

**DILZAIR ALVIMAR DE OLIVEIRA JÚNIOR**

**FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA:  
DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE ROMPIMENTO DE  
CONDUTORES EM CIRCUITO PRIMÁRIO DE REDES  
AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADO EM  
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

**Belo Horizonte – MG  
Maio / 2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
CPDEE - CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA:  
DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE ROMPIMENTO DE  
CONDUTORES EM CIRCUITO PRIMÁRIO DE REDES  
AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADO EM  
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

**DILZAIR ALVIMAR DE OLIVEIRA JÚNIOR**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Cléver Sebastião Pereira Filho

Belo Horizonte, MG - Brasil  
Maio / 2006

## DEDICO ESTE TRABALHO

A Deus,

Aos meus pais

*Dilzair e Mayre*

À minha esposa

*Leonara*

Aos meus irmãos

*Kênio, Daniela e Rosemayre*

E aos meus avós

*Onil e Vitória*

## **Agradecimentos**

A Deus que me concedeu a vida e sempre esteve a meu lado.

Aos meus queridos pais, Dilzair e Mayre, pelo grande esforço envidado para a educação de seus filhos, pelo imenso incentivo para a conquista de meu objetivo e pelo carinho e compreensão que me alimentaram durante toda essa gratificante caminhada.

À minha amada esposa, Leonara, pela compreensão e paciência que demonstrou quando da minha necessidade de me isolar durante horas a fio para estudar. Seu companheirismo e carinho me fortaleceram muito para a conclusão deste trabalho.

Ao meu estimado irmão, Kênio, pelo incentivo e amizade.

Às minhas queridas irmãs, Daniela e Rosemayre, pelo carinho.

À minha querida cunhada Adriana e seus tesouros, Filipe e Rafael, pela alegria.

Aos meus amados avós, Onil e Vitória, pela motivação e orações incansáveis.

A meu sogro, sogra e cunhados, Lenoir, Margarida, Lindomar e Leonardo, pelo incentivo.

À minha querida Tia Ana Cardoso, promissora do conhecimento na família e que muito me inspirou na vida estudantil.

Ao sábio e amigo Professor Cléver, pela dedicação e orientação deste trabalho.

À Companhia Energética de Minas Gerais que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao grande mestre e amigo, Izonel, que muito me ajudou na elaboração do programa computacional.

A todos meus amigos, em especial a José Vicente, Gernan, Jackes, Rodrigo Valadão, Sérgio Ricardo, Whester, Francisco e Edino, que caminharam comigo nessa grande jornada, com grande amizade e companheirismo.

A todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram na execução desta dissertação.

## Resumo

O rompimento de condutores primários energizados em redes de distribuição aéreas (RDA) quando em contato de alta impedância com solo representa um grande risco de vidas humanas e de incêndios. Os equipamentos de proteção convencionais de sobrecorrente apresentam grande limitação para detecção desse tipo de falta, uma vez que não se sensibilizam para valores de corrente abaixo ou próximo do valor de corrente de carga. Desde a década de 70, vários métodos e equipamentos foram propostos para solucionar o problema. Apesar do avanço no estudo do problema e na probabilidade de detecção dessas faltas, esses métodos não apresentam alta confiabilidade e segurança em termos de detecção. Além disso, nesses métodos, não há como localizar a falta na subestação apenas pelo sistema de proteção. Entretanto, alguns estudos recentes propõem a detecção do rompimento de condutores pelo desequilíbrio de tensão. O método propõe a instalação de sensores em pontos estratégicos do alimentador os quais detectam o desequilíbrio de tensão causado pelo rompimento de condutor primário, tendo como parâmetro de monitoramento a tensão de seqüência zero. Dentre as vantagens desse método, pode-se destacar a sua confiabilidade e segurança na detecção dessas faltas, independentemente da dinâmica do cabo ao solo, da aleatoriedade e valor da corrente de falta e se o cabo está caído do lado fonte ou carga. Assim, é proposto neste trabalho um algoritmo de localização de falta de fase em alimentadores de distribuição, visando a proteção contra rompimento de condutores primários energizados ao solo com característica de faltas de alta impedância para a rápida atuação do Centro de Operação da Distribuição (COD). O algoritmo trabalha com uma lógica de caminhamento de redes de distribuição com barras não direcionais. Foram realizadas várias simulações no programa *Alternative Transients Program* (ATP), inclusive com uma representação de um alimentador real da CEMIG, sendo localizadas as faltas num programa desenvolvido no MatLab®, apresentando resultados satisfatórios. Além da localização desse tipo de falta, dependendo do nível de proteção exigido, o método permite distinguir um rompimento de condutor de uma atuação monofásica de equipamentos de proteção como fusíveis, e localizá-lo de imediato. Isso reduzirá o tempo de restabelecimento de energia para as concessionárias para ambos tipos de defeito, além de proporcionar maior nível de segurança para a população quando da ocorrência de faltas de alta impedância com rompimento de condutores primários do alimentador.

# Abstract

The breakage of energized conductors of distribution aerial networks (RDA) in the event of phase-conductors contacting the soil through high values of fault impedances represents a serious risk of fire and a threat to human lives. The conventional overcurrent protection devices usually involves significant limitations concerning detection of this nature of fault since these devices are not sensitive to values of current that are below or very close to load currents. Several methods and equipment have been proposed in order to solve this problem since 1970's. Despite studies have been providing a better understanding of the problem and despite the increase of the probabilities of detecting these faults, the mentioned methods do not involve enough confidence and security in terms of fault detection. Besides, in these methods the protection system alone is not able to locate the fault in the substation by itself. However some recent studies propose the detection of broken conductors by means of voltage unbalance. The method recommends the installation of sensors at strategic points of the feeder, which detect the voltage unbalance caused by broken conductors taking the zero-sequence voltage as the monitoring parameter. Among the advantages of this method it can be mentioned its reliability and security with respect to the detection of this nature of faults, no matter which is the dynamic of the conductor towards soil surface or the value and the randomness of the fault current or even the point of the conductor rupture (load or source side of the line). In this way, an algorithm for phase-fault location in distribution feeders is proposed in this work. The algorithm focus on the protection against the rupture and drop of energized primary conductors under high impedance fault condition in such a way that the Distribution Operation Center (COD) may promptly interfere. The algorithm involves a route logic of distribution networks for non-directional bars. It were performed several simulations using Alternative Transients Program (ATP) including the modeling of a real CEMIG's feeder. A program developed in MatLab® language was used in order to locate the faults. In all cases, the algorithm indicated correctly the location of faults. In addition to the localization of this kind of fault and taking into account the required protection level, the method is able to make difference between a broken conductor and a single phase trip of the protection equipment (a fuse-link melting, for example) locating the fault immediately after it occurs. This will reduce the time delay to restore the energy supply for both kinds of faults, besides providing a higher security level for people in case of occurrence of high impedance faults caused by rupture of the primary conductors of the feeder.

# SUMÁRIO

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

### 1. INTRODUÇÃO

1.1	Considerações iniciais _____	13
1.2.	A importância da proteção contra faltas de alta impedância _____	14
1.3.	Objetivos _____	15
1.4.	Organização do trabalho _____	16

### 2. FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

2.1.	Introdução _____	17
2.2.	Definição e tipos de faltas de alta impedância _____	17
2.3.	Características das redes de distribuição _____	19
2.4.	Características do sistema de proteção de distribuição frente a faltas de alta impedância _____	20
2.5.	Rompimento de condutores de circuitos primários _____	22
2.5.1.	ConFIGurações de rompimento de condutores _____	22
2.5.2.	Causas de rompimentos de condutores de circuitos primários de redes de distribuição _____	25
2.5.3.	Ações para redução de rompimento de condutores _____	27
2.6.	Natureza das faltas de alta impedância _____	28
2.6.1.	Faltas de alta impedância ativas série com condutores caídos ao solo ____	28
2.6.2.	Faltas de alta impedância ativas série com condutores tocando objetos externos _____	36
2.6.3.	Faltas de alta impedância ativas <i>shunt</i> _____	36
2.6.4.	Faltas de alta impedância passivas _____	37

### 3. MÉTODOS DE DETECÇÃO E MITIGAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

3.1.	Considerações Gerais _____	38
3.2.	Métodos de detecção por monitoramento de corrente _____	38

3.2.1.	Detecção por monitores de amplitude e ângulo de fase da terceira harmônica de corrente _____	39
3.2.2.	Detecção de componentes de seqüência não características nas harmônicas de corrente _____	40
3.2.3.	Detecção do fasor da corrente de 3º harmônico _____	42
3.2.4.	Detecção por algoritmo de energia _____	43
3.2.5.	Detecção por algoritmo de aleatoriedade _____	45
3.2.6.	Detecção de taxa de variação _____	46
3.2.7.	Detecção por análise espectral de arco _____	46
3.2.8.	Técnicas de extração de corrente de falta _____	47
3.2.9.	Detecção por análise do padrão de centelhamento _____	47
3.2.10.	Análise de carga _____	48
3.2.11.	O Relé de Terra de Relação _____	48
3.2.12.	O Monitor Digital de Alimentador _____	50
3.3.	Método de detecção por resposta ao impulso _____	59
3.4.	Método de detecção por monitoramento de tensão _____	61
3.5.	Métodos para redução do problema de faltas de alta impedância _____	64
3.5.1.	Sistemas de automação da distribuição _____	65
3.5.2.	Melhorias de práticas de construção _____	66
3.5.3.	Melhorias de práticas de operação e manutenção _____	68
3.5.4.	Programas sociais e sistemas de respostas de emergência _____	68
3.6.	Abrangência dos métodos de detecção _____	69
3.7.	Problemas operacionais de métodos de detecção de faltas de alta impedância _____	71
3.8.	Conclusões _____	74

