cargas equilibradas, obtém-se a equação (2.7)

$$V_a = E_a - Z_s \cdot I_a - Z_n \cdot I_n$$

$$V_b = E_b - Z_n \cdot I_b - Z_n \cdot I_n \quad (2.7)$$

$$V_c = E_c - Z_s \cdot I_c - Z_n \cdot I_n$$

Substituindo  $I_n = I_a + I_b + I_c$  em (2.7) e escrevendo na forma matricial, tem-se (2.8).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Na forma matricial compacta tem-se (2.9).

$$V^{abc} = E^{abc} - Z^{abc} \cdot I^{abc} \quad (2.9)$$

Fazendo a transformação para componentes simétricas, lembrando a relação de transformação na equação (2.10) chega-se no resultado apresentado em (2.11).

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$T \cdot V_a^{012} = T \cdot E^{abc} - Z^{abc} \cdot T \cdot I^{abc}$$

$$V_a^{012} = E_a^{012} - T^{-1} \cdot Z^{abc} \cdot T \cdot I_a^{012} \quad (2.11)$$

Onde  $E_a^{012}$ ,  $Z^{012}$ ,  $I_a^{012}$  são dados respectivamente pelas equações (2.12), (2.13), (2.14).

$$E_a^{012} = T \cdot E^{abc} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$Z^{012} = T^{-1} \cdot Z^{abc} \cdot T = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$I_a^{012} = \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Finalmente, substituindo na equação (2.11), encontra-se os três circuitos independentes – sequência zero, positiva negativa – de acordo com a equação (2.15).

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Na Figura 18 tem-se as três seqüências - positiva, negativa, zero – respectivamente.

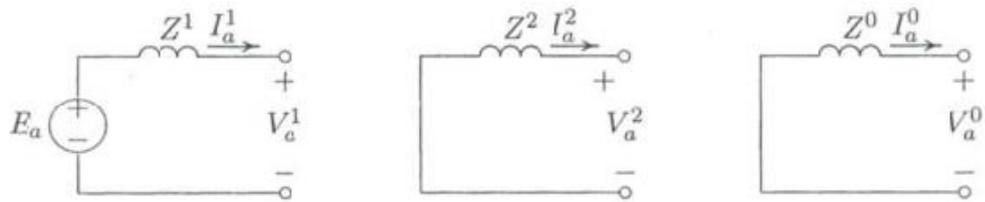


Figura 18 Redes de Sequências (SAADAT, 2002)

### 2.6.1 Conexão de Redes de Sequências

Sabe-se que se a rede é equilibrada, a matriz de impedâncias ( $Z_{barra}$ ) é simétrica. Considerando uma falta na barra “k”, o elemento da diagonal da posição “kk” da matriz  $Z_{barra}$ , (ver capítulo 4) representam as impedâncias de Thévenin em cada fase vistas do ponto de falta. Esta consideração vale para a representação por fases e por sequência.

No caso de solução por componentes simétricas (também chamada de solução por redes de sequências) para faltas simétricas ou assimétricas a matriz  $Z_{barra}$  para cada uma das sequências é obtida separadamente (SAADAT, 2002), e posteriormente as impedâncias  $Z^0_{kk}, Z^1_{kk}, Z^2_{kk}$  são conectadas de acordo com cada tipo de falta.

A seguir, apresenta-se as equações para calcular as faltas simétricas (fase-fase-fase-terra) e assimétricas (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra).

#### 2.6.1.1 Falta Fase-Terra

Considere uma falta entre a “fase A” e o terra através de uma impedância de falta  $Z_{falta}$  na barra “k”, como se apresenta na Figura 19.

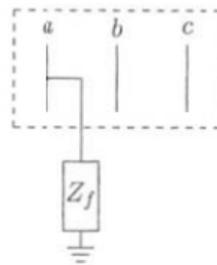


Figura 19 Falta Fase-Terra (SAADAT,2002)

A partir da figura anterior é possível observar as condições de contorno, de acordo com a equação (2.16):

$$V_a \neq 0 \quad I_a \neq 0 \quad I_b = I_c = 0 \quad (2.16)$$

Ainda observando a Figura 19, encontra-se as equações de corrente apresentadas nas equações (2.17) (2.18) e também a relação da tensão, de acordo com as equações (2.19) (2.20).

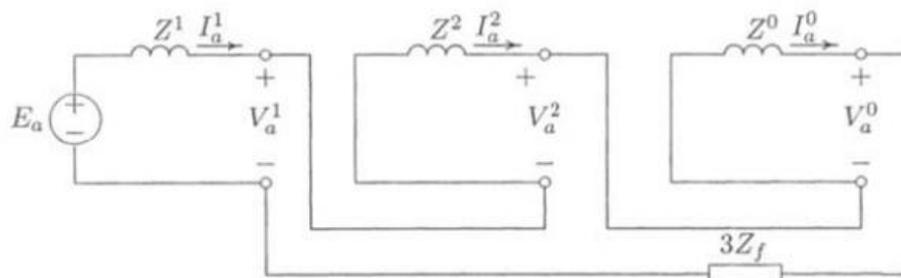
$$I_{012} = T^{-1} \cdot I_{abc} \quad (2.17)$$

$$I_{012} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot I_a \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$V_a = Z_f \cdot I_a \quad (2.19)$$

$$V_a = (V_a^1 + V_a^2 + V_a^0) = Z_f \cdot 3 \cdot I_a^1 \quad (2.20)$$

Como a corrente que passa pelas três seqüências é igual, as redes de seqüência serão conectadas em série, de acordo com a Figura 20.



**Figura 20 Conexão das Redes de Sequência - Falta Fase-Terra (SAADAT,2002)**

Pela lei Kirchhoff, tem-se a equação da malha, de acordo com a equação (2.21) e em seguida a corrente de curto-circuito, conforme a equação (2.22):

$$Z_f \cdot 3 \cdot I_a^1 = E_a - (Z^1 + Z^2 + Z^0) \cdot I_a^1 \quad (2.21)$$

$$I_a^1 = \frac{E_a}{(Z^1 + Z^2 + Z^0) + 3 \cdot Z_f} \quad (2.22)$$

Onde:

$Z^1$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^1$ , correspondente a barra “k”.

$Z^2$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^2$ , correspondente a barra “k”.

$Z^0$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^0$ , correspondente a barra “k”, somado a impedância de aterramento -  $3 \cdot Z_n$  (caso exista).

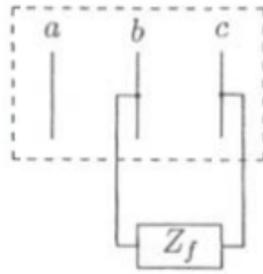
$E_a$  = tensão pré-falta na barra “k” (1 P.U.).

Em termos matemáticos e de modelagem, para algumas faltas envolvendo o terra, aparece nos modelos a impedância de falta multiplicada por 3 nos modelos por componentes simétricas, de forma a satisfazer as condições de contorno.

Em termos de equacionamento, uma possibilidade caso a falta ocorra em outra fase em relação ao terra, é calcular normalmente a corrente de curto-circuito como foi demonstrado anteriormente e posteriormente defasar  $-120^\circ$  se a falta ocorrer na “fase B”, ou defasar  $+120^\circ$  se ocorrer na “fase C”. Isso pode ser feito, já que a escolha de qual coordenada estará em  $0^\circ$  é feito por convenção.

### 2.6.1.2 Falta Fase-Fase.

Considere uma falta entre a “fase A” e a “fase B” através de uma impedância de falta  $Z_{falta}$  na barra “k”, como se apresenta na Figura 21.



**Figura 21 Falta Fase-Fase (SAADAT,2002)**

A partir da figura anterior é possível observar as condições de contorno, de acordo com a equação (2.23).

$$I_a = 0 \quad I_b = -I_c \quad (2.23)$$

Ainda observando a Figura 21, encontra-se as equações de corrente apresentadas nas equações (2.24) (2.25) e também, a relação da tensão, de acordo com as equações (2.26) (2.27)

$$I_{012} = T^{-1} \cdot I_{abc} \quad (2.24)$$

$$I_{012} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \frac{i}{\sqrt{3}} I_b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

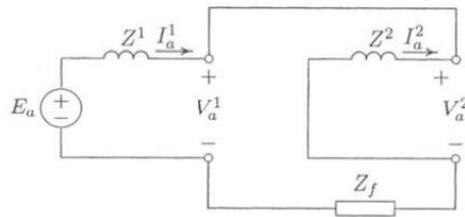
$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_b \quad (2.26)$$

$$(V_a^1 - V_a^2) = Z_f \cdot I_a^1 \quad (2.27)$$

A partir da equação (2.27), pode-se encontrar a corrente de curto-circuito para esse tipo de falta, como segue em (2.28).

$$I_a^1 = \frac{(V_a^1 - V_a^2)}{Z_f} \quad (2.28)$$

Pela equação (2.27), percebe-se que as redes de sequência – positiva e negativa – devem ser conectadas em paralelo, como mostra a Figura 22.



**Figura 22 Conexão das Redes de Sequência para uma - Falta Fase-Fase (SAADAT,2002)**

Onde:

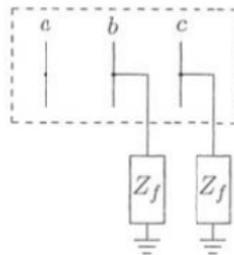
$Z^1$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^1$ , correspondente a barra “k”.

$Z^2$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^2$ , correspondente a barra “k”.

$E_a$  = tensão pré-falta na barra “k” (1 pu).

### 2.6.1.3 Falta Fase-Fase-Terra

Considere uma falta entre a “fase B” e “fase C” e a “terra” através de uma impedância de falta  $Z_{falta}$  na barra “k”, como se apresenta na Figura 23.



**Figura 23 Faltas Fase-Fase-Terra**

A partir da figura anterior é possível observar as condições de contorno, de acordo com (2.29):

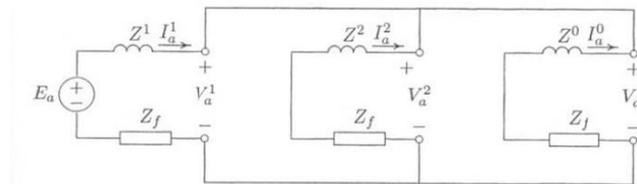
$$I_b + I_c = I_n \quad I_a = 0 \quad (2.29)$$

Ainda observando a Figura 23, encontra-se a equação de corrente  $I_a$  em relação as componentes de seqüências, como é apresentado em (2.30).

$$I_a = 0 = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \quad (2.30)$$

Observa-se, em (2.30) que as somas das correntes das componentes simétricas deve ser igual a “zero”. Pela lei das correntes de Kirchhoff, para que isso ocorra, essas correntes devem estar “entrando” em um nó. Assim, deve-se conectar as redes de sequência – positiva, negativa, e zero – em paralelo, como mostra a Figura 24.

É importante salientar, que a rede de sequência zero, só é incluída nas análises de faltas, quando a falta envolver a terra.



**Figura 24 Conexão das Redes de Sequência para uma Falta:Fase-Fase-Terra (ANDERSON, 1973)**

Para encontrar a corrente de curto-circuito  $I_a^2, I_a^0$ , basta fazer um divisor de corrente, depois de ter calculado  $I_a^1$  como se segue na equação (2.31).

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 //^1 (Z_0 + Z_f)} \quad (2.31)$$

Ao se fazer, divisão de corrente, como sugerido anteriormente, encontra-se as outras correntes de curto-circuito, conforme (2.32) e (2.33).

---

<sup>1</sup>Símbolo que representa o paralelo das impedâncias.

$$I_a^2 = \frac{Z_0 + Z_f}{Z_2 + Z_0 + Z_f} \cdot I_a^1 \quad (2.32)$$

$$I_a^0 = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + Z_f} \cdot I_a^1 \quad (2.33)$$

Onde:

$Z^1$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^1$ , correspondente a barra “k”.

$Z^2$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^2$ , correspondente a barra “k”.

$Z^0$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^0$ , correspondente a barra “k”, somado a impedância de aterramento -  $3Z_n$  (caso exista).

$$Z_f = 3 \cdot Z_f$$

$E_a$  = tensão pré-falta na barra “k” (1 P.U.).

#### 2.6.1.4 Falta Trifásica-Terra

Considere uma falta entre a “fase A” e “fase B” e “fase C” e o “terra” através de uma impedância de falta  $Z_{falta}$  na barra “k”, como se apresenta na Figura 23.

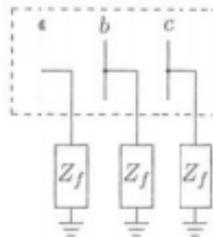


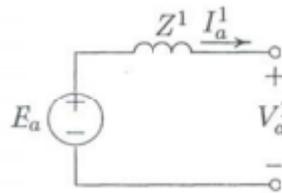
Figura 25 Falta Trifásica-Terra (ANDERSON,1973)

Como o sistema elétrico de potência é equilibrado as correntes estão defasadas,  $120^\circ$ . Através de análise de circuito e calculando as correntes para componentes simétricas, chega-se nas equações (2.34) e (2.35).

$$I_{012} = T^{-1} \cdot I_{abc} \quad (2.34)$$

$$I_{012} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ a^2 \cdot I_a \\ a \cdot I_a \end{bmatrix} = I_a \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Portanto, as redes de sequência são desacopladas e as correntes de sequência zero e negativa são nulas, existindo apenas a sequência positiva. Assim sendo, a rede de sequência para esse tipo de falta, será representado apenas pela sequência positiva, como na Figura 26.



**Figura 26 Conexão das Redes de Sequência para uma Falta: Fase-Fase-Fase-Terra (ANDERSON,1973)**

Por análise de circuito, tem-se que a corrente de curto-circuito é o que está apresentado em (2.36).

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z_1} \quad (2.36)$$

Onde:

$Z_1$  = elemento da diagonal principal da matriz  $Z_{barra}^1$ , correspondente a barra “k”.

Por análise qualitativa, pode observar que a corrente de curto-circuito trifásica, é a que possui o menor denominador – depende apenas da impedância  $Z_1$ . Assim, será a corrente de curto-circuito de maior valor.

## Capítulo 3

### ESTUDOS DE FALHAS POR COORDENADAS DE FASE

#### 3.1 Introdução

O estudo de falhas por componentes simétricas na maioria das vezes fornece resultados aproximados, devidos as simplificações feitas, onde, por exemplo, são desconsiderados os acoplamentos entre as sequências – positiva, negativa e zero. Para sistemas equilibrados os resultados utilizando componentes simétricas são mais aceitáveis, mas em sistemas desequilibrados/multifásicos o erro pode ser considerável. Para que isso não ocorra, pode-se considerar o acoplamento entre as sequências, porém, o método torna-se dispendioso computacionalmente e bastante complexo, eliminando assim, a principal vantagem do método. Outro cenário em que o erro passa a não desprezível, é quando se trata de análise de falhas série e simultâneas, uma vez que esses tipos de falhas introduzem o mesmo acoplamento, dito anteriormente, entre as sequências.

Nestes casos onde há restrições impostas pelo método de componente simétrica, ou que seus resultados não são aceitáveis, é interessante utilizar para análise de falhas metodologias baseadas em soluções diretamente em coordenadas de fase.