#### **4. ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

4.1.	Considerações gerais _____	75
4.2.	Resumo da análise de desequilíbrio de tensão _____	79

#### **5. ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE ROMPIMENTO DE CONDUTORES PRIMÁRIOS DE RDA**

5.1.	Considerações gerais sobre o sistema de supervisão para detecção de falta de fase em alimentador de distribuição _____	83
5.2.	Metodologia de localização de falta de fase em alimentador de distribuição _____	85
5.3.	Algoritmo de localização de falta de fase em alimentador de distribuição _____	86
5.3.1.	Representação do alimentador no ATP _____	87

5.3.2.	Exemplo de localização de falta pelo algoritmo	91
5.4.	Simulação de casos	101
5.4.1.	Testes de casos em alimentador fictício	102
5.4.2.	Testes de casos de um alimentador da CEMIG	106
5.5.	Avaliação da metodologia proposta	113

## 6. CONCLUSÕES

6.1.	Síntese do trabalho e conclusões	115
6.2.	Perspectiva de trabalhos futuros	118
6.2.1.	Implantação da metodologia no campo em tempo real	118
6.2.2.	Estudo do desequilíbrio de tensão nos barramentos secundários de transformadores de distribuição	119

<b>REFERÊNCIAS</b>		121
--------------------	--	-----

## APÊNDICE A

### EQUAÇÕES BÁSICAS DE COMPONENTES DE SEQUÊNCIA

A.1.	Equações básicas de componentes de seqüência	123
A.2.	Método de análise	127
A.3.	Carga desequilibrada em estrela aterrada por impedância de neutro (sem mútuas) onde duas das impedâncias de fase são iguais entre si	130
A.4.	Carga monofásica entre duas fases (BC)	132
A.5.	Carga monofásica entre duas fases e terra (BCT)	134
A.6.	Carga monofásica entre fase e terra (AT)	136
A.7.	Carga desequilibrada em estrela não aterrada (sem mútuas)	138
A.8.	Assimetria série na fase “a” com carga desequilibrada ligada em estrela isolada	141
A.9.	Abertura bipolar com carga desequilibrada em estrela isolada	147

## APÊNDICE B

### CÁLCULOS DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

B.1.	Desequilíbrio acentuado de carga	149
B.1.1.	Carga ligada entre duas fases do alimentador	149
B.1.2.	Carga ligada entre uma fase e neutro do alimentador	153
B.1.3.	Carga ligada entre duas fases e neutro	157
B.1.4.	Carga desequilibrada ligada em triângulo	161

B.2.	Abertura monopolar no circuito primário de RDA _____	166
B.2.1.	Carga desequilibrada ligada em triângulo _____	166
B.2.2.	Alimentador fictício _____	171
B.2.2.1.	Abertura da fase “a” sem cabo tocando o solo, com e sem banco de capacitores _____	172
B.2.2.2.	Abertura da fase “a” com cabo tocando o solo, no lado fonte, com e sem banco de capacitores _____	172
B.2.2.3.	Abertura da fase “a” com cabo tocando o solo, no lado carga, com e sem banco de capacitores _____	173
B.3.	Abertura bipolar no circuito primário de RDA _____	173
B.3.1.	Carga desequilibrada ligada em triângulo _____	173
B.3.2.	Alimentador fictício _____	174
B.3.2.1.	Abertura das fases “a” e “b” sem cabo tocando o solo, com e sem banco de capacitores _____	174
B.3.2.2.	Abertura das fases “a” e “b” com cabo tocando o solo, no lado fonte, com e sem banco de capacitores _____	175
B.3.2.3.	Abertura das fases “a” e “b” com cabo tocando o solo, no lado carga, com e sem banco de capacitores _____	176

# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ATP</b>	<i>Alternative Transients Program</i>
<b>A/D</b>	Analógico/Digital
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CEMIG</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>CEPEL</b>	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
<b>CESP</b>	Companhia Energética de São Paulo
<b>COD</b>	Centro de Operação da Distribuição
<b>COELCE</b>	Companhia Energética do Ceará
<b>CPFL</b>	Companhia Paulista de Força e Luz
<b>DFM</b>	<i>Digital Feeder Monitor</i>
<b>GRIDIS</b>	Grupo de Intercâmbio e Difusão de Informação sobre Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho
<b>EAD</b>	<i>Expert Arc Detector</i>

**ELETROPAULO**    Eletricidade de São Paulo S.A

**EPRI**            *Electric Power Research Institute*

**GE**              *General Electric*

**NBI**             Nível Básico de Isolamento

**PP&L**          *Pennsylvania Power and Light*

**RGR**          *Ratio Ground Relay*

**RG&E**        *Rochester Gas and Electric*

**RDA**          Rede de Distribuição Aérea

**RPS**          Regime Permanente Senoidal

**RISC**         *High-Performance Reduced Instruction Set Microprocessor*

**SE**             Subestação

**SSCD**        Sistema de Supervisão e Controle da Distribuição

**TAMU**        *Texas A&M University*

**PTI**          *Power Technologies Inc.*

**UC**            Unidade Consumidora

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A detecção de curtos-circuitos em sistemas de distribuição é realizada normalmente por equipamentos que respondem ao excesso de corrente no sistema, de acordo com suas características e respectivas curvas pré-ajustadas de tempo e corrente.

Curtos-circuitos caracterizados pela alta impedância no ponto de falta e que freqüentemente não podem ser detectados com confiabilidade pelo sistema de proteção, são chamados na literatura de “faltas de alta impedância”. Vários tipos de faltas de alta impedância geram níveis de corrente insuficientes para sensibilizar a operação de equipamentos de proteção de sobrecorrente e por isso, no caso de redes de distribuição aéreas (RDA), podem causar acidentes graves com pessoas e animais e/ou provocar incêndios em propriedades, principalmente nas situações que envolvem queda de condutores energizados de circuitos da rede primária, os quais apresentam os maiores níveis de tensão de uma rede de distribuição.

Presume-se, portanto, que esse problema tenha surgido desde a criação de sistemas de distribuição, mas tornou-se objeto de grande preocupação quando houve grande expansão da rede elétrica em paralelo com o adensamento populacional.

Devido às suas características e conseqüências, o problema está mais associado com a segurança da população do que com a proteção do sistema elétrico, o que gera uma maior abordagem de supervisão e controle das redes de distribuição.

Diante do problema, concessionárias, órgãos governamentais, universidades e fabricantes, através de pesquisas, desenvolvimento de equipamentos e testes computacionais e em campo, têm buscado uma solução para o problema.

Outro motivador pela busca da solução do problema foi que, a partir da década de 70, houve um avanço tecnológico significativo como filtros ativos, computadores pessoais e técnicas digitais, os quais promoveram novas ferramentas para o estudo do problema.

Apesar do grande esforço envidado, principalmente nas últimas três décadas, infelizmente esse objetivo não foi atingido de forma eficiente até o presente momento. Por outro lado, isso reforça ainda mais a necessidade da continuação do trabalho e da persistência na busca de

melhorias de métodos de detecção, distinção e localização de faltas de alta impedância com queda de condutores de circuitos primários de RDA.

## 1.2. A IMPORTÂNCIA DA PROTEÇÃO CONTRA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Apesar da baixa frequência de ocorrências de faltas de alta impedância que envolvem a queda de condutores primários quando comparada à de faltas de alta corrente, a importância de uma solução é grande frente à gravidade e ao número de acidentes ocorridos com pessoas nas situações em que o circuito não foi desenergizado em tempo hábil.

A Tabela 1.1 apresenta o número de acidentes registrados no Brasil pelo Grupo de Intercâmbio e Difusão de Informação sobre Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho (GRIDIS) com rompimentos de condutores energizados, de 1991 a 1994 e de 2001 a 2003. Verifica-se um total de 784 acidentes com lesão em todo período, ocasionando 375 mortes ou uma média de 53,6 mortes/ano. Observa-se ainda, pelo gráfico da Figura 1.1, que não existe um decréscimo ou acréscimo contínuo ao longo do período, o que mostra uma tendência da persistência do problema, assim como a gravidade de suas conseqüências.

Tabela 1.1 – Número de acidentes com rompimentos de condutores energizados no Brasil

Ano	Morte	Lesão Grave	Lesão Leve	Subtotal
1991	51	17	41	109
1992	63	18	33	114
1993	47	16	31	94
1994	33	15	36	84
2001	80	39	42	161
2002	55	34	42	131
2003	46	24	23	91
<b>Total Geral</b>	<b>375</b>	<b>163</b>	<b>248</b>	<b>784</b>
<b>Média/ano</b>	<b>53,6</b>	<b>23,3</b>	<b>35,4</b>	<b>112,0</b>

Nota: os dados dos anos de 1996 a 2000 não foram fornecidos

Fonte: GRIDIS

Além da perda preciosa e insubstituível de vidas e lesões humanas, existem ainda conseqüências jurídicas às concessionárias em vários casos de acidentes, que podem resultar em indenizações de centenas de milhares de reais às partes lesadas, ou em até processo civil contra engenheiros, técnicos e eletricitistas da concessionária.

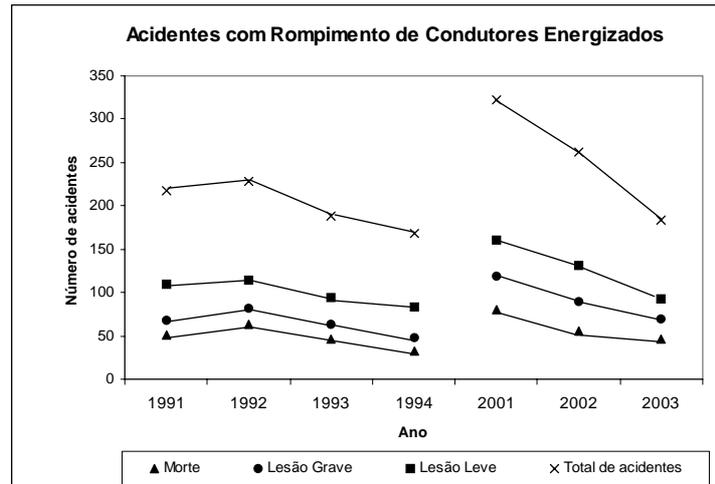


Figura 1.1: Gráfico de acidentes com rompimento de condutores energizados no Brasil

### 1.3. OBJETIVOS

Acidentes continuam a ocorrer nas concessionárias de distribuição de energia elétrica devido a ocorrências de faltas de alta impedância com rompimento de cabos de circuito primário de distribuição, uma vez que os métodos e tecnologias até então propostos e disponíveis apresentam grande limitação de confiabilidade e segurança. Dessa forma, a necessidade de evolução da eficiência de métodos visando a redução do problema torna-se uma evidência para engenheiros, pesquisadores, concessionárias e fabricantes ligados à proteção de sistemas elétricos de potência, assim como para órgãos governamentais e sociedade em geral, os quais estão relacionados à segurança da população.