Neste trabalho foi estudada e será resumida neste capítulo uma metodologia para análise de falhas diretamente em coordenadas de fase desenvolvida em CARVALHO FILHO (2014). Esta metodologia baseia-se no método de injeção de correntes a “n” condutores em coordenadas retangulares (o que permite sem aumento de complexidade o estudo de sistemas multifásicos), realizando a solução do sistema diretamente em coordenadas de fase. Toda a modelagem, seja dos equipamentos ou das condições de falha, é modelada em termos de elementos, onde cada elemento gera contribuições de correntes, para o vetor independente e para matriz Jacobiana do método. Tal modelagem garante grande flexibilidade para diferentes configurações de equipamentos e sistemas, além de ter a solução sempre otimizada em termos de processamento computacional.

Neste capítulo será apresentado um resumo da metodologia para estudos de falhas por coordenadas de fase.

A elaboração deste capítulo está baseada principalmente nas referências a seguir: (CARVALHO FILHO, 2014) e (PENIDO, 2008).

### 3.2 Resumo da Metodologia para Análise de Falhas em Sistemas Multifásicos

A metodologia consiste, basicamente, na solução de um sistema de equações não-lineares, de acordo com a equação (3.1), sendo utilizado o método de Newton Raphson.

$$f(z) = 0 \quad (3.1)$$

Onde:

**z** – são as variáveis de estado da metodologia: podem ser as tensões nodais em parcelas reais e imaginárias, as gerações ativa e reativa dos geradores e as demais variáveis de controle.

**f** – Conjunto de equações, contemplando equações de somatório das injeções de correntes em cada nó do sistema e equações de controle quando existentes. Também chamado de vetor independente. A solução do conjunto de equações não lineares apresentada na equação é feita utilizando o método de Newton-Raphson, onde o sistema linearizado a ser resolvido em cada iteração é apresentado em (3.2).

$$\Delta Z = -J(z)^{-1} \cdot f(z) \quad (3.2)$$

Onde:

**J(z)** – matriz Jacobiana, composta por derivadas de primeira ordem das equações **f(z)** em relação as variáveis de estado do problema (**z**).

**Δz** – vetor de incrementos das variáveis de estado.

A Figura 27 apresenta o algoritmo de solução da metodologia proposta, e na sequência serão descritos os principais passos. Alguns são intuitivos com seus textos no algoritmo e não serão descritos. Para outros há mais detalhes que podem ser vistos na referência (CARVALHO FILHO, 2014).

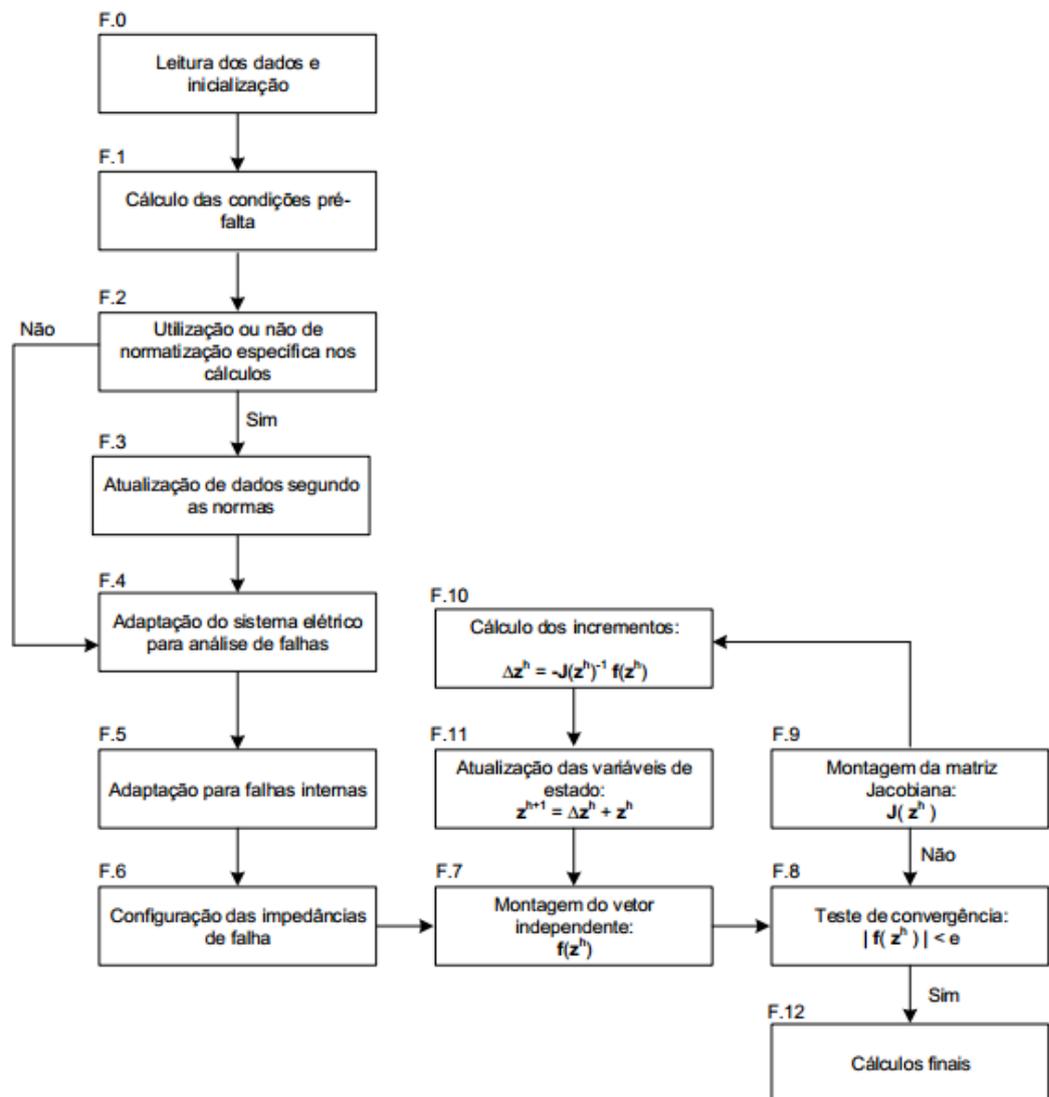


Figura 27 Algoritmo da Metodologia Proposta (CARVALHO FILHO, 2014)

**Passo F.2** - Neste ponto é definido se será feita a análise considerando alguma alteração de modelagem indicada por alguma norma, como por exemplo, IEC ou IEEE.

**Passo F.4** – Nesta etapa são feitas adaptações dependendo do que se deseja considerar para análise de falha.

Para exemplificar uma adaptação considere um possível tratamento de cargas. Muitas vezes, em estudos de análises de falhas não utiliza-se os modelos originais de cargas utilizados para fluxo de potência, devido ao elevado grau de complexidade na solução quando se tem uma

carga de potência constante, por exemplo. Assim, os modelos, normalmente, são considerados como impedância constante.

**Passo F5** – Se as falhas a serem calculadas forem as internas dos transformadores, deve-se realizar uma modelagem específica, descrita na modelagem de equipamentos mais à frente.

**Passo F.6** – Neste passo é definida a representação por impedância da configuração do tipo de falha que será analisada. As falhas são implementadas através de equipamentos do tipo RLC, e estas representações serão apresentadas no tópico de modelagem de equipamentos mais à frente.

Os passos seguintes são basicamente a solução utilizando o método de Newton-Raphson do sistema previamente modelado e maiores informações podem ser vistas em PENIDO (2008).

### 3.3 Modelagem de Equipamentos para Análise de Falhas

Serão apresentados a seguir os resumos dos modelos dos principais equipamentos considerados em CARVALHO FILHO (2014) com suas respectivas contribuições dos elementos para o vetor independente e para a matriz Jacobiana do método de solução, mais detalhes podem ser vistos na referência citada.

Esta modelagem baseia-se no que foi desenvolvido em PENIDO (2008), com alguns ajustes e/ou melhoras para análises de falhas. Em PENIDO (2008) a mesma foi definida como modelagem “por elementos”, onde elemento é qualquer estrutura conectada entre dois nós, que possui uma determinada impedância. A Figura 28 apresenta um elemento genérico conectado entre os nós “k” e “m” do sistema.



**Figura 28 Elemento Genérico**

Onde:

$Z_{km}$  impedância entre os nós “k” e “m”.

$Y_{km}$  admitância entre os nós “k” e “m”.

$I_{km}$  corrente do nó “k” para “m”.

$I_{mk}$  corrente do nó “m” para “k”.

As contribuições de correntes deste elemento são apresentadas no conjunto de equações (3.3) e (3.4).

$$I_{km} = Y_{km} \cdot (V_k - V_m) \quad (3.3)$$

$$I_{mk} = Y_{km} \cdot (V_m - V_k) \quad (3.4)$$

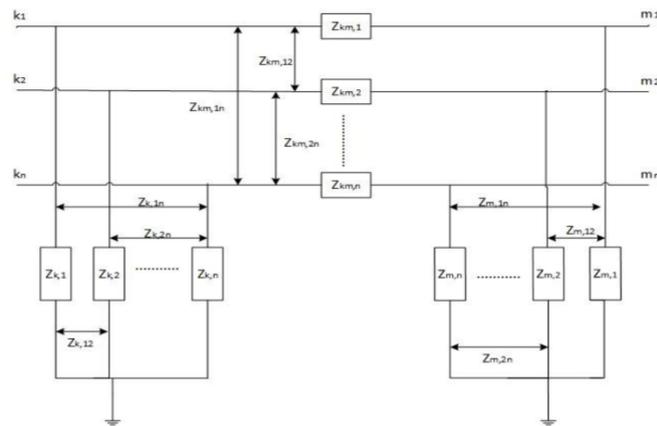
Assim, a partir das contribuições combinadas dos diferentes elementos, em diferentes conexões, pode-se obter a modelagem de vários equipamentos, sendo os principais apresentados a seguir.

### 3.3.1 Linhas de Transmissão e Alimentadores de Distribuição

A modelagem deste equipamento é geral. Assim sendo, permite-se modelar as linhas e alimentadores com qualquer número de condutores, representando mútuas, acoplamentos entre linhas próximas com mesma tensão nominal ou tensão diferente, dentre outras características.

É importante salientar, que em algumas metodologias na modelagem dos alimentadores de distribuição, os efeitos dos cabos neutros nos cabos de fase são incorporados através da redução de Kron, ou muitas vezes desconsiderados. Se o sistema for solidamente aterrado, a redução de Kron irá apresentar resultados corretos, mas, em casos de sistemas sem aterramento sólido, os resultados serão aproximados ou até mesmo incorretos.

A Figura 29 apresenta o modelo  $\pi$  equivalente a parâmetros concentrados de uma linha genérica a “n” condutores.



**Figura 29 Modelo de Linhas**

Onde:

$Z_{km,x}$  impedância própria entre os nós “k” e “m” da fase “x”.

$Z_{km,xy}$  impedância mútua entre as fases “x” e “y”.

$Z_{k,x}$  impedância em derivação nas fases “x” do nó “k”.

$Z_{k,xy}$  impedância mútua em derivação entre as fases “x” e “y” do nó “k”.

$Z_{m,x}$  impedância em derivação na fase “x” do nó “m”.

$Z_{m,xy}$  impedância mútua em derivação entre as fases “x” e “y” do nó “m”.

Se forem consideradas as impedâncias mútuas, é necessária inicialmente a construção da matriz  $Z_{primitiva}$  da linha ou alimentador. Para representação de ramais monofásicos e bifásicos, é necessário apenas as conexões e fases existentes.

### Contribuições de Injeção de Correntes

As equações complexas formadas a partir das contribuições dos vários elementos da linha, que determinam as contribuições de injeções de correntes de uma linha genérica, são expressas em (3.5) e (3.6).

$$I_{km,linha} = \begin{bmatrix} Z_{km,1} & Z_{km,12} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{km,1n} \\ Z_{km,21} & Z_{km,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{km,2n} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{km,n1} & Z_{km,n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{km,nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} - V_{m1} \\ V_{k2} - V_{m2} \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{kn} - V_{mn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{k,1} & Z_{k,12} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{k,1n} \\ Z_{k,21} & Z_{k,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{k,2n} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{k,n1} & Z_{k,n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{k,nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{kn} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$I_{mk,linha} = \begin{bmatrix} Z_{km,1} & Z_{km,12} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{km,1n} \\ Z_{km,21} & Z_{km,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{km,2n} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{km,n1} & Z_{km,n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{km,nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m1} - V_{k1} \\ V_{m2} - V_{k2} \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{mn} - V_{kn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{m,1} & Z_{m,12} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,1n} \\ Z_{m,21} & Z_{m,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,2n} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{m,n1} & Z_{m,n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{m,nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

### Contribuições para o Vetor Independente

As contribuições de uma linha genérica são expressas por (3.7) e (3.8).

$$f_{k,linha}(z) = \begin{bmatrix} Im(I^1_{km}) \\ Re(I^1_{km}) \\ \vdots \\ Im(I^n_{km}) \\ Re(I^n_{km}) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$f_{m,linha}(z) = \begin{bmatrix} Im(I^1_{mk}) \\ Re(I^1_{mk}) \\ \vdots \\ Im(I^n_{mk}) \\ Re(I^n_{mk}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### Contribuições para a Matriz Jacobiana

As contribuições para a matriz Jacobiana de uma linha genérica são apresentadas em (3.9).



$$J_4 = \begin{bmatrix} \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^1}{\partial V_{Re_{m1}}} \right) & \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^1}{\partial V_{Im_{m1}}} \right) & \cdot & \cdot & \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^1}{\partial V_{Re_{mn}}} \right) & \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{km,linha}^1}{\partial V_{Im_{mn}}} \right) \\ \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^1}{\partial V_{Re_{m1}}} \right) & \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^1}{\partial V_{Im_{m1}}} \right) & \cdot & \cdot & \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^1}{\partial V_{Re_{mn}}} \right) & \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{km,linha}^1}{\partial V_{Im_{mn}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \vdots & \vdots \\ \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Re_{m1}}} \right) & \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Im_{m1}}} \right) & \cdot & \cdot & \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Re_{mn}}} \right) & \operatorname{Im} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Im_{mn}}} \right) \\ \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Re_{m1}}} \right) & \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Im_{m1}}} \right) & \cdot & \cdot & \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Re_{mn}}} \right) & \operatorname{Re} \left( \frac{\partial I_{mk,linha}^n}{\partial V_{Im_{mn}}} \right) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

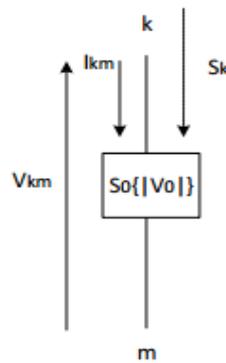
### 3.3.2 Cargas

Dentre vários modelos para representar as cargas em análises em regime permanente, os mais utilizados são os modelos ZIP (polinomial) e o modelo exponencial. Ambos os modelos permitem que a carga seja modelada como potência constante, corrente constante, impedância constante ou uma combinação entre as três características.

Estes componentes são normalmente modelados como cargas equivalentes conectadas às barras do sistema, sendo que a potência consumida por eles pode variar conforme o seu tipo.

A metodologia proposta possibilita representar as cargas nas mais diferentes conexões (estrela, delta, dentre outros), inclusive cargas monofásicas e bifásicas, muito comuns em sistemas de distribuição, que são modeladas da mesma forma. Para cada carga devem ser determinadas as contribuições de injeções de correntes, para o vetor independente e para a matriz Jacobiana.

A representação de um elemento carga genérico conectado entre dois nós “k” e “m” é apresentado na Figura 30.