A princípio, o objetivo deste trabalho era fazer um estudo bibliográfico detalhado sobre faltas de alta impedância, de modo a apresentar o estado da arte do problema e dos métodos de detecção. Porém, o próprio estudo levou à seleção de um método de detecção de rompimentos de condutores no circuito primário de alimentadores, onde foi possível vislumbrar um algoritmo de localização desse tipo de falta.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho passou a ser a apresentação e desenvolvimento de um algoritmo de localização de falta de fase em sistema de distribuição até 15 kV, visando a proteção pessoal contra rompimento de cabos de circuitos primários caídos ao solo energizados com característica de falta de alta impedância, baseado na detecção por desequilíbrio de tensão.

Pretende-se, ao atingir o objetivo proposto, aumentar as chances de proteção contra faltas de alta impedância, com o propósito final de reduzir o número de acidentes nas ocorrências

dessas faltas, valorizando a vida humana e os eventuais impactos para as concessionárias de energia elétrica.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. No presente capítulo, é feita uma introdução sobre o tema abordado, mostrando sua importância e desafios, além dos objetivos a serem alcançados.

No capítulo 2, é feita uma abordagem sobre o fenômeno “faltas de alta impedância”, apresentando suas definições, tipos, características, causas, conseqüências, assim como as limitações do sistema de proteção por sobrecorrente frente a estes tipos de faltas, de modo a melhor compreender o problema.

No capítulo 3, são apresentados vários métodos e técnicas de detecção de faltas de alta impedância, suas principais características, vantagens e desvantagens, de modo a proporcionar um direcionamento para a seleção de um método de detecção o qual foi aprofundado nesse trabalho.

No capítulo 4, é abordado o método de detecção por desequilíbrio de tensão, onde são apresentados os resultados e análises dos cálculos e simulações realizadas em um alimentador típico de distribuição. Foram consideradas várias situações de desequilíbrio acentuado de carga e assimetria série por abertura monopolar e bipolar em circuitos primários de distribuição, visando verificar qual o parâmetro de monitoramento a ser empregado, assim como sua eficiência na distinção dos eventos supracitados. O desenvolvimento das equações e diagramas de seqüência para os casos estudados são apresentados no Apêndice A e os cálculos dos parâmetros que medem o grau de desequilíbrio de tensão são apresentados no Apêndice B.

No capítulo 5, é apresentado um algoritmo para localização de falta de fase com o objetivo de proteção pessoal contra rompimento de cabos de circuitos primários de distribuição, abrangendo uma nova metodologia de identificação do caminho série de qualquer ponto do alimentador até a fonte, sendo testados vários casos simulados, inclusive de um alimentador da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Os resultados dos testes são avaliados, assim como uma abordagem do sistema de supervisão e controle.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, as contribuições e os possíveis desenvolvimentos futuros.

## **2. FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

Os equipamentos de proteção convencionais de redes de distribuição atuam por sobrecorrente de acordo com seus respectivos ajustes pré-definidos que compõem suas curvas de tempo e corrente. Logo, não atuam para faltas cujas correntes estão abaixo de seus limiares, como é o caso de faltas de alta impedância as quais podem inclusive apresentar correntes abaixo dos valores da corrente de carga, exigindo equipamentos de proteção mais sensíveis. Além disso, essas faltas podem ser originadas por rompimento de condutores primários da rede de distribuição, ficando energizados ao alcance de pessoas, gerando um grande risco de acidentes.

Portanto, primeiramente, é interessante estudar as características das faltas de alta impedância em redes de distribuição e dos sistemas de proteção associados, de modo a compreender melhor o problema e seus atuais limites de atuação.

### **2.2. DEFINIÇÃO E TIPOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA**

Várias são as definições de falta de alta impedância encontradas na literatura técnica sobre o assunto, podendo citar:

- ✓ “Pode-se definir uma falta de alta impedância como uma falta na rede primária de distribuição a qual não pode ser detectada ou interrompida pela proteção de sobrecorrente convencional”, de [7];
- ✓ “Falta de alta impedância é um tipo de falta que ocorre em sistemas de distribuição de até 15 kV, onde uma ou mais fases da rede primária entram em contato com algum elemento de alta impedância, limitando assim a corrente de falta a valores bem abaixo dos limites da proteção convencional”, de [3].

Em [2], é descrito ainda que “As faltas de alta impedância podem ser conceituadas como aquelas faltas que ocorrem em uma das fases sem a existência de um contato direto com as outras fases ou com o condutor neutro, impossibilitando uma detecção confiável pelas proteções convencionais”.

Porém, neste trabalho optou-se por definir essa falta como a ocorrência de rompimento de condutor em uma ou mais fases sem contato com qualquer tipo de material ou a ocorrência do

contato exclusivo de qualquer condutor fase com um material de alta impedância, podendo ser causada por uma assimetria série e/ou *shunt* do sistema em que não tenha havido contato com outra fase ou ponto solidamente aterrado, e que tenha gerado um nível de corrente que impossibilite a detecção confiável pelos equipamentos de proteção convencionais baseados em sobrecorrente.

Em sistemas de distribuição até 15 kV, as faltas de alta impedância são mais frequentes quando comparadas a ocorrências em sistemas de transmissão, devido às características da falta e das redes de distribuição. Como o plano de estudo deste trabalho é limitado aos sistemas de distribuição até 15 kV, as faltas de alta impedância serão referidas com a definição acima, porém ocorridas em sistemas de distribuição com classe de tensão de 15 kV, para maior facilidade de compreensão do conteúdo do texto.

Pode-se classificar as faltas de alta impedância em dois tipos, como em [3]: faltas ativas e faltas passivas.

As faltas ativas são aquelas nas quais um condutor energizado se aproxima de outro objeto, sendo que o campo elétrico entre eles é suficiente para romper o isolamento do meio que os separa, formando um arco elétrico. Este meio pode ser o ar, ou mesmo o solo, que separa o condutor do aterramento mais próximo. Este tipo de falta pode ser série (interrompendo a corrente de carga na fase onde houve o rompimento do condutor) ou *shunt* (quando o condutor entra em contato com algum objeto aterrado com alto valor de impedância, sem, no entanto, se romper).

As faltas passivas são aquelas onde o condutor se rompe, porém sem entrar em contato com nenhum tipo de material, não existindo à jusante da falta a circulação de corrente nem arco elétrico após alguns segundos do rompimento. Estes tipos de falta são caracterizados como faltas do tipo série.

A partir dessas definições, pode-se concluir que o baixo nível de corrente ocasionado por uma falta de alta impedância pode ser causado pelos seguintes fatores:

- ✓ alta impedância do caminho de retorno da corrente de falta;
- ✓ ocorrência da falta em localização eletricamente remota em relação à fonte, reduzindo assim a corrente de curto-circuito;
- ✓ uma combinação dos dois fatores acima;
- ✓ ocorrência de faltas passivas.

### 2.3. CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica partem de subestações (SE) de subtransmissão ou transmissão, podem ser radiais ou em anel e podem apresentar níveis de tensão de linha de 4 a 34,5 kV em seus circuitos primários. No Brasil, há uma predominância de redes de distribuição radiais com classe de tensão de 15 kV (13,8 kV entre fases), assim como nos Estados Unidos (12,45 kV entre fases), com três fases e neutro multiterrado e interligado à subestação. Neste trabalho são consideradas redes com estas características.

Em grandes centros de carga com elevado adensamento populacional, como centros de metrópoles, exige-se grande confiabilidade do fornecimento de energia elétrica e, em muitos casos, são construídas redes de distribuição subterrâneas, as quais são menos susceptíveis a falhas que as redes aéreas.

Porém, a grande maioria de redes de distribuição são do tipo aéreas, apresentando grande extensão, uma vez que têm a finalidade de atender áreas urbanas e rurais. São compostas de grande quantidade de equipamentos de proteção, manobra, transformação, compensação reativa e regulação de tensão, de estruturas e acessórios. Além dos circuitos primários, também apresentam circuitos secundários para a distribuição de energia em baixa tensão em áreas urbanas. As redes de distribuição aéreas podem apresentar três tipos de circuitos primários: com condutores nus (rede convencional), com condutores cobertos (rede protegida) e com condutores isolados (rede isolada). No Brasil, as redes convencionais têm ainda grande predominância no sistema de distribuição, apesar do crescimento acelerado de redes protegidas e isoladas nos últimos dez anos, muito incentivado em áreas urbanas com elevado nível de arborização, pelas suas características e custo atrativo.

Sendo assim, devido às suas principais características, grande extensão e elevado número de equipamentos, as redes de distribuição aéreas apresentam um número de faltas bem maior que os sistemas de transmissão e geração, tendo grande influência nos indicadores de continuidade de fornecimento de energia elétrica das concessionárias, que representam basicamente a frequência e a duração de interrupções a unidades consumidoras.

Além disso, por se situarem próximas às unidades consumidoras, principalmente em áreas urbanas, tem-se a grande preocupação quanto à segurança da população na ocorrência de uma falta, tendo como princípio básico na proteção sua rápida detecção e desligamento do trecho com defeito.