**Figura 30 Modelo de uma Carga Genérico**

### Contribuições de Injeções de Correntes

As contribuições de injeções de correntes de um elemento carga genérico, conectado entre dois nós “k” e “m” quaisquer do sistema são dadas pelas equações (3.14), (3.15)

$$I_{km,carga} = \left( \frac{S_{km}}{V_{km}} \right)^* \quad (3.14)$$

$$I_{km,carga} = \left( \frac{S_{km}}{V_{mk}} \right)^* \quad (3.15)$$

Expandindo as duas equações anteriores, chega-se às equações de contribuições de injeções de correntes do elemento carga, conforme (3.16), (3.17), (3.18).

$$I_{km,carga} = |V_k - V_m|^\alpha \left( \frac{P_{cor} + jQ_{cor}}{V_k - V_m} \right)^* \quad (3.16)$$

$$I_{mk,carga} = |V_m - V_k|^\alpha \left( \frac{P_{cor} + jQ_{cor}}{V_m - V_k} \right)^* \quad (3.17)$$

$$I_{km,carga} = -I_{mk,carga}^* \quad (3.18)$$

### Contribuições para o Vetor Independente

São dadas pelas equações (3.19) e (3.20).

$$f_{k,carga}(z) = \begin{bmatrix} Im(I_{km,carga}) \\ Re(I_{km,carga}) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$f_{m,carga}(z) = \begin{bmatrix} Im(I_{mk,carga}) \\ Re(I_{mk,carga}) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

### Contribuições para a Matriz Jacobiana

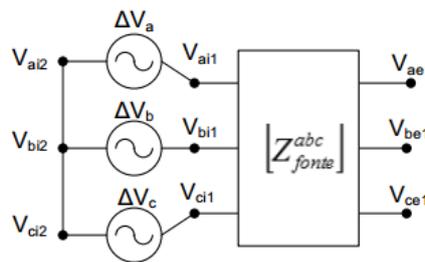
As contribuições para a matriz Jacobiana de um elemento carga, genérico, conectado entre dois nós “k” e “m” quaisquer do sistema são dadas pela equação (3.21), segundo CARVALHO FILHO (2014).

$$J_{km,carga} = \begin{bmatrix} Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_k}}\right) & Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_k}}\right) & \dots & Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_m}}\right) & Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_m}}\right) \\ Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_k}}\right) & Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_k}}\right) & \dots & Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_m}}\right) & Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_m}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_k}}\right) & Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_k}}\right) & \dots & Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_m}}\right) & Im\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_m}}\right) \\ Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_k}}\right) & Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_k}}\right) & \dots & Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Re_m}}\right) & Re\left(\frac{\partial I_{km,carga}}{\partial V_{Im_m}}\right) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

### 3.3.3 Geradores e Subestações

Com o aumento da geração dispersa, muitas vezes desequilibrada, nos sistemas de distribuição, tende-se a ter mais erros em termos de representação caso estes desequilíbrios não sejam corretamente representados. Deste modo as considerações realizadas nas modelagens por componentes simétricas podem conduzir a análises incorretas. Na metodologia proposta é possível representar o desequilíbrio da geração.

Os geradores e subestações são modelados como fontes de tensão seguidas de suas impedâncias. Para entender a modelagem, será feito um exemplo de uma fonte trifásica, conforme Figura 31.



**Figura 31 Modelo de gerador ou subestação**

Onde:

$V_{ai1}, V_{ai2}, V_{bi1}, V_{bi2}, V_{ci1}$  e  $V_{ci2}$  são os nós de conexão internos das fontes de tensão do modelo, que representam as tensões “geradas” na fase “a”, “b” e “c” das máquinas ou das subestações.

$V_{ae1}, V_{be1}, V_{ce1}$  nós de conexão externos das máquinas ou das subestações.

$Z^{abc}$  matriz de impedâncias representativa da máquina ou das impedâncias de curto-circuito da subestação.

$\Delta V_a, \Delta V_b$  e  $\Delta V_c$  tensões internas das fontes de tensão do modelo calculadas na condição pré-falta.

Considera-se que os valores das tensões internas das fontes de tensão de cada fase foram calculados para a condição pré-falta e posteriormente foram mantidos fixos durante a análise de curto-circuito. Isto é feito, pois durante os instantes iniciais do curto-circuito não são consideradas as ações dos reguladores de tensão das máquinas ou as ações dos tapes dos transformadores se existentes.

Em relação à contribuição do vetor independente e da matriz Jacobiana relativa às impedâncias das fontes, elas podem ser obtidas de forma análoga ao realizado para as linhas. Já a contribuição de injeção de corrente é obtida pela equação (3.22), (3.23)

$$I_{e1}(z) = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ae1} - V_{ai1} \\ V_{be1} - V_{bi1} \\ V_{ce1} - V_{ci1} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$I_{i1}(z) = -I_{e1}(z) \quad (3.23)$$

Em relação as fontes de tensão, as quais no modelo considerado neste trabalho são na realidade tensões internas (várias metodologias nem representam as impedâncias das fontes e nestes casos já seriam as tensões externas), existem também possibilidades diferentes de tratá-las.

É conhecido que em diversas metodologias de análise de sistemas em coordenadas de fase, os modelos de geradores e subestações são determinados como tipos de barras de geração, sendo as mais utilizadas: barras V $\theta$ , PV e PQ.

Neste trabalho, para representar as diferentes características dos geradores ou subestações, e suas especificações, foram adicionadas equações a serem solucionadas no sistema de solução (diferentemente de algumas metodologias que tiram equações do processo de solução), e, portanto, algumas de suas variáveis tornam-se variáveis de estado e são atualizadas durante o processo iterativo. Para mais detalhes sobre esta abordagem verificar a referência (CARVALHO FILHO, 2014).

Para obter a contribuição de injeções de correntes, do vetor independente e da matriz Jacobiana das fontes de tensões, pode-se prosseguir de forma análoga ao realizado para as linhas. A diferença, consiste no fato de se adicionar equações para especificar o tipo de barra.

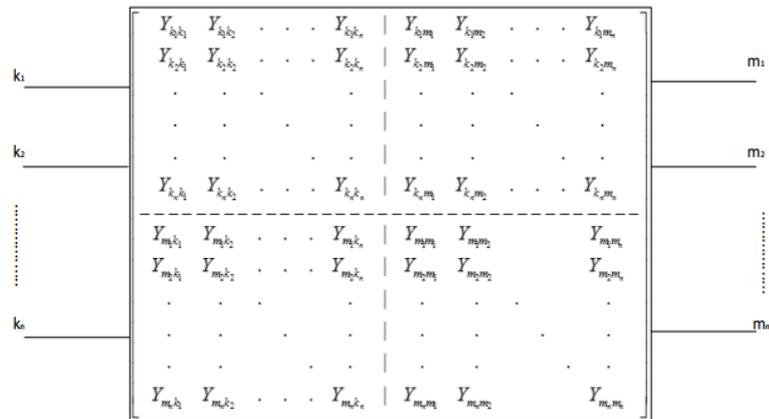
### 3.3.4 Transformadores

No modelo de transformador proposto em CARVALHO FILHO (2014) podem ser criados inclusive nós internos e intermediários nos enrolamentos para simular condições de falhas internas, e esses nós são definidos de acordo com o tipo e localização da falha interna que será simulada. Na referência (CARVALHO FILHO, 2014) é apresentada a construção da matriz admitância nodal do transformador que possibilita inclusive representar falha interna, além de outros detalhes mais aprofundados de modelagem que não serão tratados aqui.

#### Contribuições de injeções de corrente

Na Figura 32 é apresentada uma estrutura matricial referente a matriz admitância nodal do modelo de um transformador genérico.

As equações (3.24), (3.25) apresentam as contribuições de injeções de corrente do transformador genérico, obtidas a partir da matriz admitância nodal apresentada na figura anterior.



**Figura 32 Modelo Matricial de um Transformador Genérico**

$$I_{k,tr} = \begin{bmatrix} Y_{k_1 k_1} & Y_{k_1 k_2} & \dots & Y_{k_1 k_n} & | & Y_{k_1 m_1} & Y_{k_1 m_2} & \dots & Y_{k_1 m_n} \\ Y_{k_2 k_1} & Y_{k_2 k_2} & \dots & Y_{k_2 k_n} & | & Y_{k_2 m_1} & Y_{k_2 m_2} & \dots & Y_{k_2 m_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k_n k_1} & Y_{k_n k_2} & \dots & Y_{k_n k_n} & | & Y_{k_n m_1} & Y_{k_n m_2} & \dots & Y_{k_n m_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ \vdots \\ V_{kn} \\ \hline V_{m1} \\ V_{m2} \\ \vdots \\ V_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$I_{k,tr} = \begin{bmatrix} Y_{m_1 k_1} & Y_{m_1 k_2} & \dots & Y_{m_1 k_n} & | & Y_{m_1 m_1} & Y_{m_1 m_2} & \dots & Y_{m_1 m_n} \\ Y_{m_2 k_1} & Y_{m_2 k_2} & \dots & Y_{m_2 k_n} & | & Y_{m_2 m_1} & Y_{m_2 m_2} & \dots & Y_{m_2 m_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m_n k_1} & Y_{m_n k_2} & \dots & Y_{m_n k_n} & | & Y_{m_n m_1} & Y_{m_n m_2} & \dots & Y_{m_n m_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ \vdots \\ V_{kn} \\ \hline V_{m1} \\ V_{m2} \\ \vdots \\ V_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

### Contribuição para o Vetor Independente

As contribuições para o vetor independente de um transformador genérico de “n” enrolamentos, como representado por sua matriz admitância nodal na Figura 33, são apresentados nas equações (3.26) e (3.27).

$$f_{k,tr}(z) = \begin{bmatrix} \text{Im}(I_k^1) \\ \text{Re}(I_k^1) \\ \vdots \\ \text{Im}(I_k^n) \\ \text{Re}(I_k^n) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$f_{m,tr}(z) = \begin{bmatrix} \text{Im}(I_m^1) \\ \text{Re}(I_m^1) \\ \vdots \\ \text{Im}(I_m^n) \\ \text{Re}(I_m^n) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

As contribuições para a matriz Jacobiana podem ser obtidas de forma análoga ao realizado para as linhas.

### 3.3.5 RLC

Vários equipamentos dos sistemas elétricos de potência podem ser modelados como uma composição de elementos resistivos, indutivos e capacitivos, os quais são chamados em CARVALHO FILHO (2014) de elementos RLC, podendo estar conectados nas mais diferentes configurações formando os componentes. São exemplos de equipamentos que podem ser modelados por elementos RLC: capacitores em derivação para correção de fator de potência ou para representação de capacitâncias parasitas, capacitores série para compensação de reatância da linha, filtros harmônicos, dentre outros. A Figura 33 apresenta uma conexão estrela de elementos RLC formando um componente RLC.

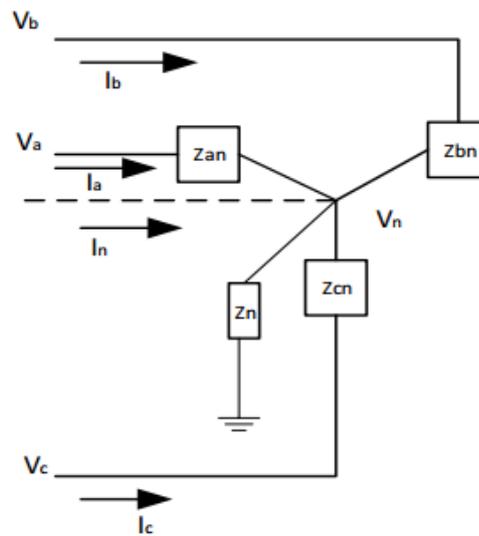


Figura 33 Modelo de Componente RLC com Conexão Estrela Aterrada

### Contribuições de Injeções de Correntes

Esses elementos podem estar conectados entre dois nós “k” e “m”, ou conectado entre um nó “k” e a terra. Para a conexão entre dois nós as contribuições de injeções de correntes deste elemento são apresentadas nas equações (3.28), (3.29)

$$I_{km,rlc} = Y_{km} \cdot (V_k - V_m) \quad (3.28)$$

$$I_{mk,rlc} = Y_{km} \cdot (V_m - V_k) \quad (3.29)$$

Já para um elemento conectado entre um nó e a terra, a contribuição será apenas para o nó, conforme a equação (3.30).

$$I_{k,rlc} = Y_k \cdot (V_k) \quad (3.30)$$

### Contribuições para o Vetor Independente

Aas contribuições para um elemento genérico RLC entre os nós “k” e “m” são apresentadas nas equações (3.31) e (3.32).

$$f_{k,rlc}(z) = \begin{bmatrix} Im(I_{km,rlc}) \\ Re(I_{km,rlc}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Im(Y_{km} \cdot (V_k - V_m)) \\ Re(Y_{km} \cdot (V_k - V_m)) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$f_{m,rlc}(z) = \begin{bmatrix} Im(I_{mk,rlc}) \\ Re(I_{mk,rlc}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Im(Y_{km} \cdot (V_m - V_k)) \\ Re(Y_{km} \cdot (V_m - V_k)) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Enquanto que para um elemento conectado entre o nó e a terra, a contribuição é conforme a equação

$$f_{k,rlc}(z) = \begin{bmatrix} Im(I_{k,rlc}) \\ Re(I_{k,rlc}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Im(Y_k \cdot (V_k)) \\ Re(Y_k \cdot (V_k)) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Em relação às contribuições para a matriz Jacobiana, elas podem ser obtidas de formas análogas ao que foi feito para as linhas, considerando os dois possíveis tipos de elementos RLC, ou seja, entre dois nós ou entre um nó e o terra.

### 3.3.6 Sistemas de Aterramento

Os sistemas de aterramento podem ser modelados através de componentes RLC. A utilização deste modelo é capaz de representar as mais diferentes conexões e métodos de aterramento presentes nos sistemas elétricos. As contribuições de injeções de correntes, para o vetor independente e para a matriz Jacobiana, são combinações das apresentadas para os elementos RLC mostrados na seção anterior em que, caso sejam considerados todos os elementos existentes, pode-se modelar qualquer sistema de aterramento.

### 3.3.7 Modelagem dos Tipos de Falhas

Além da modelagem de forma detalhada dos equipamentos elétricos, as representações das condições de falha também devem ser feitas retratando da forma mais realista quanto possíveis tais situações.

Em CARVALHO FILHO (2014) foi considerada uma modelagem das condições de falhas através das conexões de elementos RLC em diversas configurações para representar os mais importantes tipos de falhas. O que irá determinar cada tipo de falha é a conexão de determinados elementos nos nós a serem considerados as falhas.

A Figura 34 apresenta de forma esquemática alguns tipos de falhas que podem ser representados utilizando esta metodologia.

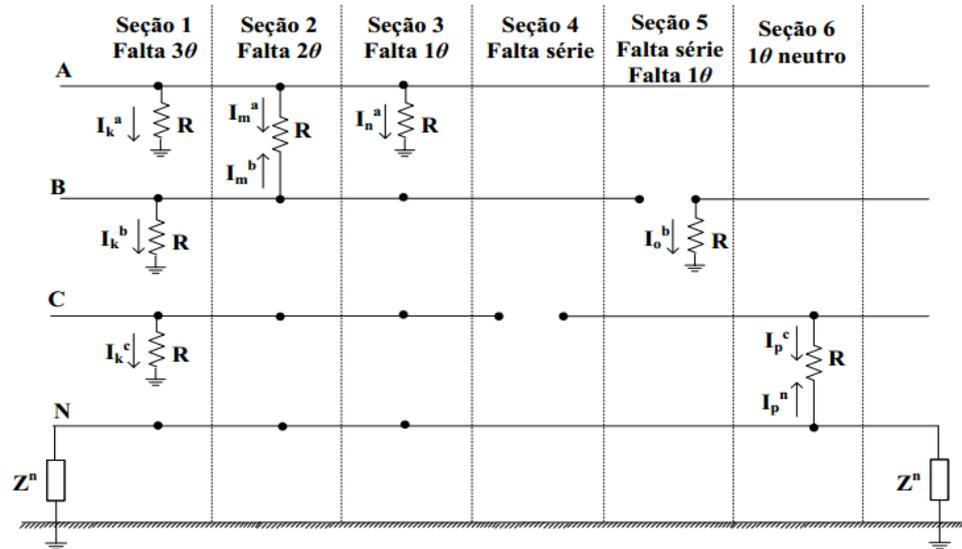


Figura 34 Representação Esquemática dos Modelos de Falhas

## Capítulo 4

### MODELOS MATRICIAIS DE REDES

Atualmente é praticamente impossível analisar um sistema elétrico de potência real utilizando álgebras tradicionais, devido à grande complexidade. Por este motivo, os modelos computacionais são muito utilizados para tornar a análise viável.

Neste capítulo será apresentado um resumo de representações do SEP por modelos matriciais, sendo estes modelos interessantes para a implementação de cálculos computacionais. A principal base para a criação deste capítulo é a referência (PINTO, D P, 2014).

Serão apresentadas as montagens de matrizes muito utilizadas para a representação dos SEP: Impedância Primitiva ( $Z_{\text{prim}}$ ), Admitância Primitiva ( $Y_{\text{prim}}$ ), Impedância de Barras ( $Z_{\text{barra}}$ ), Admitância de Barras ( $Y_{\text{barra}}$ ), ( $Z_{\text{laço}}$ ) e ( $Y_{\text{laço}}$ ).

#### 4.1 Modelagem Básica

Para a modelagem básica da maioria dos componentes dos SEP pode-se considerar uma abordagem geral que será aqui descrita. Nesta modelagem básica não é necessário representar individualmente os componentes do sistema, é possível definir modelos genéricos que sirvam como base para vários deles. Estes modelos estão representados nas Figura 35 e Figura 36, onde estão as indicações dos modelos para coordenadas de fase e também utilizando componentes simétricas.

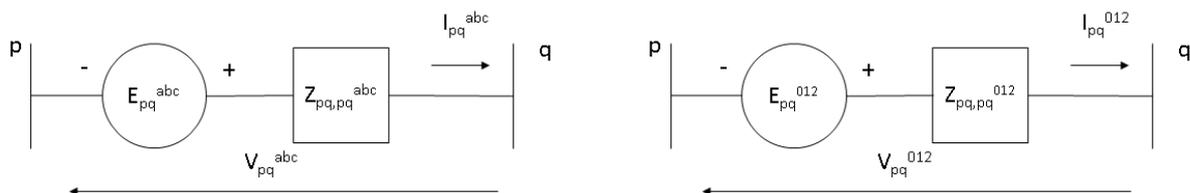


Figura 35 Representação de um Elemento Genérico por Impedância

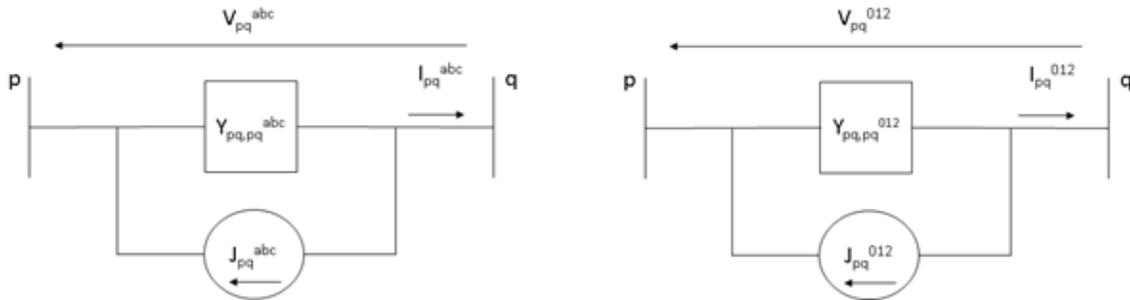


Figura 36 Representação de um Elemento Genérico por Admitância

Considerando a abordagem por coordenadas de fase, estes modelos podem ser representados pelas equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4), sendo as equações (4.1) e (4.3) representações matriciais feitas de forma compacta.

$$V_{pq}^{abc} + E_{pq}^{abc} = Z_{pq,pq}^{abc} \cdot I_{pq}^{abc} \quad (4.1)$$

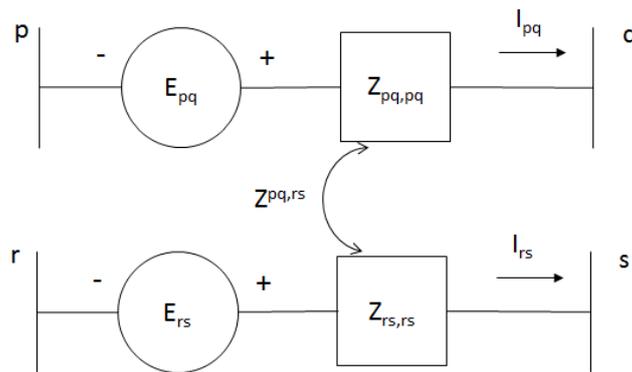
$$\begin{bmatrix} V_{pq}^a \\ V_{pq}^b \\ V_{pq}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{pq}^a \\ E_{pq}^b \\ E_{pq}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pq}^{aa} & Z_{pq}^{ab} & Z_{pq}^{ac} \\ Z_{pq}^{ba} & Z_{pq}^{bb} & Z_{pq}^{bc} \\ Z_{pq}^{ca} & Z_{pq}^{cb} & Z_{pq}^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pq}^a \\ I_{pq}^b \\ I_{pq}^c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$I_{pq}^{abc} + J_{pq}^{abc} = Y_{pq,pq}^{abc} \cdot V_{pq}^{abc} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} I_{pq}^a \\ I_{pq}^b \\ I_{pq}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{pq}^a \\ J_{pq}^b \\ J_{pq}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pq}^{aa} & Y_{pq}^{ab} & Y_{pq}^{ac} \\ Y_{pq}^{ba} & Y_{pq}^{bb} & Y_{pq}^{bc} \\ Y_{pq}^{ca} & Y_{pq}^{cb} & Y_{pq}^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{pq}^a \\ V_{pq}^b \\ V_{pq}^c \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Um detalhe importante que deve ser ressaltado é que cada uma dessas equações representa na realidade três, já que estes são normalmente sistemas trifásicos.

O índice “ $pq$ ” indica que este representa um único elemento conectado entre os nós  $p$  e  $q$ . Caso haja mais de um elemento, é acrescida uma equação para cada elemento inserido no sistema. Na Figura 37 será apresentado um exemplo, utilizando a formulação por impedância, quando considerados dois elementos e a mútua entre eles.



**Figura 37 Elementos Genéricos com Mútua**

O sistema exemplificado na Figura 37 pode ser representada pelas equações (4.5), (4.6).

$$V_{pq}^{abc} + E_{pq}^{abc} = Z_{pq,pq}^{abc} \cdot I_{pq}^{abc} + Z_{pq,rs}^{abc} \cdot I_{rs}^{abc} \quad (4.5)$$

$$V_{rs}^{abc} + E_{rs}^{abc} = Z_{rs,rs}^{abc} \cdot I_{rs}^{abc} + Z_{rs,pq}^{abc} \cdot I_{pq}^{abc} \quad (4.6)$$

Portanto generalizando, para um sistema com  $n$  elementos, temos as formulações apresentadas em (4.7) e (4.8).

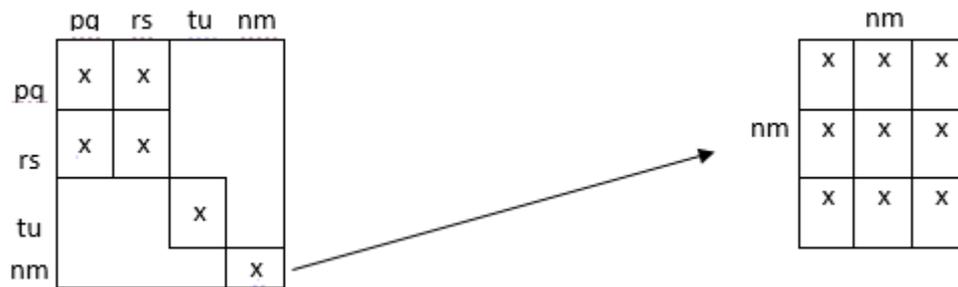
$$\begin{bmatrix} V_{pq}^{abc} \\ V_{rs}^{abc} \\ V_{tu}^{abc} \\ \vdots \\ V_{nm}^{abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{pq}^{abc} \\ E_{rs}^{abc} \\ E_{tu}^{abc} \\ \vdots \\ E_{nm}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pq,pq} & Z_{pq,rs} & Z_{pq,tu} & \dots & Z_{pq,nm} \\ Z_{rs,pq} & Z_{rs,rs} & Z_{rs,tu} & \dots & Z_{rs,nm} \\ Z_{tu,pq} & Z_{tu,rs} & Z_{tu,tu} & \dots & Z_{tu,nm} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{nm,pq} & Z_{nm,rs} & Z_{nm,tu} & \dots & Z_{nm,nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pq}^{abc} \\ I_{rs}^{abc} \\ I_{tu}^{abc} \\ \vdots \\ I_{nm}^{abc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$V^{abc} + E^{abc} = Z^{abc} \cdot I^{abc} \quad (4.8)$$

A matriz  $Z^{abc}$  é chamada de matriz impedância primitiva, ou  $Z_{\text{prim}}$ . A matriz admitância primitiva ( $Y_{\text{prim}}$ ) pode ser expressa como apresentado na equação (4.10):

$$Y_{prim} = Z_{prim}^{-1} \quad (4.9)$$

Como em um SEP não são todos os componentes que possuem impedâncias mútuas, na realidade costumam ser poucos os componentes que a possuem, então a matriz  $Z_{prim}$  é predominantemente diagonal. Lembra-se apenas que cada bloco de cada elemento, é de forma geral um bloco de matriz 3x3, representando o elemento trifásico. Um exemplo típico de estrutura de matriz impedância está representado na Figura 38.



**Figura 38 Exemplo Típico - Matriz Impedância**

Uma dica válida, para efeitos de implementação computacional e de alguns processos matemáticos de solução de sistemas, é colocar os componentes que possuem mútuas entre si próximos na estrutura matricial completa, para que por exemplo, se possa inverter mais facilmente a matriz através dos “Blocos de Jordan” que englobam as impedâncias próprias e mútuas.

De modo análogo, é possível trabalhar com o SEP utilizando componentes simétricas. As equações e as matrizes se mantêm de forma similar ao que foi mostrado anteriormente, como é apresentado na equação (4.10).

$$V^{012} + E^{012} = Z^{012} \cdot I^{012} \quad (4.10)$$

Uma característica interessante, é que ao se trabalhar com componentes simétricas o bloco 3x3 de cada componente pode ser, dependendo das características dos equipamentos, uma

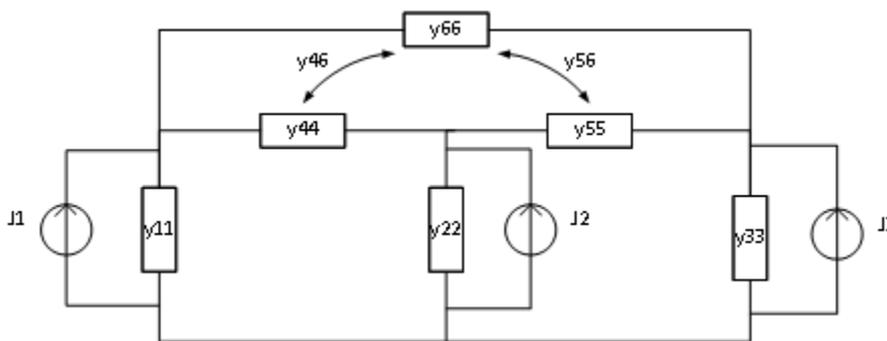
matriz diagonal com os elementos de cada componente em sua diagonal, como é apresentado na Figura 39. Esta questão pode ser explorada nas metodologias e cálculos computacionais. Porém, salienta-se que para várias situações de equipamentos, especialmente para os desequilibrados, esta situação da ausência dos elementos fora da diagonal (intersequências), não ocorre, ou seja, há acoplamento entre as sequências, e a matriz de representação por componentes simétricas se torna cheia. Se este acoplamento existir perde-se a principal vantagem da modelagem por componentes simétricas que é a possibilidade de desacoplar as sequências e trabalhar com cada uma praticamente individualmente.

	nm		
	x	0	0
nm	0	x	0
	0	0	x

**Figura 39 Matriz Impedância do Elemento - Componente de Sequência**

## 4.2 Topologia das Redes

Utilizando a matriz impedância primitiva, ou ainda a partir dela obtendo a matriz Yprimitiva, é possível representar um SEP completo, considerando a conexão de seus componentes. Para efeito de exemplificação considere representar o sistema da Figura 40:



**Figura 40 Circuito Exemplo**

A representação desse sistema pode ser feita pelas equações (4.11) e (4.12).

$$I + J = Y.V \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{44} & 0 & y_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_{55} & y_{56} \\ 0 & 0 & 0 & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

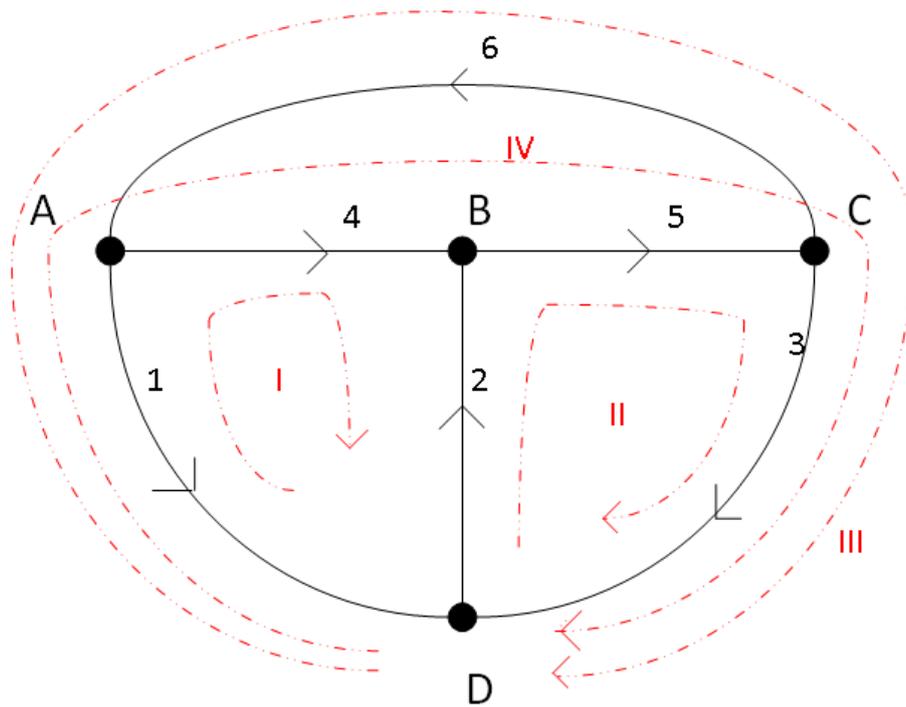
Em que a matriz  $Y$  é a  $Y_{primitiva}$ , portanto as correntes calculadas  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  e  $I_6$  são sobre cada um dos elementos e as tensões indicadas, são sobre cada um dos elementos ou mútuas entre eles.