As faltas podem ser causadas por fatores internos (falhas de equipamentos, estruturas, acessórios e condutores) ou externos (árvores, pipas, ventos, descarga atmosférica,

abalroamentos, catástrofes naturais, acidentes, falha humana, vandalismo, etc.) à rede, sendo necessárias ações preventivas com o objetivo de identificar possíveis defeitos e eliminá-los através da manutenção, antes que provoquem algum tipo de falta no sistema. Essas ações são realizadas por meio de inspeções que podem ser “a olho nu” ou com auxílio de equipamentos termográficos. Várias ações ainda podem ser feitas para reduzir o número de faltas como construção de redes protegidas e isoladas, instalação de pára-raios, poda de árvores, limpeza da rede e da vegetação, elevação do nível básico de isolamento (NBI) das estruturas, programas educacionais à população, entre outros.

Entretanto, uma rede de distribuição que apresente total confiabilidade é economicamente inviável, devido ao elevado investimento exigido em componentes, inspeções e manutenções preventivas. Logo, sempre ocorrerão faltas e o sistema de proteção deverá estar apto para operar adequadamente nessas situações. Porém, a maioria das faltas de alta impedância não são detectadas pelos equipamentos de proteção convencionais, por não apresentarem corrente e potência suficiente para sensibilização desse tipo de proteção. Esse problema de não detecção foi ilustrado numa pesquisa realizada pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) relatada em 1983, onde constatou-se que em torno de um terço das faltas em condutores rompidos nas redes de distribuição pesquisadas, não foram eliminadas pela proteção instalada, o que representou aproximadamente 6% de todas as faltas analisadas [1].

Logo, como as redes de distribuição aéreas convencionais são mais expostas a fatores externos, as mesmas são mais susceptíveis às ocorrências de faltas de alta impedância do que os outros tipos de redes de distribuição.

#### **2.4. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA**

Curtos-circuitos podem trazer efeitos mecânicos e térmicos em equipamentos da rede e por isso, a proteção deve atuar rápido, de acordo com as características da carga, de modo a proteger a integridade da rede e fazer com que a interrupção de fornecimento de energia atinja o menor número possível de unidades consumidoras, com baixa frequência e curto tempo de duração. Por outro lado, faltas de alta impedância, que apresentam baixo valor de corrente, podem causar graves acidentes à população, se essas faltas não forem interrompidas em intervalo de tempo adequado. Dessa forma, verifica-se que os objetivos da proteção contra curtos-circuitos e contra faltas de alta impedância são distintos, sendo que a primeira tem a

grande preocupação com a integridade do sistema e o fornecimento de energia, e a segunda com a segurança de vidas e propriedades.

A proteção contra curto-circuito é baseada em parâmetros de determinadas curvas de tempo e corrente, cujos ajustes devem ser maiores que a carga máxima vista pelo equipamento e não devem permitir atuações para operações normais do sistema como chaveamentos que geram correntes de *inrush*. É realizada por relés de disjuntores e religadores instalados na SE e equipamentos instalados ao longo do alimentador (religadores, seccionadores e fusíveis).

Porém, faltas de alta impedância geram baixos valores de corrente os quais os equipamentos de proteção convencionais não apresentam sensibilidade adequada para uma detecção confiável. Em muitos casos os condutores permanecem energizados até que algum equipamento de manobra ou de proteção seja aberto por decisão do Centro de Operação da Distribuição (COD).

Já a proteção de terra tem a finalidade de detectar correntes de falta para terra e correntes de desequilíbrio que ultrapassam os limites pré-determinados. As faltas para a terra podem provocar correntes de menor intensidade do que as faltas entre fases, o que pode não sensibilizar a proteção de fase, que tem seus ajustes maiores que a corrente máxima do sistema. A proteção de terra funciona através do somatório vetorial das três correntes de fase, resultando em  $3I_0$ , sendo  $I_0$  a corrente de sequência zero do sistema. Além disso, essa proteção deve coordenar com os equipamentos de proteção a jusante do seu ponto de instalação e não operar para eventos de chaveamento normais do sistema que provocam corrente de *inrush*, devendo dessa forma ser temporizada, de modo a evitar operações indevidas.

Geralmente, o ajuste de *pick-up* para a proteção de terra deve ser menor que a corrente mínima de curto-circuito fase-terra na sua zona de proteção e maior que a corrente máxima de desequilíbrio de fase permitida em sua área de atuação. Os critérios de desequilíbrio de fase podem variar de concessionária para concessionária e dependem muito da configuração da rede e características das cargas. Valores típicos de ajustes estão na faixa de 30% a 50% do ajuste do relé de fase.

Assim, apesar de mitigar o problema em alguns casos, a utilização de proteção de terra é limitada ao máximo desequilíbrio de carga do sistema, o que a torna uma proteção não confiável para faltas de alta impedância.

A Figura 2.1 apresenta um esquema o qual ilustra o problema da proteção contra faltas de alta impedância, mostrando que existe uma grande faixa onde essas faltas estão localizadas, que não tem proteção utilizando apenas a proteção convencional de curto-circuito por sobrecorrente.

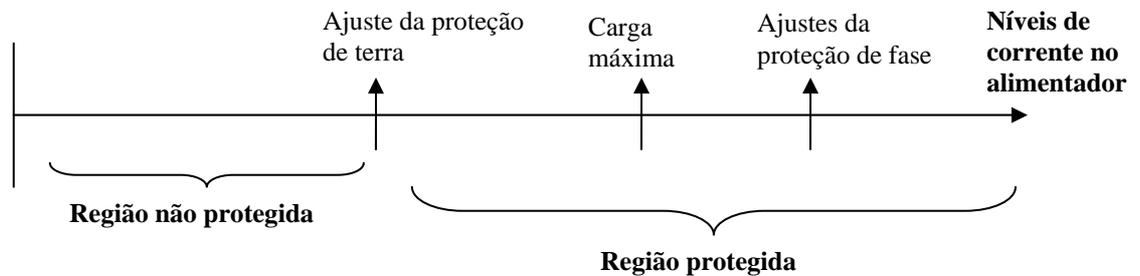


Figura 2.1: Áreas de proteção do alimentador [8]

## 2.5. ROMPIMENTO DE CONDUTORES DE CIRCUITOS PRIMÁRIOS

O conhecimento de configurações e causas de rompimento ou queda de condutores de circuitos primários é primordial para se atacar o problema de segurança de faltas de alta impedância em redes de distribuição, pois pode-se promover ações para reduzir sua frequência. Por isso, o assunto é abordado nos itens a seguir.

### 2.5.1. Configurações de rompimento de condutores

Várias são as situações de rompimento de condutores de circuitos primários de redes de distribuição, podendo citar:

- a) rompimento de *jumper* numa estrutura, seja numa situação de encabeçamento de condutor ou numa estrutura de derivação;
- b) rompimento de condutor acompanhado por queda de postes;
- c) rompimento de condutor em um vão (distância entre dois postes).

Nas situações do item (a), o risco de acidentes com a população e propriedades é bastante reduzido, uma vez que o *jumper* não tem comprimento suficiente para chegar ao alcance dos mesmos. Entretanto, podem ocorrer acidentes no caso em que o rompimento do *jumper* foi provocado por aproximação de objetos externos, como exemplo vergalhões de construção civil e linhas de pipas.

Nas situações do item (b), geralmente os condutores caem no solo ao alcance de pessoas. Porém, como o condutor neutro também sofrerá a queda, há uma grande probabilidade do toque de condutores das fases com o mesmo, podendo acarretar valores altos de corrente de falta, com conseqüente atuação de equipamentos de proteção, desenergizando os cabos das fases. Todavia, poderão existir situações onde são gerados baixos valores de corrente de falta, como por exemplo, se nenhum condutor das fases tocar o condutor neutro ou materiais solidamente aterrados, ou mesmo a geração de altos valores de corrente de falta, porém de curta duração, em que poderão provocar apenas religamentos automáticos podendo deixar os condutores energizados caso o curto-circuito não seja permanente. Nessas duas últimas situações, o risco de acidentes à população e propriedades permanecerá até que o circuito seja definitivamente desenergizado para manutenção. As causas da queda de postes podem ser variadas, podendo citar queda de árvores, abalroamento de veículos ou até mesmo queda natural de poste em avançado processo de degradação.

Nas situações do item (c), se o condutor se rompe em um certo ponto entre os dois postes, separando-se em duas porções, cada porção cairá, sob o efeito da aceleração da gravidade, com uma extremidade restrita pelo isolador. Caso os condutores rompidos não fiquem suspensos por qualquer obstáculo eventualmente presente no local e não toquem num ponto solidamente aterrado, algumas situações podem ocorrer, admitindo-se que uma pessoa naturalmente não alcance a extremidade do condutor 3,0 metros acima do solo e que o condutor continue energizado. Considera-se como  $C$  o comprimento de um lado do condutor rompido no vão e  $h$  a altura do poste, como ilustrado na Figura 2.2, sendo dados em metro.