### 4.3 Grafo Orientado

Algumas técnicas de montagem de matrizes de representação dos sistemas precisam de definições de “polaridades” das conexões ou definições de sentidos de correntes, para que se possa montar adequadamente as matrizes dos modelos, evitando enganos. Algumas metodologias utilizam então inicialmente a montagem de grafos, e esta abordagem será descrita resumidamente nesta seção.

Grafo orientado é um conjunto de segmentos (elos) e pontos (vértices) interconectados de maneira tal que os elos são conectados exclusivamente aos vértices. Na representação de circuitos através de grafos, cada elemento do circuito representa um segmento e cada ponto de conexão representa um vértice ou nó.

Para efeitos de exemplificação, na Figura 41 será apresentada uma das formas de se montar um grafo orientado, do circuito apresentado anteriormente.



**Figura 41 Grafo Orientado - Circuito Exemplo**

A orientação inicial do Grafo é arbitrária, mas uma vez escolhida, não se pode alterá-la em hipótese alguma.

Nas próximas seções serão descritas duas matrizes que podem ser definidas a partir de montagens de grafos e são utilizadas em algumas metodologias de modelagens descritas adiante na formulação das equações da rede.

### 4.3.1 Matrizes de um Grafo Orientado

#### 4.3.1.1 Matriz Incidência:

Define-se de forma compacta a matriz incidência **A** pela equação (4.13).

$$A = [a_{ij}] \tag{4.13}$$

Cada elemento  $a_{ij}$  da matriz **A** pode apenas ser igual a 1, -1 ou 0. Este número é definido da seguinte forma:

- “1” se o elo  $i$  estiver conectado ao nó  $j$  saindo do nó.
- “-1” se o elo  $i$  estiver conectado ao nó  $j$  entrando do nó.
- “0” se o elo  $i$  não estiver conectado ao nó  $j$ .

Portanto, a matriz  $\mathbf{A}$  para o circuito exemplo, apresentado anteriormente, será representado pela Figura 42:

		1	2	3	4	5	6
$\mathbf{A} =$		1	0	0	1	0	-1
	B	0	-1	0	-1	1	0
	C	0	0	1	0	-1	1
	D	-1	1	-1	0	0	0

**Figura 42** Matriz Incidência - Caso exemplo

**Teorema:** A matriz incidência de um grafo possui  $V-1$  linhas L.I., onde  $V$  é o número de vértices.

Dado o teorema, é possível afirmar é necessário remover uma linha da matriz do exemplo anterior. A escolha da linha que deve ser eliminada é particular, mas convencionalmente escolhe-se a linha D – terra – como referência) e a elimina-se. A linha D é combinação linear das outras três.

Deste modo, define-se a ordem de uma matriz denominada incidência reduzida como  $\mathbf{A}_{(V-1 \times E)}$ , onde  $V$  é o número de vértices e  $E$  é o número de elos. A sua montagem é feita do mesmo modo da matriz incidência normal, mas escolhe-se qualquer linha como referência para eliminá-la.

#### 4.3.1.2 Matriz Circuito:

Define-se de forma compacta a matriz circuito  $\mathbf{B}$  pela equação (4.14):

$$B = [b_{ij}] \quad (4.14)$$

Cada elemento  $b_{ij}$  da matriz  $B$  pode apenas ser igual a 1, -1 ou 0. Este número é definido da seguinte forma:

- “1” se o elo  $i$  pertence ao circuito  $j$  orientado no mesmo sentido.
- “-1” se o elo  $i$  pertence ao circuito  $j$  orientado no sentido contrário.
- “0” Se o elo  $i$  não pertence ao circuito  $j$ .

Lembrando que um circuito é um caminho fechado. Portanto, a matriz  $B$  para o sistema apresentado anteriormente está representada na figura a seguir:

	1	2	3	4	5	6
I	-1	-1	0	1	0	0
II	0	1	1	0	1	0
III	-1	0	1	0	0	-1
IV	-1	0	1	1	1	0
V	-1	-1	0	0	-1	-1

**Figura 43 Matriz Circuito - Estudo de Caso**

**Teorema:** A matriz incidência de um grafo possui  $E - V + 1$  linhas L.I., onde  $E$  é o número de elos e  $V$  é o número de vértices.

Dado o teorema, é possível afirmar que é necessário apenas representar os circuitos básicos do sistema. No exemplo anterior então seriam necessários apenas 3 circuitos ( $6 - 4 + 1$ ).

Deste modo, define-se a matriz circuito reduzido  $B_{(E-V+1 \times E)}$ , onde  $V$  é o número de vértices e  $E$  é o número de elos.

#### 4.4 Formulação das Equações das Redes

Existem para a representação dos sistemas elétricos algumas possibilidades a partir da formulação de equações que representam o comportamento das redes elétricas, que serão descritas nesta seção. Elas se definem basicamente pela aplicação das leis de Kirchhoff.

Explicitando as leis de Kirchhoff:

$$\begin{cases} \text{Malhas} \rightarrow \sum V_i = 0 & , V_i \rightarrow \text{tensões do circuito} \\ \text{Nós} \rightarrow \sum I_i = 0 & , I_i \rightarrow \text{correntes do vértice} \end{cases}$$

#### 4.4.1 Equações Nodais

As equações nodais do sistema apresentadas anteriormente podem ser representadas por (4.15):

$$I + J = Y_{prim} \cdot V \quad (4.15)$$

Lembrando que nesta equação I são as correntes sobre os elementos, J são as correntes injetadas por eles, e V são as tensões sobre os elementos.

Pré-multiplicando todos os termos pela matriz incidência reduzida, chega-se à (4.16):

$$A \cdot I_0 + A \cdot J = A \cdot Y_{prim} \cdot V \quad (4.16)$$

Pela Lei de Kirchhoff, a soma das correntes que entram em um nó, é igual a zero. Por isso,  $A \cdot I_0 = 0$ .

Considerando (4.17), (4.18). Pode-se verificar a equação (4.19).

$$A \cdot J = I_{barra} \rightarrow \text{correntes injetadas nos nós} \quad (4.17)$$

$$A^T \cdot V_{barra} = V \quad (4.18)$$

Onde  $V_{barra i}$  é a tensão entre a barra  $i$  e a referência.

$$I_{barra} = \underbrace{A \cdot Y_{prim} \cdot A^T}_{\text{matriz de admitância nodal}} \cdot V_{barra} \quad (4.19)$$

De onde define-se a  $Y_{barra}$  por (4.20).

$$Y_{barra} = A \cdot Y_{prim} \cdot A^T \quad (4.20)$$

Logo tem-se (4.21), (4.22) e (4.23):

$$\boxed{I_{barra} = Y_{barra} \cdot V_{barra}} \quad (4.21)$$

$$V_{barra} = Y_{barra}^{-1} \cdot I_{barra} \quad (4.22)$$

$$\boxed{V_{barra} = Z_{barra} \cdot I_{barra}} \quad (4.23)$$

Veja que a  $Y_{barra}$  guarda relação com a  $Y_{prim}$ , mas não são as mesmas matrizes, sendo necessários cuidados nas modelagens para não confundi-las.

E ainda, definiu-se também a matriz  $Z_{barra}$ , como o inverso da  $Y_{barra}$ , a qual também pode ser utilizada em modelagens.

#### 4.4.2 Equações Circuitos

Já equações de circuitos do sistema apresentado anteriormente podem ser representadas pela equação (4.24).

$$V + E = Z_{prim} \cdot I \quad (4.24)$$

Lembrando que nesta equação  $V$  representa a tensão sobre o elemento,  $E$  representa a fonte de tensão do elemento e  $I$  são as correntes sobre os elementos.

Pré-multiplicando pela matriz circuito chega-se à (4.25):

$$B \cdot V_0 + B \cdot E = B \cdot Z_{prim} \cdot I \quad (4.25)$$

Considerando (4.26), (4.27). Pode-se verificar a equação (4.28).

$$B \cdot E = E_{laço} \rightarrow \text{fontes presentes no mesmo laço} \quad (4.26)$$

$$B^T \cdot I_{laço} = I \quad (4.27)$$

$$E_{laço} = \underbrace{B \cdot Z_{prim} \cdot B^T}_{Z_{laço}} \cdot I_{laço} \quad (4.28)$$

Define-se a  $Z_{laço}$  por (4.20).

$$Z_{laço} = B \cdot Z_{prim} \cdot B^T \quad (4.29)$$

Logo tem-se (4.30), (4.31) e (4.32):

$$\boxed{E_{laço} = Z_{laço} \cdot I_{laço}} \quad (4.30)$$

$$I_{laço} = Z_{laço}^{-1} \cdot E_{laço} \quad (4.31)$$

$$\boxed{I_{laço} = Y_{laço} \cdot E_{laço}} \quad (4.32)$$

Veja que a  $Z_{laço}$  guarda relação com a  $Z_{prim}$ , mas não são as mesmas matrizes, sendo necessários cuidados nas modelagens para não confundi-las.

E ainda, definiu-se também a matriz  $Y_{laço}$  como o inverso da  $Z_{laço}$ , a qual também pode ser utilizada em modelagens.

#### 4.4.3 Algumas Considerações Importantes:

- A formulação de nós é a mais largamente utilizada pois resulta diretamente na obtenção das tensões nos nós do sistema;

- $Z_{\text{laço}}^{-1} \neq Y_{\text{barra}}$ ;
- $Y_{\text{barra}}^{-1} \neq Z_{\text{laço}}$ ;
- A matriz  $Y_{\text{barra}}$  é mais esparsa do que a  $Z_{\text{laço}}$ ;
- O algoritmo de montagem da matriz  $Y_{\text{barra}}$  é mais simples quando comparada à montagem da  $Z_{\text{laço}}$ .

Devido a estes fatores, grande parte das metodologias e ferramentas computacionais existentes utiliza em sua formulação de equações e no processo de solução a formulação de nós, e ainda, utilizando a matriz  $Y_{\text{barra}}$ . Por isto, na próxima seção será dada especial atenção a montagem desta matriz, por meio de um algoritmo direto que é largamente utilizado e indicado na literatura.

#### 4.5 Algoritmo para Montagem da $Y_{\text{BARRA}}$

A matriz  $Y_{\text{barra}}$  é uma matriz que possui elementos complexos, já que envolve as impedâncias do sistema. Esta possui a dimensão  $N \times N$ , onde  $N$  é o número de barras do SEP. Normalmente a mesma é esparsa. Outra característica importante, é que esta é uma matriz simétrica, exceto em situações particulares de alguns equipamentos, por exemplo quando há transformadores defasadores no sistema.

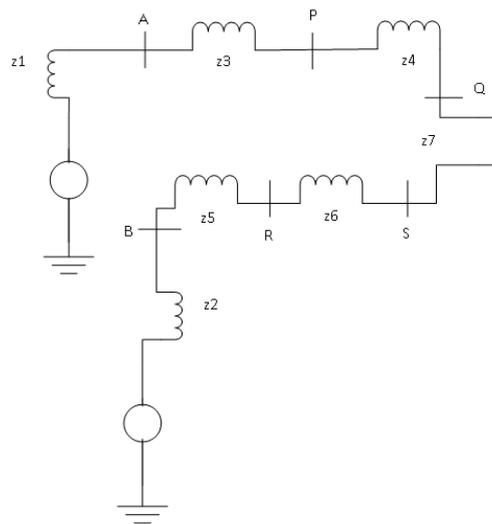
O algoritmo para o cálculo dessa matriz está apresentado a seguir, no caso de sua definição para abordagem por componentes simétricas o algoritmo deve ser repetido para cada sequência (positiva, negativa, zero):

- 1) Desenhar o diagrama de reatância em “pu” para estudo de curto-circuito.
- 2) Desenhar o Grafo Orientado.
- 3) Montar a  $Z_{\text{prim}}$ .
- 4) Cálculo da  $Y_{\text{prim}}$  ( $Y_{\text{prim}} = Z_{\text{prim}}^{-1}$ ).

5) Montar a matriz incidência **A**.

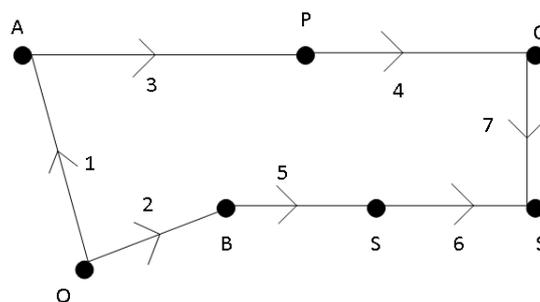
6) Cálculo da  $Y_{\text{barra}}$  ( $Y_{\text{barra}} = A \cdot Y_{\text{prim}} \cdot A^T$ ).

A seguir será apresentado o passo a passo para a montagem da matriz  $Y_{\text{barra}}$  da sequência positiva, considerando o circuito da Figura 44.



**Figura 44 Circuito Exemplo - Montagem da Matriz Ybarra**

A montagem do grafo orientado pode ser representada pela Figura 45 e a matriz incidência reduzida pela Figura 46.



**Figura 45 Grafo Orientado - Circuito Exemplo**

	1	2	3	4	5	6	7
A	-1	0	1	0	0	0	0
P	0	0	-1	1	0	0	0
Q	0	0	0	-1	0	0	1
S	0	0	0	0	0	-1	-1
K	0	0	0	0	-1	1	0
B	0	-1	0	0	1	0	0

**Figura 46 Matriz Incidência Reduzida - Circuito Exemplo**

É importante lembrar que a ordenação da matriz A é aleatória. Porém, uma vez escolhida essa ordenação, a mesma deve ser seguida na montagem da  $Z_{\text{prim}}$ .

A matriz  $Z_{\text{prim}}$  está representada na Figura 47.

	1	2	3	4	5	6	7
1	z1	0	0	0	0	0	0
2	0	z2	0	0	0	0	0
3	0	0	z3	0	0	0	0
4	0	0	0	z4	0	0	0
5	0	0	0	0	z5	0	0
6	0	0	0	0	0	z6	0
7	0	0	0	0	0	0	z7

**Figura 47 Matriz  $Z_{\text{prim}}$  - Circuito Exemplo**

Como dito anteriormente  $Y_{\text{prim}}$  é dado pela equação (4.9) e pode ser apresentado pela Figura 48.

	1	2	3	4	5	6	7
1	y1	0	0	0	0	0	0
2	0	y2	0	0	0	0	0
3	0	0	y3	0	0	0	0
4	0	0	0	y4	0	0	0
5	0	0	0	0	y5	0	0
6	0	0	0	0	0	y6	0
7	0	0	0	0	0	0	y7

**Figura 48 Matriz  $Y_{\text{primitiva}}$  - Circuito Exemplo**

De acordo com a equação (4.20), pode-se chegar a seguinte  $Y_{\text{barra}}$ , como mostra a Figura 49.