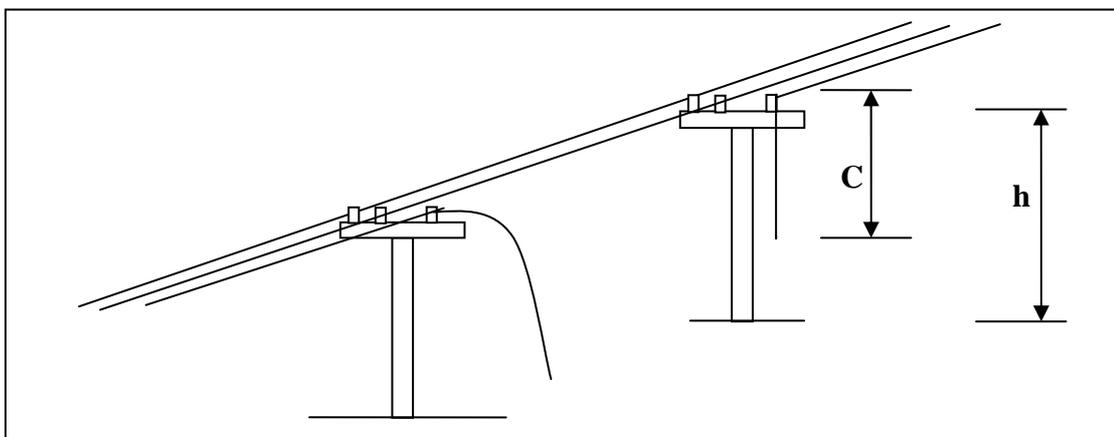


Figura 2.2: Desenho ilustrativo de rompimento de um condutor fase num vão

$$\text{I) } C \leq (h - 3,0)$$

Se o poste for de madeira, o risco é praticamente nulo para uma pessoa sofrer uma descarga no local tocando o poste, desde que o cabo não esteja tocando em algum condutor de aterramento eventualmente presente na parte externa do poste e que esteja ao alcance de pessoas. Porém, caso o poste seja de concreto o risco aumenta, uma vez que o mesmo é composto de ferragens em sua parte interna.

$$\text{II) } (h - 3,0) < C < h$$

Nesse caso o risco de uma pessoa sofrer uma descarga aumenta, uma vez que o condutor pode estar a seu alcance.

III)  $C > h$  e o cabo toca o solo, podendo ocorrer duas situações:

- o solo é adequadamente condutor gerando uma falta de baixa impedância que poderá acionar o sistema de proteção do alimentador desligando o trecho onde ocorreu a falta;
- o solo apresenta condutividade insuficiente gerando uma falta de alta impedância que não será capaz de acionar algum equipamento de proteção do alimentador.

Como o vão entre postes normalmente é maior que a altura de um poste, em qualquer situação de ruptura de condutor no item (c) uma extremidade, pelo menos, tocará o solo, caso essa extremidade não venha a ficar dependurada em qualquer obstáculo eventualmente presente no local (como a rede secundária, árvores, cabos de telefonia ou TV a cabo situados abaixo do neutro, etc.).

Além disso, num alimentador radial, a extremidade que toca o solo pode estar localizada no lado fonte ou lado carga do alimentador. No caso de rompimento de condutor tocando o solo do lado da carga, duas possibilidades podem ainda ocorrer:

- a falha do condutor ocorreu após o último transformador de distribuição da linha (final de rede), de forma que a extremidade do condutor do lado da carga do vão onde houve a ruptura está desenergizada (esse é um caso mais raro).
- a falha do condutor ocorreu antes do último transformador de distribuição da linha, de forma que a extremidade do condutor do lado da carga do vão onde houve a ruptura está energizada por uma tensão residual provinda do transformador (esse caso é o mais freqüente), reduzindo ainda mais as chances de operação de um equipamento de

proteção, uma vez que a tensão no condutor é bastante inferior à tensão nominal do alimentador.

Portanto, pode-se dizer que os maiores riscos do condutor rompido ficar energizado gerando riscos à população é quando o mesmo se encontra em um alimentador radial, caído ao solo no lado carga, numa superfície que apresenta um alto valor de resistência de contato com o condutor, desde que o mesmo não tenha tido contato com algum material solidamente aterrado antes de chegar ao solo.

### **2.5.2. Causas de rompimentos de condutores de circuitos primários de redes de distribuição**

Vários fatores contribuem para o rompimento de condutores de circuitos primários de redes de distribuição. Porém, primeiramente é feita uma abordagem sobre os fatores que influenciam na redução da rigidez mecânica do condutor, assim como as conseqüências dessa redução com relação à fadiga do material. Posteriormente, são apresentados fatores gerais presentes nas redes de distribuição que também contribuem para o rompimento de condutores.

#### **a) Redução da rigidez mecânica do condutor**

Uma das principais causas de rompimentos de condutores de circuitos primários de redes de distribuição é a redução de sua rigidez mecânica causada por:

- ✓ redução de seção transversal;
- ✓ defeitos gerados por ciclos de altas temperaturas.

Alguns defeitos geométricos que reduzem a seção transversal do condutor podem ser gerados pela ação de galhos de árvores (que além da ação mecânica sobre os fios do condutor, provocam abertura de arco elétrico, ainda que de pequena intensidade, em função da impedância do complexo árvore/solo), pela ação abrasiva de linhas revestidas com cerol (pequenos fragmentos de vidro colados na superfície de cordões usados para controlar pipas em vôo), pela ação corrosiva do meio sobre o condutor ou por uma descarga atmosférica que atingiu o condutor de forma a danificá-lo superficialmente. Considerando que as tensões mecânicas são função dos carregamentos aplicados sobre o componente, da geometria e do seu material, a redução da seção transversal ocasiona uma concentração de tensões mecânicas na região, o que pode reduzir a vida útil do condutor de alumínio naquele ponto.

A exposição do alumínio a altas temperaturas durante determinados períodos tem como exemplo uma descarga atmosférica, drenada pelo condutor, sem que este se rompa. Ainda,

uma conexão inadequadamente instalada pode apresentar superaquecimento e provocar estresse térmico no condutor. Nestas situações, a rigidez e o alongamento do material mudam. Com a mudança do alongamento do material ocorrem diferenciações de deformações específicas sob carga entre as regiões aquecidas e as regiões não afetadas. Logo, as deformações transversais também são modificadas produzindo variações nas seções transversais deformadas sob carga. Estas modificações de seção transversal equivalem a uma concentração de tensões.

Em [4] é mostrado que as tensões num condutor podem ser até quatro vezes e meia maiores do que seriam se não houvesse defeitos geométricos. Conseqüentemente, as tensões de fadiga também são amplificadas, podendo ocorrer uma falha por ruptura do condutor algum tempo depois da origem do defeito geométrico. Ou seja, uma árvore pode, em um certo momento, reduzir a seção transversal num ponto do condutor. Essa mesma árvore pode ser podada e, algum tempo depois, o condutor sofrer ruptura naquele ponto defeituoso.

#### **b) Outros fatores que contribuem para rompimento de condutores**

Em redes convencionais, a ocorrência de rompimento de condutores é mais freqüente, uma vez que estão sujeitas a toques diretos devido a objetos externos à rede como galhos de árvores, pássaros, antenas de TV, entre outros. Outra causa que contribui para a degradação desse tipo de rede é o cerol de pipas, principalmente nos meses de férias escolares, o qual pode provocar rompimento de fios do condutor, fragilizando-o ou até mesmo cortando-o integralmente.

A idade do circuito também afeta a freqüência de ocorrências de rompimento de condutores da rede primária, pois podem se encontrar em condição precária devido a várias incidências de descargas atmosféricas, sobrecargas temporárias, contato com árvores e vegetação, ocorrência de numerosos curtos-circuitos, degradação de cruzetas e isoladores, degradação de postes de concreto ou madeira e esforços mecânicos ao longo dos anos.

Outro fator que influi é a seção do condutor, pois quanto maior a seção mais difícil seu rompimento por esforço mecânico, uma vez que é composto por um número maior de fios que outro de menor seção. Sendo assim, derivações as quais são compostas, em geral, de condutores com as menores seções do alimentador (uma vez que transmitem menores quantidades de energia) tendem a sofrer maior número de rompimento de condutores.

Más conexões série e *shunt* em condutores do circuito primário também contribuem para o rompimento de condutores, uma vez que alteram sua rigidez mecânica devido ao aquecimento excessivo.

Outros fatores não controláveis também podem provocar rompimento de condutores, como abalroamentos de veículos em postes, descargas atmosféricas diretas nos condutores e contatos de objetos externos aos condutores.

É importante destacar ainda que numa pesquisa realizada pela CEMIG [5], através da análise de 276 rompimentos de condutores da rede primária num período de 20 meses de observação, foi verificado que o condutor 6 AWG de cobre utilizado naquela época em sistemas de distribuição e até hoje existente em muitas redes, apresentava um alto índice de rompimento quando comparado a cabos de alumínio, seja com ou sem alma de aço. Também foi verificada alta incidência de rompimento de condutores da rede primária causado por certos tipos de conexões. Além disso, de 276 rompimentos de condutores na rede primária, em 68 nenhum equipamento de proteção atuou, sendo que em 99% delas ocorreram em ramais protegidos por elos fusíveis. Dessas 68 ocorrências, 65 ficaram com a ponta dos condutores em contato com o solo com 57, energizadas. Ou seja, de 276 ocorrências de rompimentos de condutores da rede primária, em 20,6% os condutores ficaram energizados tocando o solo, uma vez que a proteção não operou. Apesar de o estudo ter sido realizado em 1977 e através de uma amostragem, as redes existentes atualmente em várias regiões de Minas Gerais, ainda apresentam muitas características daquela época e seus resultados são ainda significativos, comprovando de certa forma a teoria de rompimentos de cabos descrita anteriormente.

Com relação às redes de distribuição protegidas, pode-se citar testes realizados na concessionária *Pennsylvania Power and Light* (PP&L) [1], sendo que mais de 50% dos casos de condutores protegidos se rompiam devido a descargas atmosféricas, tendo em 2º lugar o contato com árvores, chegando-se a um total de 75% devido às duas causas, ressaltando-se ainda que nenhuma outra causa ultrapassou 5%, quando considerada individualmente.

### **2.5.3. Ações para redução de rompimento de condutores**

Diante das causas de rompimento de condutores descritas, várias ações podem ser realizadas para sua redução, agregadas a vários outros motivos como limitações operacionais, economia e segurança:

- substituição de redes nuas por protegidas ou isoladas;

- melhoria da qualidade e periodicidade da inspeção e manutenções preventivas de redes de distribuição;
- boa qualidade de conexões;
- substituição de condutores 6 AWG de cobre por equivalente de alumínio;
- substituição de condutores de alumínio de seção reduzida por de maior seção;
- melhoria da qualidade e periodicidade de poda de árvores e limpeza de vegetação na faixa;
- instalação de pára-raios em pontos de alteração de impedância de surto significativa;
- elevação de NBI em estruturas de distribuição;
- redução de sobrecargas, através de reconfigurações de ramais do alimentador, instalação de bancos de capacitores para compensação reativa, rearranjo de cargas, construção de novos trechos ou substituição de trechos que apresentem limitações de carregamento.

## **2.6. NATUREZA DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA**

O conhecimento da natureza das faltas de alta impedância é um fator primordial para a pesquisa do assunto no que se refere aos métodos de detecção, distinção e localização. Por isso, para cada tipo de falta de alta impedância, são descritas suas principais características, com ênfase em redes de distribuição convencionais, as quais apresentam condutores primários nus. O comportamento dessas faltas para redes de distribuição protegidas conduz a uma provável redução do nível de corrente de falta e da atividade do arco, quando comparado ao de redes de distribuição convencionais, uma vez que existe uma cobertura protetora no condutor sob falta, mas que pode sofrer deformações no momento de ocorrência do problema.

### **2.6.1. Faltas de alta impedância ativas série com condutores caídos ao solo**

A principal dificuldade do estudo de faltas de alta impedância é que poucos dados de oscilografias dessas faltas são registrados nos CODs, uma vez que os equipamentos de proteção de sobrecorrente operam com um nível de corrente acima das condições normais do sistema, momento no qual as oscilografias são disparadas.

Diante disso, as principais contribuições para o estudo da natureza dessas faltas foram providas de pesquisas direcionadas ao estudo do problema, onde testes propositais foram realizados, com suas respectivas medições.

Pesquisadores da *Texas A&M University* (TAMU) fizeram substanciais investigações sobre a natureza das faltas de alta impedância através de testes no campo provocando faltas com condutores caídos no solo, conduzidas no final da década de 70 [6]. Nessa pesquisa, segundo [1], 200 faltas propositais foram realizadas em 05 diferentes concessionárias, num total de 17 alimentadores com tensão de linha 12,5 kV, em diferentes localizações. Dos testes realizados, foram obtidos os seguintes resultados e conclusões, quanto a:

#### a) Magnitude da corrente

- a magnitude da corrente de falta é altamente influenciada pelas condições do local, podendo-se citar: tipo e umidade do solo e a presença de materiais na terra que estabelecem caminhos para a corrente, tais como canos metálicos de condução de água, cercas metálicas e raízes de árvores extensas. Valores típicos de corrente de acordo com a superfície da falta são apresentados na Tabela 2.1.
- há pouca relação entre a corrente de curto-circuito do local com a corrente de falta real quando o condutor fase não entra em contato com um caminho elétrico sólido como o neutro.

Tabela 2.1 – Valores típicos de corrente de faltas de alta impedância com condutores caídos ao solo

Superfície	Corrente de falta (A)
Asfalto seco	0
Concreto (não reforçado)	0
Areia seca	0
Areia molhada	15
Gramma seca	20
Pasto seco	25
Gramma molhada	40
Pasto molhado	50
Concreto (reforçado)	75

Pode-se verificar que em três tipos de superfícies (asfalto seco, concreto não reforçado e areia seca) a corrente medida foi zero.

É importante ainda destacar que, nesse tipo de falta de alta impedância, haverá a interrupção da corrente de carga a jusante do ponto de rompimento do condutor.

### **b) Características do arco em faltas de alta impedância**

O conhecimento da formação de arco elétrico, seu comportamento e sua influência na corrente de falta de alta impedância com condutor rompido caído ao solo é interessante frente ao assunto em questão, uma vez que vários métodos propostos de detecção são baseados na existência do arco elétrico nesses tipos de faltas.

De acordo com [6], William L. Beasley resume o comportamento do arco como se segue: se dois condutores separados por um pequeno espaço (*gap*) de ar têm uma pequena diferença de potencial entre eles, o ar age como um excelente isolador. Quando o campo elétrico entre os dois pontos é aumentado até o rompimento do isolamento do ar, ocorre a disrupção (*breakdown*) e uma corrente flui entre os condutores. A disrupção começa com um ou mais elétrons livres no espaço entre os condutores. Eles são acelerados no espaço pelo campo elétrico. À medida que aceleram, sua energia cinética aumenta, e quando eles adquirem energia suficiente, esses elétrons livres podem colidir ou ionizar moléculas de gases. Esses novos elétrons livres aceleram e ionizam outras moléculas e, então, o processo é repetido rapidamente em um curto espaço de tempo. Essa ionização rápida, chamada “avalanche”, gera a habilidade súbita do ar de conduzir corrente. Uma vez que a avalanche ocorre, a condução pode continuar em uma descarga contínua, chamada “arco”, se a potência disponível é grande e a resistência do circuito é baixa (como a dos condutores de alimentadores de distribuição). Tipicamente, um arco estável não é imediatamente formado quando a avalanche ocorre, mas várias ignições e reignições ocorrem num curto período de tempo até que o arco estável seja estabelecido. Essas disrupções momentâneas são chamadas de centelhas (*sparks*). Geralmente, em sistemas de corrente alternada (CA), arcos estáveis formarão e extinguirão em todos meios ciclos. Antes da formação e depois da extinção de um arco estável, vários “*sparks*” de curta duração se formam e se extinguem.

As faltas de alta impedância geralmente não oferecem condições para a formação de um arco estável. Um condutor caído pode saltar assim como seu arco ou um condutor pode somente fazer um contato ocasional com um galho de árvore. O arco associado a uma falta de alta impedância é por isso aleatório e transitório por natureza. Condições típicas existem onde o arco não é sustentado, mas sim intermitente.

Em particular, para faltas envolvendo contato com a terra, o ponto de contato pode incluir *gaps* com ar entre o condutor e a terra. Adicionalmente, há *gaps* de ar no próprio solo. O alto campo elétrico sobre uma curta distância causa a disrupção dos *gaps* de ar entre condutor e terra. Quando um arco se forma, ele cria uma grande porção de calor no ponto da falta. Esse aquecimento age para converter rapidamente qualquer umidade em vapor. Como o vapor rapidamente se expande, ele desloca o solo o qual rearranja as características de *gaps* de ar circunvizinhos ao condutor energizado. Como resultado, a magnitude da corrente no próximo arco o qual se forma pode ser substancialmente diferente daquele anterior.

O calor do arco é geralmente alto o bastante para fundir areia e sílica no solo tornando-se uma substância vitrificada. Como resultado, tal material vitrificado pode ser construído ao redor do condutor de tal maneira a efetivamente isolar o condutor da terra. Esse processo tende a reduzir a magnitude da corrente com o tempo. Entretanto, o material fundido é impuro e pode conduzir corrente. Na realidade, esse mesmo processo pode causar o aumento da magnitude da corrente com o tempo, pois a fusão de materiais sólidos dentro de um objeto sólido promove um caminho para o fluxo de corrente na superfície do material fundido, quando comparado com o caminho através do solo que tem numerosos *gaps* de ar.

Segundo [6], as características do arco de faltas de alta impedância foram estudadas em laboratório, com um centelhador, promovendo significativos entendimentos da natureza desse tipo de falta. R. H. Kaufmann, J. C. Page e J. R. Dunki-Jacobs descreveram as relações tensão-corrente para as características do arco para um centelhador CA 60 Hz, segundo [6].

O centelhador conduz aproximadamente quando a tensão aplicada atinge a tensão de disrupção ou de reignição, como mostrado na Figura 2.3. O arco se forma no tempo  $T_A$  quando a tensão aplicada é igual à tensão de reignição. Imediatamente, a tensão através do arco cai para  $E_{arc}$  e se mantém constante à medida que a corrente flui. A corrente atinge o valor máximo quando a tensão aplicada é igual à tensão do arco. Depois desse tempo, a corrente se reduz, mas a tensão através do arco se mantém constante. A corrente retorna a zero quando a área tempo-tensão Y é igual a área X. Dependendo das condições do *gap* de ar, o arco pode se restabelecer no próximo ciclo. Quando se observa a corrente associada ao arco, a forma de onda resultante consiste de picos distorcidos e não-senoidais em cada meio ciclo.

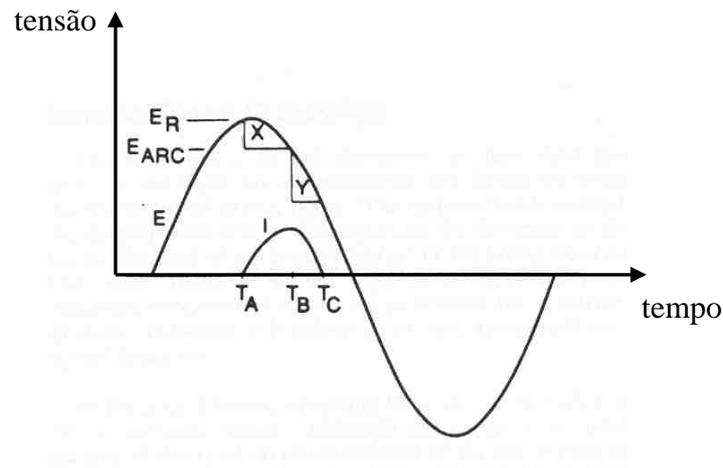


Figura 2.3: Relação entre corrente de falta de alta impedância e tensão numa falta com arco [1]

Portanto, a natureza da falta de alta impedância com condutor rompido caído ao solo apresenta um comportamento aleatório com relação à sua magnitude e forma, o qual é ditado basicamente pelas características do solo e a dinâmica do condutor na própria falta. Além disso, pode-se verificar pela Figura 2.3 a existência de freqüências não fundamentais na corrente de falta.