	A	P	Q	S	R	B
A	$y_1+y_3$	$-y_3$	0	0	0	0
P	$-y_3$	$y_3+y_4$	$-y_4$	0	0	0
Q	0	$-y_4$	$y_4+y_7$	$-y_7$	0	0
S	0	0	$-y_7$	$y_6+y_7$	$-y_6$	0
R	0	0	0	$-y_6$	$y_5+y_6$	$-y_5$
B	0	0	0	0	$-y_5$	$y_5+y_6$

Figura 49 Matriz Ybarra - Circuito Exemplo

#### 4.5.1 Algoritmo para Montagem da $Y_{barra}$ em um Sistema Sem Mútuas:

Para sistemas sem mútuas verificou-se que há uma lei de formação simples que pode levar a uma definição mais direta da matriz  $Y_{barra}$ , que é a seguinte:

O elemento  $Y_{ii}$  da diagonal da matriz é a soma das admitâncias ligadas no nó  $i$  enquanto  $Y_{ij}$  é o negativo da soma das admitâncias presentes entre os nós  $i$  e  $j$ . A formulação matemática fica sendo simplesmente a aplicação da equação (4.33):

$$Y_{barra} = \begin{cases} Y_{ii} = \sum_{j=1}^N y_{ij} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases} \quad (4.33)$$

#### 4.6 Cálculo da $Y_{barra}$ em um Sistema Com Mútuas:

Neste caso, para o cálculo da matriz indica-se seguir os passos para o cálculo tradicional (utilizando a matriz A). Neste caso, as mútuas devem ser acrescentadas na matriz  $Z_{prim}$  enquanto a matriz A se mantém intacta.

#### 4.7 Observações Sobre a Matriz $Y_{barra}$

Algumas observações importantes serão descritas a seguir.

- A matriz é esparsa

- Possui dimensão  $N-1 \times N-1$ , pois um nó é considerado a referência para a solução.
- Como os geradores e motores estão ligados entre uma barra qualquer do sistema e a barra de referência, suas indutâncias apenas influenciam nos termos das diagonais da matriz.

#### 4.8 Significado das Matrizes $Y_{\text{BARRA}}$ e $Z_{\text{BARRA}}$ no Curto-Circuito

Além da importância dessas duas matrizes para o cálculo de fluxo de potência do sistema, elas são importantes no cálculo de curto-circuito. Isso ocorre devido o significado das matrizes.

Na matriz  $Y_{\text{barra}}$  tem-se os seguintes significados (4.34) e (4.35).

$$Y_{jj} = \frac{I_j}{V_j} \rightarrow \text{admitância própria de curto - circuito} \quad (4.34)$$

$$Y_{ij} = \frac{I_i}{V_j} \rightarrow \text{admitância de transfrência} \quad (4.35)$$

Na matriz  $Z_{\text{barra}}$  chega-se aos seguintes significados (4.36) e (4.37).

$$Z_{ii} = \frac{I_i}{V_i} \rightarrow \text{impedância própria de curto - circuito} \quad (4.36)$$

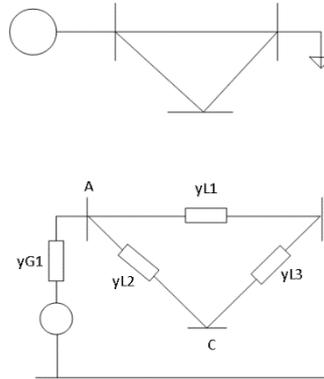
$$Z_{ij} = \frac{I_i}{V_j} \rightarrow \text{impedância de transfrência} \quad (4.37)$$

#### 4.9 Exemplos

A seguir serão apresentados dois circuitos em determinadas situações para exemplificação de questões associadas a montagem de matrizes.

**Exemplo 1:**

Para começar, considere o circuito da Figura 50.



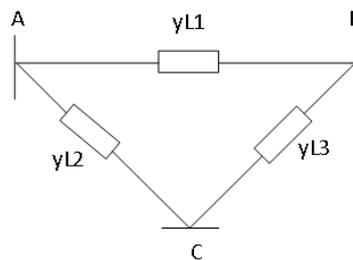
**Figura 50 Circuito - Exemplo 1**

A matriz  $Y_{\text{barra}}$  do sistema para sequência positiva é dada pela equação (4.38). Pode-se montar a mesma pelo algoritmo apresentado em 4.5.1:

$$Y_{\text{barra}} = \begin{bmatrix} y_{G1} + y_{L1} + y_{L2} & -y_{L1} & -y_{L2} \\ -y_{L1} & y_{L1} + y_{L3} & -y_{L3} \\ -y_{L2} & -y_{L3} & y_{L2} + y_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Para encontrar  $Z_{\text{barra}}$  basta inverter  $Y_{\text{barra}}$ .

- Se considerar que o gerador é perdido, o sistema ficará conforme a Figura 51.



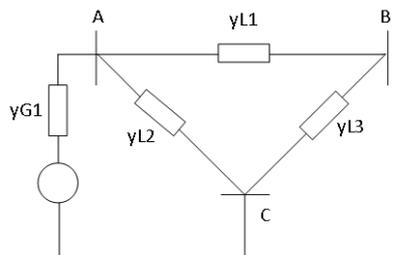
**Figura 51 Circuito sem Gerador - Exemplo 1**

Neste caso a  $Y_{\text{barra}}$  será (4.39):

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} y_{L1} + y_{L2} & -y_{L1} & -y_{L2} \\ -y_{L1} & y_{L1} + y_{L3} & -y_{L3} \\ -y_{L2} & -y_{L3} & y_{L2} + y_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Assim, a matriz  $Z_{barra}$  não pode ser calculada, pois a determinante  $Y_{barra}$  é zero. Isso acontece pois a barra de referência anterior não faz mais parte do sistema. Teria então de escolher outra barra de referência.

- Se houver um curto entre a barra C e a referência, o circuito pode ser representado pela Figura 52.



**Figura 52 Circuito sem Gerador - Curto entre a Fase "C" e a Referência**

Neste caso, a barra C é perdida. Assim, esta barra fica sendo a referência, diminuindo a dimensão da matriz  $Y_{barra}$ . Elimina-se a linha e coluna referente à barra C, ficando a com (4.40).

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} y_{G1} + y_{L1} + y_{L2} & -y_{L1} \\ -y_{L1} & y_{L1} + y_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

- Se houver um curto entre as barras A e B, o sistema ficará conforme a Figura 53:

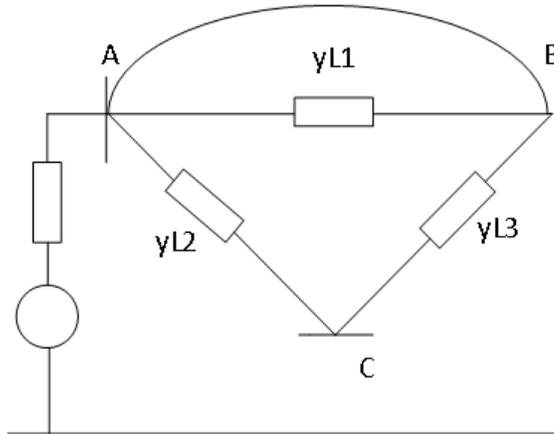


Figura 53 Curto-circuito entre as fases 'A' e 'B'

As duas barras se juntam, diminuindo a dimensão da matriz  $Y_{barra}$ . Resultando assim na soma das linhas e colunas das duas barras, conforme (4.41).

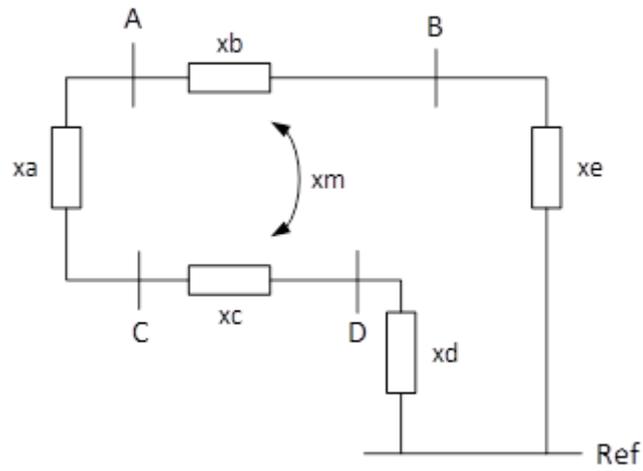
$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} y_{G1} + y_{L2} + y_{L3} & -y_{L2} - y_{L3} \\ -y_{L2} - y_{L3} & y_{L2} + y_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

- Se for retirado um elemento do sistema:

Neste caso teria apenas que refazer a matriz  $Y_{barra}$  eliminando o elemento que foi removido.

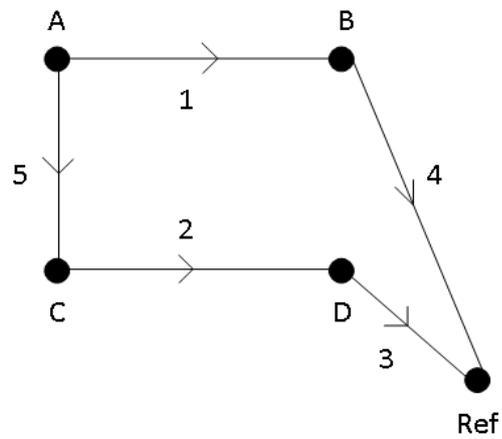
### Exemplo 2:

Será realizada a montagem da matriz  $Y_{barra}$  da sequência zero, pois apenas nela que devem ser considerados os efeitos das impedâncias mútuas. Para isso considera-se o circuito da Figura 54.



**Figura 54 Circuito – Exemplo 2**

Para a montagem do Grafo não se representa a impedância mútua conforme a Figura 55. Em seguida, encontra-se  $Y_{prim}$  como mostra (4.42) e (4.43).



**Figura 55 Grafo Orientado - Exemplo 2**

$$X_{prim} = \begin{bmatrix} x_b & x_m & & & & & \\ x_m & x_c & & & & & \\ & & x_d & & & & \\ & & & x_e & & & \\ & & & & x_a & & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$Y_{prim} = \begin{bmatrix} y_b & y_m & & & \\ y_m & y_c & & & \\ & & \frac{1}{x_d} & & \\ & & & \frac{1}{x_e} & \\ & & & & \frac{1}{x_a} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} y_b & y_m \\ y_m & y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b & x_m \\ x_m & x_c \end{bmatrix}^{-1}$$

Atenção: Inverte-se o bloco e não cada elemento.

A matriz incidência será dada pela Figura 56.

	1	2	3	4	5
A	1	0	0	0	1
B	-1	0	0	1	0
C	0	1	0	0	-1
D	0	-1	1	0	0

**Figura 56 Matriz Incidência - Exemplo 2**

Conforme a equação (4.44) pode-se encontrar a matriz  $Y_{barra}$  como apresentado em (4.45):

$$Y_{barra} = A \cdot Y_{prim} \cdot A^T \quad (4.44)$$

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} y_b + \frac{1}{x_a} & -y_b & y_m - \frac{1}{x_a} & -y_m \\ -y_b & y_b + \frac{1}{x_e} & -y_m & -y_m \\ y_m - \frac{1}{x_a} & -y_m & y_c + 1/x_a & -y_c \\ -y_m & y_m & -y_c & y_c + \frac{1}{x_d} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Isso nos leva a afirmar que as mútuas estariam dispostas conforme a Figura 57.

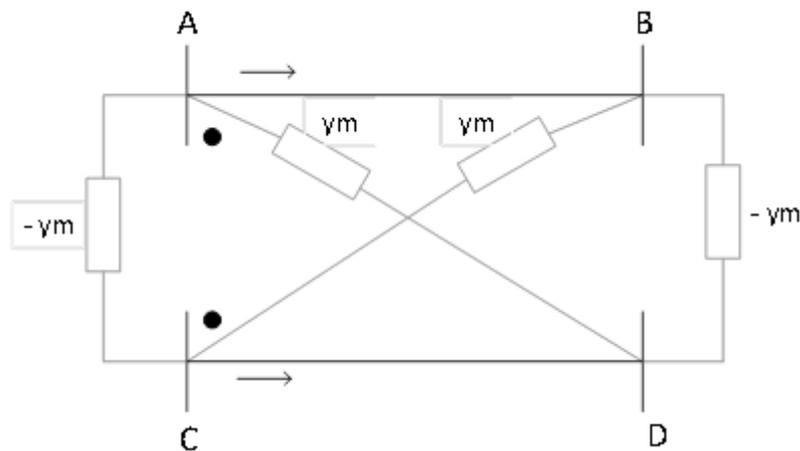


Figura 57 Disposição das Mútuas - Exemplo 2

Pode-se afirmar que é preciso apenas observar as linhas que possuem mútuas. As marcas (pontos) próximas aos nós são incluídas de acordo com o sentido do grafo (sentido das setas do grafo).

**Método para incluir as mútuas na matriz  $Y_{barra}$ :**

Uma definição de formação é a seguinte: em terminais igualmente marcados inclui-se as admitâncias com sinal negativo, em terminais com marcas diferentes inclui-se admitâncias com sinal positivo.

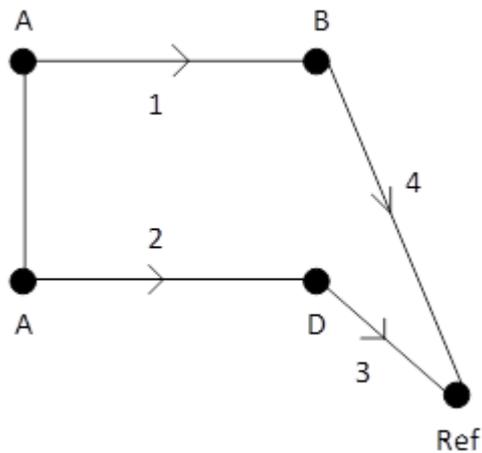
$$Y_{\text{barra com mútuas}} = \begin{cases} Y_{AA} = Y_{AA}^{\text{sem mútuas}} + 0 \\ Y_{AC} = Y_{AC}^{\text{sem mútuas}} + y_m \end{cases}$$

Observação:

$$y_m \neq \frac{1}{x_m}$$

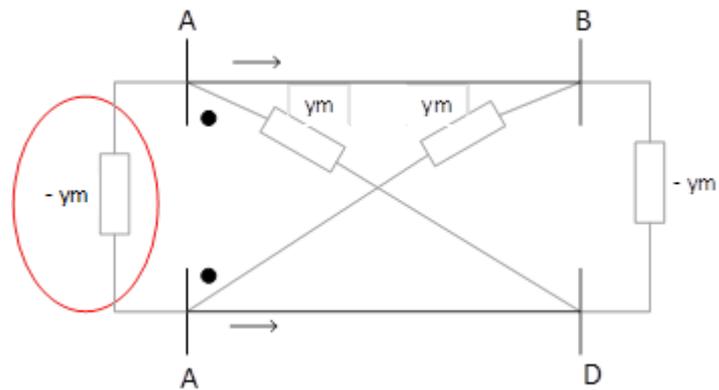
$$\begin{bmatrix} y_b & y_m \\ y_m & y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b & x_m \\ x_m & x_c \end{bmatrix}^{-1}$$

- Se no sistema fosse desconsiderado o nó "C", o mesmo seria modificado para Figura 58:



**Figura 58 Exemplo 2 – Desconsiderando o nó 'C'**

Neste caso, as mútuas estariam apresentadas conforme Figura 59:

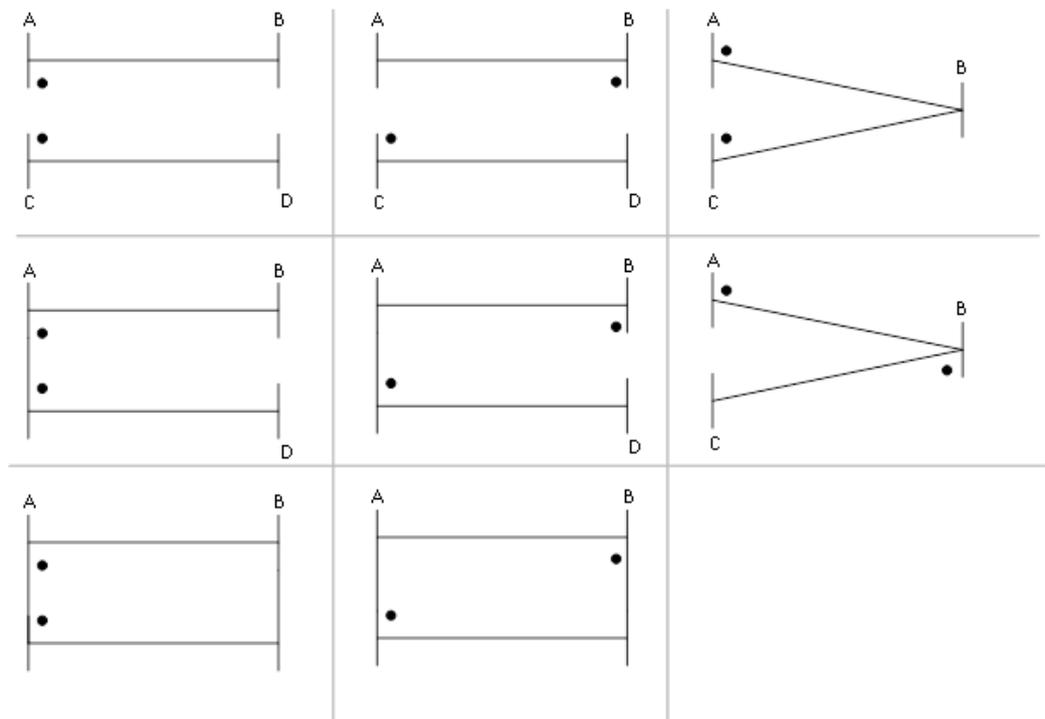


**Figura 59 Disposição das Mútuas - Exemplo 2 Modificado**

Como A é uma única barra, a admitância marcada não existirá. Os termos da matriz  $Y_{\text{barra}}$  modificados serão:

$$\begin{cases} Y_{AA} = Y_{AA}^{sm} + 2 \cdot y_m \\ Y_{AB} = Y_{AB}^{sm} - (+y_m) \\ Y_{AD} = Y_{AD}^{sm} - (+y_m) \\ Y_{BD} = Y_{BD}^{sm} - (-y_m) \end{cases}$$

- Algumas configurações possíveis das mútuas como apresentado na Figura 60.