### c) Efeito da classe de tensão na corrente de falta com arco

É relatado em [1] que experiências mostraram que a maioria das faltas de alta impedância ocorre em tensões de distribuição de classe de 15 kV. O problema de detecção torna-se mais severo em tensões mais baixas, particularmente de 2 a 4 kV. Em baixa tensão, o problema se torna pior ainda, porém com provável redução do nível das lesões devido à faixa de tensão. Evidências indicam que o problema é menos severo em tensões de distribuição mais altas como 25 ou 34 kV, do ponto de vista de freqüência de ocorrência. Entretanto, faltas de alta impedância podem ocorrer em tais tensões, sendo que segundo [1], em algumas circunstâncias, podem ocorrer em tensões de transmissão, tal como 115 kV.

Acredita-se que a relação entre os níveis de tensão para a ocorrência de faltas de alta impedância tem a ver com o mecanismo da formação do arco. Em uma classe de tensão mais baixa, a corrente poderá fluir somente num pequeno percentual de meio ciclo, então restringindo a amplitude da corrente. Em tensão mais alta, o arco pode persistir por um longo período de meio ciclo, permitindo uma corrente total mais alta (Figura 2.4). Enquanto essa explicação não leva em conta todos os casos, ela descreve um padrão geral de relação entre o nível da corrente de falta e a classe de tensão, e a ocorrência de faltas de alta impedância.

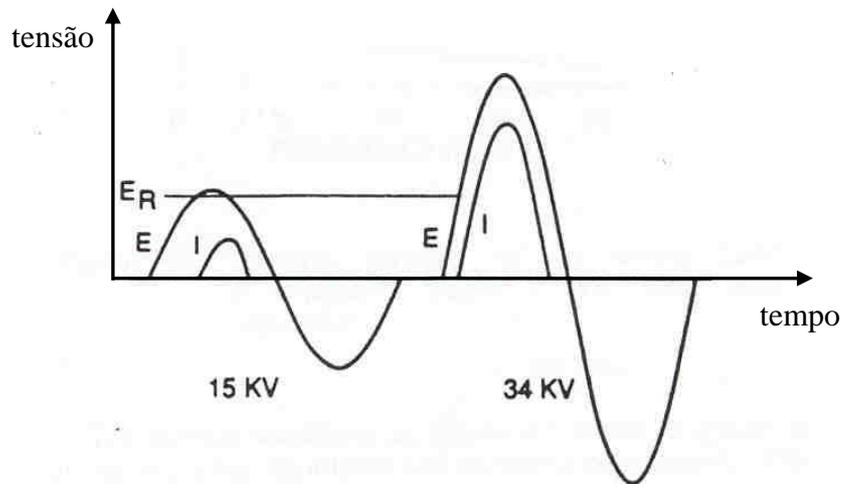


Figura 2.4: Relação da magnitude da corrente de falta de alta impedância com a classe de tensão [1]

#### d) Características no domínio do tempo e da frequência

As características no domínio do tempo de faltas com arco são muito influenciadas pelas características físicas da falta particular em questão. Em geral, pode-se observar um comportamento altamente aleatório na corrente associada com uma falta de condutor caído ao solo. Faltas podem durar indefinidamente com a magnitude da corrente geralmente crescendo ou decrescendo sobre o curso da falta.

Observou-se, de numerosos testes de falta, que a magnitude da corrente pode variar muito de um ciclo para o outro, e mesmo de um semiciclo para outro [1]. A corrente sobre a duração de uma falta exibe o que são aparentemente variações aleatórias de sua magnitude. Pode haver longos períodos nos quais nenhuma corrente de falta flui enquanto o condutor está sobre o solo.

Faltas com arco apresentam componentes harmônicas de ordem ímpar significativas. Isto tem levado pesquisas sobre o comportamento do 3º harmônico para indicação de uma falta. Entretanto, alguns tipos de cargas conectadas no alimentador também injetam harmônicos ímpares com comportamento altamente variável nas correntes de fase, conforme [1].

Atividade substancial em frequências não-harmônicas foi medida para faltas com arco, conforme [1]. Em adição às componentes fundamental e harmônicas, foram observados entre harmônicos e em frequências mais altas dentro de várias dezenas de kHz. Sabendo-se que a energia da falta é concentrada primariamente nas componentes fundamental e harmônicas, as componentes não-harmônicas e de altas frequências são muito menor em magnitude, mas ainda mensuráveis com um condicionamento de sinal apropriado.

Em testes realizados pela TAMU em 1978 e 1979 [6], em vários alimentadores de concessionárias dos EUA, com condutores energizados caídos ao solo, verificou-se significativa atividade de alta frequência na corrente de falta com relação à condição normal do sistema, com aumentos em pontos onde o arco começa a se formar (geralmente no pico de tensão do sistema onde se formam os *sparks*) e em sua extinção (geralmente quando a tensão do sistema passa por zero). Além disso, verificou-se a natureza intermitente do arco, sendo que a corrente fluía por alguns semiciclos, interrompia-se por vários segundos e reiniciava por poucos semiciclos. Verificou-se ainda que a magnitude da componente de alta frequência está diretamente relacionada com a magnitude instantânea da corrente no arco ou no *spark*.

Tipicamente, pouco efeito na forma de onda da tensão foi observado nos testes citados acima, exceto para maiores magnitudes de corrente de falta.

Sabendo-se da natureza aleatória do arco associado a essas faltas (Figura 2.5), não é possível obter um espectro de frequência preciso de um arco e generalizar o espectro para todos os casos. Entretanto, é útil analisar um espectro aproximado ou típico.

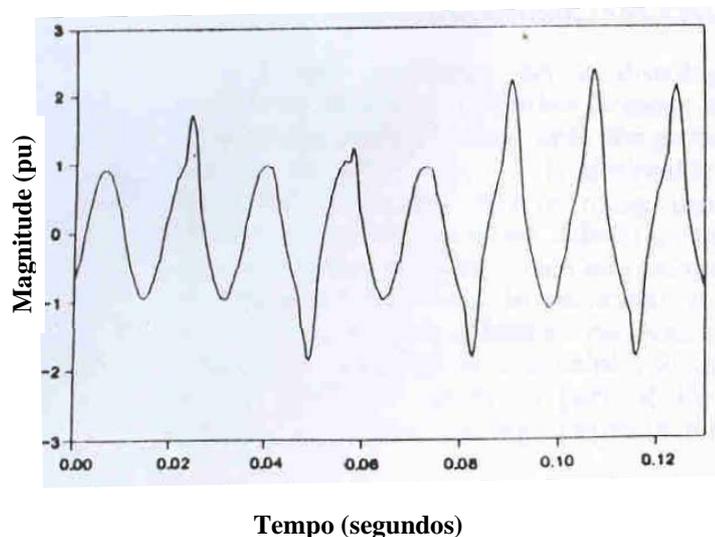


Figura 2.5: Comportamento aleatório da corrente de falta de alta impedância com arco [1]

No domínio do tempo, uma falta com arco pode ser modelada como um trem de pulsos periódicos. Embora esse modelo não seja preciso por causa das características aleatórias do arco, ele dá uma luz para o modelo no domínio da frequência. A transformada de Fourier de um trem de pulsos corresponde a uma função  $\text{sen}(x)/x$ . Desta maneira, o arco gera componentes de frequência numa grande banda de frequências ao longo do espectro.

A duração e magnitude de cada pulso podem variar de acordo com o curso de uma falta de condutor caído particular. Quando se faz a média de vários espectros sobre vários segundos, o resultado é uma curva amortecida a qual diminui com a frequência  $f$  numa distribuição  $1/f$  (Figura 2.6).

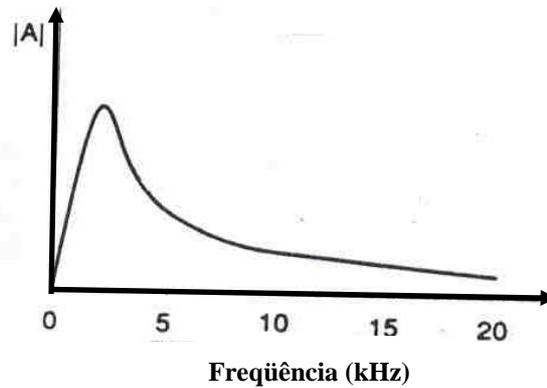


Figura 2.6: Espectro de frequência da corrente de falta de alta impedância com arco [1]

#### e) Desequilíbrio de tensão

As faltas ativas série e passivas com rompimento de condutor, independentemente se há toque com objeto ou solo de alta impedância, produzem um desequilíbrio de tensão a jusante do ponto de rompimento, o qual pode ser utilizado como um indicador desse tipo de falta de alta impedância.

Segundo [1], em outubro de 1975 outras séries de faltas foram conduzidas pela PP&L, para verificar o desequilíbrio de tensão em condições de faltas monofásicas com condutores abertos, uma vez que cálculos indicaram que desequilíbrios significativos ocorriam sob condições de falta. Em particular, parecia que a tensão de seqüência zero poderia ser um indicador desse tipo de falta. Um circuito de 12 kV foi arranjado para a realização das faltas e as medições indicaram que as tensões de seqüência zero calculadas poderiam ser verificadas pelos dados dos testes. Os dados indicaram que, para condições de teste, um relé de tensão poderia ser ajustado para detectar a mudança da tensão de seqüência zero entre condições normais e de falta, e iniciar a interrupção do circuito. Também foram observadas nos testes mudanças na magnitude de componentes de frequência, mudanças na relação de ângulos de fase de corrente e mudanças na magnitude de corrente residual.

A PP&L desenvolveu um programa para análise de faltas de distribuição chamado de *Distribution Fault Analysis Program*, o qual promoveu um modelo computacional para um circuito de distribuição. O programa permitiu a modelagem completa de um alimentador e cálculos dos parâmetros em regime permanente sobre uma variedade de condições faltosas e não faltosas. Uma variedade de cálculos foram realizados para ganhar experiência com o programa, investigar a sensibilidade à impedância de falta e vários parâmetros do circuito, assim como adquirir um sentimento das mudanças características do circuito durante condições de falta. A operação do modelo indicou que mudanças significativas estavam presentes nas tensões de seqüência zero e negativa a jusante da falta com condutor aberto, e de correntes de seqüência zero e negativa a montante da falta com condutor aberto.