**Figura 60 Configurações das Mútuas**

Observação 1: Computacionalmente, pode ser preferível realizar  $Y_{barra} = A \cdot Y_{prim} \cdot A^T$ .

Observação 2: Normalmente considera-se as mútuas apenas na sequência zero, pois suas influências nas sequências positiva e negativa são mínimas.

#### **4.10 Implementação**

Parte da modelagem matricial de equipamentos por componentes de sequência e de fases apresentada neste capítulo também foi implementada gerando rotinas de auxílio para modelagens. Basicamente a ideia da implementação realizada é entrar com os dados que se possui de um equipamento (em coordenadas de fase ou componentes simétricas), montar a matriz de representação correspondente e passar desta formulação matricial para outras possíveis, conforme indicado neste capítulo.

## Capítulo 5

### CONCLUSÕES

#### 5.1 Conclusões Gerais

Neste trabalho estudou-se em detalhes duas abordagens diferenciadas em termos de modelagens para análise de falhas em regime permanente, uma utilizando coordenadas simétricas e outra por coordenadas de fase. Durante as discussões e estudos aprendeu-se as principais diferenças entre as metodologias, tanto em termos de implementação quanto em termos de aplicações, considerando as possíveis simplificações de cada uma e conseqüentemente suas limitações, vantagens e desvantagens.

As teorias das duas metodologias estudadas foram concentradas neste documento que se espera servir como material didático para outros alunos, para que os mesmos não precisem buscar várias fontes separadas para seus estudos.

A aplicação de modelagem matricial de equipamentos por componentes de sequência e de fases também foi documentada neste texto e parte desta abordagem foi implementada gerando rotinas de auxílio para modelagens. Estas rotinas facilitaram testes de modelos de equipamentos, evitando-se cálculos manuais.

#### 5.2 Considerações Finais

Neste capítulo final cabe informar que este trabalho é parte das atividades de um projeto de iniciação científica financiado pela FAPEMIG, pelo edital Universal 2012, em um projeto intitulado “Nova metodologia para análise de defeitos em sistemas multifásicos considerando aspectos de *smart-grids*”, do qual a autora deste trabalho é bolsista.

No projeto, além do que está apresentado neste documento, foram realizadas outras atividades pela autora, porém realizados em conjunto com outros bolsistas de graduação e um mestrando, o que inclusive resultou em um artigo de congresso intitulado “Análise dos Impactos de Simplificações nos Estudos de Falhas em Sistemas Elétricos Desequilibrados” a ser apresentado no INDUSCON 2014 (ARAÚJO et al., 2014) o qual está anexo no Apêndice.

Cabe também indicar, que os estudos de casos realizados neste trabalho de conclusão de curso, para efeito de aprendizado de análise de falhas em sistemas práticos, foram feitos sobre resultados de simulações oriundas de implementações de outros, ou seja, não implementou-se neste trabalho um programa de análise de falhas. Especificamente neste trabalho foram implementadas rotinas de auxílio de modelagem de equipamentos, em componentes simétricas e de fase, baseadas no que foi apresentado no capítulo sobre representação matricial de equipamentos. Os estudos de caso estão então no artigo em anexo.

---

**REFERÊNCIAS**

- STEVENSON JR., W. D., “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”, tradução e revisão técnica Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansuaj. – 2ª. Edição – São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- KINDERMANN, G., “Curto-circuito”, Porto Alegre, Sagra: DC Luzzatto, 1992.
- ANDERSON, P. M., "Analysis of Faulted Power Systems", The Iowa State University Press, 1973.
- RIANI, L. M. “Análise de Defeitos em Coordenadas de Fase Utilizando Modelagem a Quatro Condutore e Fluxo de Potencia Continuado”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora MG, Brasil, 2008.
- PENIDO, D.R.R. “Uma metodologia para Análise de Sistemas Elétricos a N Condutores pelo Método de Injeção de Correntes”, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- FILHO, M.C. “Análise de falhas em sistemas elétricos de potência”, Trabalho Final de Curso, Universidade Federal de Juiz de For a MG, Brasil, 2012.
- FILHO, M. C. “Uma Metodologia para Análise de Falhas em Sistemas Elétricos Multifásicos”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora MG, Brasil, 2014.
- SAADAT,H. “Power system analysis” 2.ed.Boston: McGraw-Hill USA, 2002, 712p.
- ELGERD, O.I, “Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica McGraw-Hill, 1978.
- PINTO, D P. “Análise de sistema elétricos potência I.” 30 sep. 2013, 14 feb. 2014. Notas de Aula.
- ARAUJO et al. “Análise dos Impactos de Simplificações nos Estudos de Falhas em Sistemas Elétricos Desequilibrados” IEEE INDUSCON, a ser apresentado, 2014.

## APÊNDICE

### Artigo a ser apresentado no INDUSCON 2014

# Análise dos Impactos de Simplificações nos Estudos de Falhas em Sistemas Elétricos Desequilibrados

Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo  
Leandro Ramos de Araujo  
Departamento de Energia Elétrica  
Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora, Brasil  
debora.rosana@ufjf.edu.br

Luciana Carvalho Acácio  
Tatiana Tostes de Oliveira  
Renan do Espírito Santo Beneteli  
Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora, Brasil

Márcio de Carvalho Filho

**Resumo** — Este artigo apresenta uma ferramenta de análise de falhas, onde os modelos de equipamentos do sistema elétrico são representados genericamente e capazes de representar desequilíbrios, cabos neutro e terra explicitamente, dentre outras características. São analisados três casos testes para verificar o impacto de diversos tipos de simplificações nos resultados de simulações de defeitos.

## I. INTRODUÇÃO

Grande parte das metodologias de análise de falhas em sistemas elétricos, em regime permanente, parte do princípio que os sistemas trifásicos podem ser considerados equilibrados e os equipamentos elétricos são modelados de forma bastante simplificada, como as metodologias que utilizam as componentes simétricas [1-4], por exemplo, que até consideram o equilíbrio intrínseco causado pelas falhas, através das redes de sequência, assim, a aplicação do método das componentes simétricas incorpora simplificações na análise e talvez não seja o mais adequado para diversos casos, por exemplo, a análise de falhas sérias e simultâneas em sistemas desequilibrados introduzem acoplamentos entre as redes de sequência, causando a perda da principal vantagem das componentes simétricas, semelhantemente o que ocorre com linhas monofásicas e bifásicas ou trifásicas que não sejam

perfeitamente transpostas, e com isto, criando acoplamento entre as redes de sequência. Tais simplificações podem ocasionar erros consideráveis nos resultados [4], [6].

Já há alguns anos, têm sido desenvolvidas metodologias de análise de falhas realizadas diretamente em coordenadas de fase, que, de maneira geral, apresentam modelos mais completos de equipamentos e das próprias condições de falha, e como consequência, levaram a melhores resultados nas simulações.

Entretanto, a maioria destas metodologias [9-11], ainda possuem várias limitações: não permitem representar explicitamente os cabos neutros e os aterramentos, não permitem simular sistemas malhados, não permitem representação de acoplamentos mútuos, dentre outras limitações.

Com relação à análise de falhas, vale destacar o problema da falta da representação dos cabos neutros e aterramentos. Estes dois fatores podem levar a resultados incorretos, especialmente em sistemas mais desequilibrados, por exemplo, os sistemas de distribuição, que apresentam comumente características que geram consideráveis desequilíbrios entre as fases: cargas distribuídas desequilibradas, assimetria nas linhas, circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos [6-7], podendo ocasionar em significativas correntes de retorno. Em

## Apêndice

diversos estudos as grandezas associadas a eles são de extrema importância seja no planejamento ou na operação, especialmente em estudos dos sistemas de proteção e de aterramento.

Este artigo apresenta uma metodologia para análise de falhas em regime permanente baseado no método de injeção de correntes em coordenadas de fase retangulares, que permita representar o sistema elétrico da maneira mais generalizada e realista possível, com especial aplicação para sistemas elétricos de distribuição, mas que possa ser empregada também para sistemas de transmissão, subtransmissão e industriais, inclusive de grande porte, e, além disto, a metodologia proposta deverá ser capaz de simular os diversos tipos de falhas em sistemas elétricos, inclusive aqueles que não são comuns em sistemas de transmissão, mas que são comuns em sistemas de distribuição, por exemplo, falhas simultâneas, contatos (curto circuitos) em cabos com níveis de tensão diferentes (média e baixa tensão) e contato com o neutro.

## II. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FALHAS

A metodologia para análise de falhas apresentada neste trabalho consiste basicamente na solução de um sistema de equações não-lineares conforme (1), sendo utilizado o método de Newton-Raphson para solução.

$$\mathbf{f}(\mathbf{z})=0 \quad (46)$$

Onde:  $\mathbf{z}$  são as variáveis de estado e  $\mathbf{f}$  são as equações de injeção de corrente nos nós do sistema e equações de controle quando existentes. As variáveis de estado podem ser as tensões nodais fase-terra em parcelas reais e imaginárias, as gerações ativa e reativa dos geradores e as demais variáveis de controle.

A rede e os equipamentos são modelados em coordenadas de fase e em grandezas elétricas (não são utilizados valores em p. u.).

### Algoritmo Proposto

- 1) Leitura dos dados e inicialização.
- 2) Cálculo das condições pré-falha.
- 3) Atualização dos dados de equipamentos e redes no caso de utilização de normatização específica.
- 4) Adaptação do sistemas elétrico para análise de falhas.
- 5) Configuração das impedâncias de falha.
- 6) Montar vetor independente  $\mathbf{f}(\mathbf{z}^h)$ .
- 7) Realizar teste de convergência  $|\mathbf{f}(\mathbf{z}^h)| < 10^{-1}$ . Se convergir ir para o passo 11, senão ir para o passo 8.
- 8) Montar matriz Jacobiana  $\mathbf{J}(\mathbf{z}^h)$ .
- 9) Calcular incrementos  $\Delta\mathbf{z} = -\mathbf{J}(\mathbf{z}^h)^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{z}^h)$ .
- 10) Atualizar variáveis de estado  $\mathbf{z}^{h+1} = \mathbf{z}^h + \Delta\mathbf{z}^h$ .
- 11) Finalizar processo e apresentar resultados.

Os modelos de equipamentos são semelhantes aos apresentados em [8]. A modelagem das condições de falhas ocorre através das conexões de elementos resistivos em diversas configurações para representar os mais importantes tipos de falhas, onde o que determina cada tipo de falha é a conexão de elementos nos nós a serem consideradas as falhas.

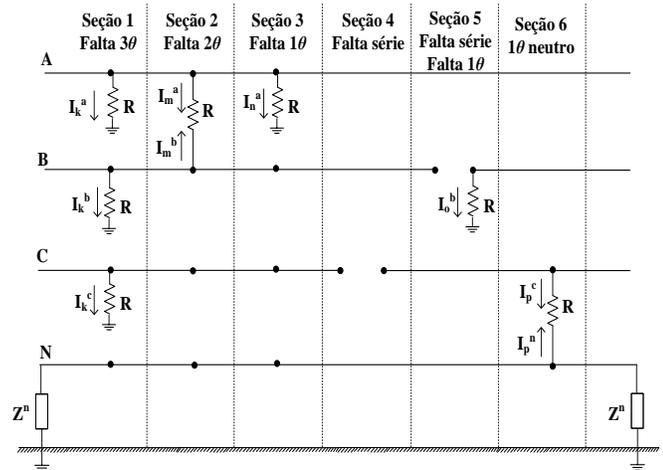


Figura 61 – Modelos de falhas

A Figura 61 apresenta possibilidades de representação de diversos tipos de falhas, inclusive falhas simultâneas (seção 5) e falha para o neutro (seção 6) devido à representação explícita do cabo neutro, podendo alcançar resultados mais precisos, ao invés de se fazer simplificações ou utilizar artifícios, como a redução de Kron, que poderiam ocasionar em resultados errôneos. Cabe ressaltar que é possível representar todos os tipos de falha apresentados na Figura 61, simultaneamente, sem nenhum esforço computacional extra ou considerações adicionais.

## III. APLICAÇÕES

### A. Sistema Teste 34-Barras

Para validar a metodologia proposta foi realizado um estudo utilizando o PSCAD. O sistema utilizado para realizar esta comparação foi o IEEE 34 barras [23].

A Tabela 2 apresenta as correntes de falhas de vido a aplicação de falhas trifásicas em algumas barras. As correntes indicadas com o subíndice “sub” representam as correntes medidas na saída da subestação e as correntes com o subíndice “cc” são as correntes no ponto de curto circuito. Na Tabela 3 são apresentados os valores RMS das correntes de curto circuito calculados pelo PSCAD depois do transitório inicial. Como podem ser observados, os valores são bastante próximos aos obtidos pela metodologia proposta indicando que a solução da mesma é eficiente. As pequenas diferenças de valores podem ser explicadas pelas pequenas diferenças nas entradas

Apêndice

de dados (que acabam por impactar nas modelagens) entre os programas.

Tabela 2 - Correntes de curtos circuitos trifásicos – metodologia proposta

Barra	Ia,sub	Ib,sub	Ic,sub	Ia,cc	Ib,cc	Ic,cc
812	764	810	744	764	806	742
848	260	275	245	250	268	249
890	93	92	83	413	437	413

Tabela 3 - Correntes de curtos circuitos trifásicos – PSCAD

Barra	Ia,sub	Ib,sub	Ic,sub	Ia,cc	Ib,cc	Ic,cc
812	765	811	743	723	797	717
848	262	277	247	254	265	241
890	96	96	85	410	434	410

A Figura 62 e Figura 63 apresentam algumas formas de ondas resultantes do PSCAD.

B. Sistema IEEE 13-Barras

O sistema IEEE 13 barras, apesar de ser um sistema de pequeno porte proporciona um bom teste devido à assimetria e desequilíbrio existentes. Este sistema possui dois transformadores, ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos e cargas desequilibradas [23].

A Figura 64 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE 13 barras.

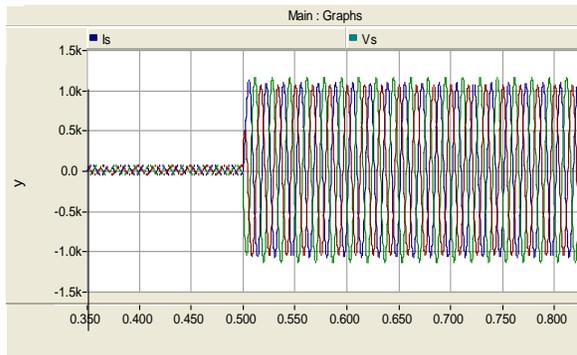


Figura 62 - Curto circuito trifásico - Barra 812 - Correntes da subestação

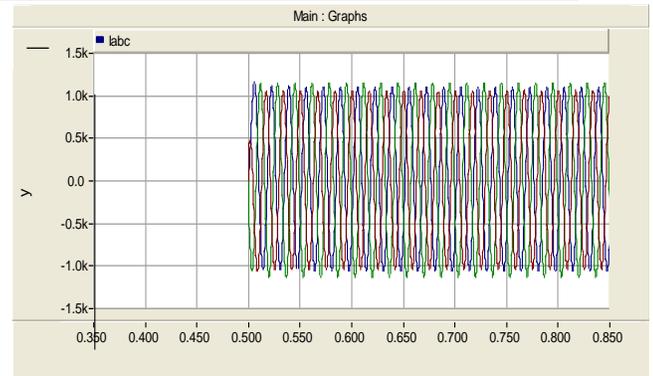


Figura 63 - Curto circuito trifásico - Barra 812 - Correntes no ponto de falha

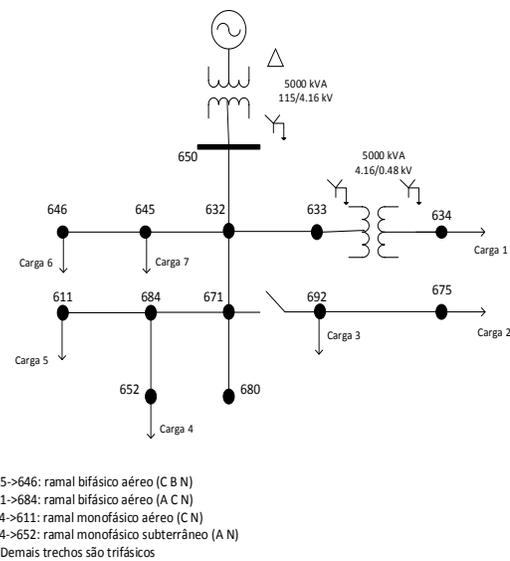


Figura 64 - Sistema IEEE 13 barras

No sistema IEEE 13 barras foram simulados a aplicação de curtos circuitos trifásicos sem a terra em todas as barras trifásicas.

Os resultados obtidos com as simulações são apresentados na Tabela 4, que apresenta as correntes de curto circuito em cada nó e um cálculo de diferença percentual entre o maior e o menor valor entre as fases (Dif%).

Destaca-se que mesmo na condição de curtos circuitos trifásicos (curtos equilibrados) observa-se que em várias barras os valores das correntes de curto circuito nas fases a, b, e c possuem uma diferença superior a 9%, devido ao desequilíbrio do sistema. Estas verificações e análises não poderiam ser efetuadas caso o sistema fosse representado da forma clássica por redes de sequência para sua análise. Assim, verifica-se novamente a importância de uma modelagem multifásica mais

Apêndice

detalhada do sistema elétrico, capaz de representar os desequilíbrios presentes neste sistema.

Tabela 4 - Módulo das correntes de curto circuito – IEEE 13 barras

Barra	I <sub>a</sub> (kA)	I <sub>b</sub> (kA)	I <sub>c</sub> (kA)	Dif(%)
SE	13,70	13,70	13,70	0
692	3,35	3,27	2,96	13,17
680	2,91	2,84	2,55	14,11
675	3,07	3,04	2,75	11,63
671	3,35	3,27	2,96	13,17
650	8,42	8,42	8,42	0
634	15,27	15,13	14,72	3,73
633	4,15	4,02	3,80	9,21
632	4,80	4,70	4,39	9,34

C. Sistema Teste IEEE NEV

O principal objetivo do sistema teste NEV (Figura 65) é testar a capacidade das metodologias de calcular tensões de neutros para a terra, por isso o acrônimo utilizado em seu nome. Assim, ele foi utilizado para demonstrar a eficiência da metodologia proposta na solução de sistemas complexos [23]. Foram realizados os seguintes estudos: (i) O sistema foi representado de forma completa e o curto circuito foi aplicado entre o nó 16.4.a (leia: nó do poste 16, circuito 4, fase a) e o neutro do sistema, nó 16.n, com uma resistência de defeito  $R_{an}$  igual a  $10^{-8} \Omega$ . Ressalta-se que este curto fase-neutro é comum de acontecer em sistemas reais, mas não pode ser retratado e analisado em muitas metodologias, especialmente as que usam redes de sequência; (ii) O sistema foi representado de forma completa e o curto circuito foi aplicado entre o nó 16.4.a (poste 16, circuito 4, fase a) e a terra através de uma resistência de defeito  $R_{ag}$  igual a  $10^{-8} \Omega$ ; (iii) Curto circuito entre o nó 16.4.a (poste 16, circuito 4, fase a) e a terra, sendo que neste caso as impedâncias mútuas entre os circuitos serão desconsideradas, mas as impedâncias mútuas entre as fases de mesmo circuito serão consideradas; (iv) Curto circuito entre o nó 16.4.a (poste 16, circuito 4, fase a) e a terra, sendo que neste caso serão representados apenas os postes notáveis (com números circulados na figura representativa do sistema), e todas as impedâncias mútuas serão consideradas; (v) Defeito entre o nó 16.4.a (poste 16, circuito 4, fase a) e a terra, sendo que neste caso as impedâncias mútuas entre os circuitos não serão consideradas e também só serão representados os postes notáveis.

Na Figura 66 é apresentado um desenho detalhando as características de conexões entre os circuitos e são colocadas indicações de impedâncias para facilitar a visualização das falhas que foram analisadas nos casos descritos.

Na Figura 67 são apresentados os módulos das correntes de defeito no nó 16.4.a. Pode-se observar uma diferença

considerável entre o valor da corrente de curto circuito fase-neutro (Caso1) para a corrente de curto circuito fase-terra (Caso 2), ambos, considerando todos os aspectos do sistema teste. Esta comparação mostra claramente a importância da representação explícita do condutor neutro. Na verdade, a utilização da técnica de redução de Kron para a incorporação dos efeitos do condutor neutro nos condutores de fase, muito utilizada em várias metodologias, pode levar a grandes erros em sistemas que não são solidamente aterrados em todos os pontos e, portanto, não deve ser utilizada nestas situações. Neste caso, a diferença entre as correntes foi de aproximadamente 23%.

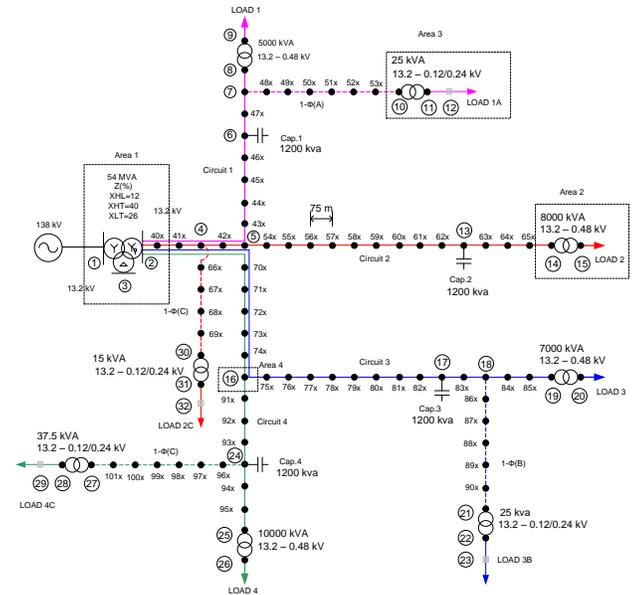


Figura 65 – Sistemas Teste NEV

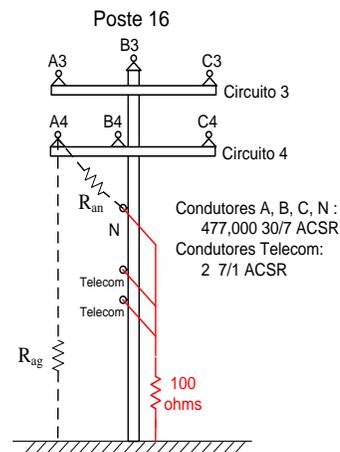


Figura 66 - Poste 16

É possível observar ainda, o aumento nos erros dos resultados à medida que as simplificações são adotadas, chegando a uma diferença de corrente de curto circuito entre o caso 2 e o caso 5 de aproximadamente 26%. Vale ressaltar que entre estes os casos (2 a 5) as únicas simplificações foram a consideração ou não das impedâncias mútuas entre os circuitos

e a representação ou não de todos os postes, sendo que as impedâncias mútuas entre as fases de cada circuito e os desequilíbrios foram representadas em todos os casos. Neste ponto, analisando os resultados, nota-se novamente a importância da modelagem completa da rede.

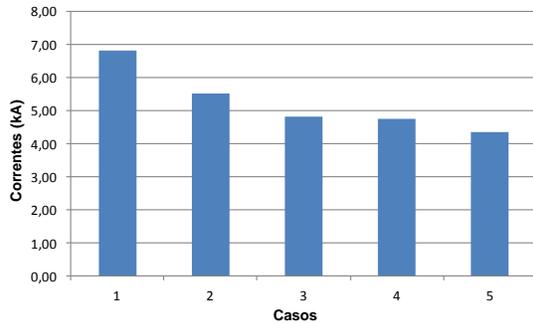


Figura 67 – Resultados do Sistema NEV – Casos

#### IV. CONCLUSÕES

De maneira geral, todos os sistemas testes propostos pelo DSASC [23] puderam ser simulados e corretamente modelados pela metodologia proposta.

É importante ressaltar que os resultados obtidos e suas possíveis análises podem ser feitas diretamente na ferramenta proposta, sem a necessidade de cálculos ou processos adicionais iterativos, que são usualmente utilizados em muitas das metodologias atuais.

Portanto, a metodologia desenvolvida mostra-se bastante robusta e flexível capaz de representar as diferentes características de topologia e configurações dos sistemas elétricos de potência, com modelos detalhados de equipamentos e condições de falhas, além de permitir diversas análises.

Notou-se também que a representação completa de todas as características do circuito influenciou consideravelmente nos resultados das simulações. No sistema IEEE 13 barras foi obtida diferenças de até 15% entre as fases. No sistema IEEE NEV foram detectadas variações de até 26% nos resultados devido as simplificações consideradas.

#### V. REFERÊNCIAS

- YAN, X. Q., XU, Z. Y., WEN, A., YANG, Q. X. "Fault Analysis Principle for Twelve-phase Transmission System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012.
- ABDEL-AKHER, M., NOR, K M. "Fault Analysis of Multiphase Distribution Systems Using Symmetrical Components", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.25, n. 4, 2010.
- STEVENSON JR., W. D., "Elementos de Análise de Sistemas de Potência", tradução e revisão técnica Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Somchai Ansuaj. – 2ª. Edição – São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- ANDERSON, P. M., "Analysis of Faulted Power Systems", *IEEE Press Power Systems Engineering Series*, 1a Edição, NY, USA, 1995.
- TENG, J. H. "Unsymmetrical Short-circuit Fault Analysis for Weakly Meshed Distribution Systems", *Power Systems*, *IEEE Transactions on*, v.25, n. 1, 2010.
- PENIDO, D.R.R. "Uma metodologia para Análise de Sistemas Elétricos de N Condutores pelo Método de Injeção de Correntes", Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- PENIDO, D. R. R. ; ARAUJO, L. R. ; CARNEIRO JR, S. ; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A. N., "Three-phase Power Flow Based on Four-Conductor Current Injection Method for Unbalanced Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 494–503, May 2008.
- PENIDO, D. R. R. ; ARAUJO, L. R. ; CARNEIRO JR, S. ; PEREIRA, J. L. R., "A new tool for multiphase electrical systems analysis based on current injection method", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 44, p. 410-420, 2013.
- OU, T., "Ground fault current analysis with a direct building algorithm for microgrid distribution", *Electrical Power and Energy Systems*, 2013.
- KOCAR, I., THERRIEN, F., LACROIX, J., "General and Simplified Computation of Fault Flow and Contribution of Distributed Sources in Unbalanced Distribution Networks", *IEEE Transactions on*, 2012.
- FILOMENA, D. A., RESENER, M., SALIM, H. R., BRETAS, S. A., "Distribution systems fault analysis considering fault resistance estimation", *Electrical Power and Energy Systems*, 2012.
- CHEN, T., YANG, W., "Analysis of Multi-Grounded Four-Wire Distribution Systems Considering the Neutral Grounding", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, pp. 710 – 717, 2001.
- LIN, W. –M., OU T. –C., "Unbalanced Distribution Network Fault Analysis with hybrid compensation", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011.
- WANG, A., CHEN, Q., ZHOU, Z., "An Improved Phase Coordinate Method for Fault Analysis in Inherently Unbalanced Power Systems", *IEEE Transactions on*, 2008.
- FILIPOVIC-GRICIC D., FILIPOVIC-GRICIC, B., CAPUDER K., "Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies", *Electrical Power and Energy Systems*, 2013.
- GONZÁLEZ, G. D., FERNÁNDEZ, J. G. –A., ARBOLEYA, P., "Electromagnetic model of turn-to-turn short circuits in transformers", *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 23 Iss: 2, pp.558 – 571, 2004.
- IEEE Std 551, "IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems", *Violet Book, Norma Técnica Internacional – IEEE*, 2006.
- IEC 60909-X, "Short-circuit in three-phase a.c. systems", *Norma Técnica Internacional – IEC*, 2001.
- BERMAN, A., XU, W., "Analysis of faulted Power systems by phase coordinates", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 587-595, April 1998.
- BASTARD, P., BERTRAND, P., MEUNIER, M., "A transformer model for winding fault studies", [Power Delivery, IEEE Transactions on](http://www.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html) (Volume:9, Issue: 2), 1994
- BARAN, M. E., EL--MARKABY, I., "Fault analysis on distribution feeders with distributed Generators", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 1757-1764, November 2005.
- CIRIC, R. M., OCHOA, L. F., FELTRIN, A. P., NOURI, H., "Fault Analysis in Four-Wire Distribution Networks", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, v. 152, n. 6, pp. 977 – 982, 2005.
- IEEE Radial Distribution Test Feeders. *Distribution System Analysis Subcommittee* [online]: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- BLACKBURN, J. L., DOMIN, T. J., "Protective Relaying: Principles and Applications", Third Edition, *Power Engineering*, 3rd ed. CRC Press, 2006