### **2.6.2. Faltas de alta impedância ativas série com condutores tocando objetos externos**

Um exemplo típico desse tipo de falta de alta impedância é o rompimento de condutor suspenso e tocando em árvores, na própria estrutura da rede de distribuição.

Nesse tipo de falta também pode haver a geração de arco elétrico e a magnitude da corrente dependerá basicamente da impedância do objeto próximo ao condutor energizado. Além disso, o desequilíbrio de tensão a jusante do ponto de rompimento tem a mesma característica daquela apresentada no item 2.6.1-e.

O risco à população também está presente, uma vez que alguma pessoa pode ser eletrocutada devido à tensão de toque, principalmente em postes de concreto com ferragens expostas e saídas de pessoas de veículos onde o cabo condutor esteja tocando o mesmo (situação típica de abalroamentos de veículos).

### **2.6.3. Faltas de alta impedância ativas shunt**

Esses tipos de falta de alta impedância são caracterizadas pelo não rompimento do condutor energizado, mas o mesmo tocando ou próximo a algum objeto de alta impedância, como é o caso de isoladores com defeito e quebra parcial de postes. Sendo assim, nesse tipo de falta não há interrupção da corrente de carga na fase sob falta.

A magnitude da corrente de falta nesses casos também dependerá da impedância do objeto próximo ao condutor energizado. Poderá ainda haver geração de arco elétrico, mas não haverá desequilíbrio significativo de tensão entre as fases.

Apesar desse tipo de falta não apresentar impacto significativo no sistema local, pode significar grande risco em áreas com alto adensamento populacional. Ocorrência muito freqüente até os dias de hoje é o toque acidental de antenas de TV por pessoas leigas ao assunto e de linha de pipas com cerol por crianças, em condutores nus energizados, sendo que em muitos casos houve graves lesões e até mesmo morte.

#### **2.6.4. Faltas de alta impedância passivas**

Esse tipo de falta pode ser mais freqüente em redes de distribuição protegidas, onde os cabos fases ficam suspensos por um cabo mensageiro de aço isolado entre si por acessórios isolantes e quando há um rompimento de condutor, o mesmo pode ficar suspenso sem tocar em qualquer objeto ou solo.

Nessa condição, haverá a interrupção da corrente de carga, assim como um desequilíbrio de tensão significativo entre fases à jusante do ponto de rompimento do condutor. Porém, não existirá corrente de falta e conseqüentemente também não haverá arco elétrico com longa duração.

### 3. MÉTODOS DE DETECÇÃO E MITIGAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Vários métodos de detecção de faltas de alta impedância têm sido desenvolvidos ao longo das últimas três décadas, podendo ser divididos conforme a grandeza monitorada: corrente, tensão ou tempo de propagação de pulsos aplicados ao alimentador.

Dessa forma, são apresentados a seguir vários métodos, assim como alguns equipamentos desenvolvidos para o propósito de proteção contra faltas de alta impedância. São apresentados ainda os problemas operacionais associados a cada um e sua abrangência na detecção desses tipos de falta.

Além disso, vários métodos e ações para a redução da ocorrência das faltas de alta impedância também são abordados, o que também contribui para a melhoria da segurança pessoal nesse contexto.

#### 3.2. MÉTODOS DE DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE CORRENTE

A partir da década de 70, projetos de pesquisa apoiados por concessionárias, fabricantes e universidades, procuraram intensivamente por características típicas de faltas de alta impedância as quais poderiam ser usadas para construção de novos equipamentos.

Significativos esforços efetivados por concessionárias como *Rochester Gas and Electric* (RG&E) e PP&L resultaram num maior entendimento de faltas de alta impedância [1]. Essas investigações apoiadas pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) resultaram em vários conceitos teóricos para desenvolvimento de novos equipamentos, através de pesquisas realizadas pela *Power Technologies Inc.* (PTI), *Hughes Laboratories* e TAMU. Os esforços desses cinco grupos resultaram em vários métodos de detecção propostos, desde análise de componente de seqüência e harmônica até análise do espectro de alta freqüência.

Em janeiro de 1977, a TAMU iniciou os estudos com faltas de alta impedância, patrocinada pelo EPRI. Vários projetos foram realizados, tendo como objetivo inicial o entendimento das faltas de alta impedância e o desenvolvimento de modelos para descrevê-las. Essas pesquisas levaram ao desenvolvimento de algoritmos e equipamentos de detecção,

os quais foram testados em laboratório e em campo em vários alimentadores de concessionárias americanas.

A seguir são apresentados os principais métodos de detecção das pesquisas mencionadas, suas características e respectivos comentários a respeito de cada um.

### **3.2.1. Detecção por monitores de amplitude e ângulo de fase da terceira harmônica de corrente**

De acordo com [1], a *Hughes Aircraft Company* investigou o uso da componente de 3º harmônico das correntes de fase como um possível indicador de faltas de alta impedância, sob o patrocínio do EPRI, através do projeto 1285-2.

O trabalho foi baseado em vários testes de faltas propositalis de condutores caídos envolvendo sistemas com transformadores de distribuição ligados em estrela aterrada e em delta no lado primário, sendo necessária a utilização de dois detectores separados, um para cada tipo de sistema.

O princípio utilizado baseava-se no comportamento não-linear da corrente de arco elétrico, presente durante uma falta de alta impedância, gerando considerável conteúdo de 3º harmônico na corrente sob falta.

Um detector, para utilização em sistemas com transformadores ligados em estrela aterrada no lado primário, era o indicador de um súbito deslocamento de fase da componente de 3º harmônico da corrente de uma das fases com relação às outras duas. Esse deslocamento indicava a existência de uma falta de alta impedância.

O critério para operação de *trip* desse detector era composto pelo seguinte conjunto de eventos:

- ✓ deslocamento mínimo de 15° da componente de 3º harmônico da corrente de uma fase com relação às correntes de 3º harmônico das outras duas fases;
- ✓ aumento da corrente em uma fase de no mínimo 15 A, de modo a evitar operações incorretas em condições normais do sistema;
- ✓ as duas condições acima persistirem no mínimo 5 segundos.

Um outro detector, para utilização em sistemas com transformadores de distribuição ligados em delta no lado primário, era o indicador do aumento substancial da magnitude da componente de 3º harmônico da corrente, uma vez que os níveis dessas componentes são muito baixos nesse tipo de sistema e seu deslocamento de fase torna-se muito difícil de medir

nesse caso. Isso porque nesse tipo de ligação, os transformadores atuam como filtros dessa harmônica em relação à carga (lado secundário), fazendo com que baixos níveis da componente de 3º harmônico da corrente apareçam numa rede operando em condições normais quando comparados com uma falta de alta impedância com presença de arco.

O critério para operação de *trip* desse detector era composto pelo seguinte conjunto de eventos:

- ✓ aumento percentual da magnitude da corrente de 3º harmônico atingindo um valor pré-determinado;
- ✓ aumento da componente fundamental da corrente de uma fase no mínimo 15 A;
- ✓ as duas condições acima persistirem no mínimo 3 segundos.

Para ambos os métodos, os testes em laboratório tiveram resultados positivos. Então foram construídos protótipos dos detectores, testados e instalados em alimentadores de concessionárias, tendo também resultados positivos na condição de faltas propositalis, ressaltando-se que o protótipo utilizado para detectar o deslocamento de fase da componente de terceira harmônica da corrente teve três falsos *trips* num período de um ano. Porém, não houve ocorrência natural de faltas de alta impedância no período de testes.

### **3.2.2. Detecção de componentes de seqüência não características nas harmônicas de corrente**

Em um sistema equilibrado, se as correntes de fase forem decompostas em componentes de seqüência, as componentes de seqüência das frequências harmônicas com valores diferentes de zero são chamadas de componentes características.

Assim, se a corrente na frequência fundamental for decomposta em componentes de seqüência, apenas a componente de seqüência positiva será diferente de zero e neste caso a componente de seqüência positiva é chamada de componente característica do 1º harmônico. Da mesma forma, para o 3º harmônico tem-se apenas a componente de seqüência zero e então a componente de seqüência zero será chamada de componente característica do 3º harmônico. Analogamente, a componente de seqüência negativa será chamada de componente característica do quinto harmônico. A Tabela 3.1 resume essa análise.

No projeto EPRI 1285-1, a PTI examinou o comportamento de correntes de harmônicas ímpares de baixa ordem. Baseada na análise do comportamento desses harmônicos, durante faltas propositalis com condutores caídos no solo e condições normais de operação do sistema,

a PTI sugeriu a detecção dessas faltas pelo monitoramento de componentes simétricas não características das correntes harmônicas de 1ª, 3ª e 5ª ordem.

Tabela 3.1 – Componentes características e não características de determinadas frequências harmônicas

Harmônico	Componentes de seqüência		
	Positiva	Negativa	Zero
1	caracter	não caracter	não caracter
3	não caracter	não caracter	caracter
5	não caracter	caracter	não caracter

Considerando que as componentes de seqüência não características das correntes harmônicas de 1ª, 3ª e 5ª ordens são zero com o sistema em perfeitas condições de equilíbrio, os pesquisadores tomaram como indicador de faltas de alta impedância as componentes de seqüências não características dessas harmônicas, uma vez que verificaram o aparecimento dessas componentes em faltas de alta impedância devido ao desequilíbrio.

Apesar do sistema de distribuição apresentar desequilíbrio em condições normais de operação, em [3] é descrito que em um artigo de S. J. Balser são apresentadas medições de componentes não características desses harmônicos em um sistema de distribuição em operação normal, mostrando que em muitos casos o desvio padrão dessas componentes é pequeno em relação à média.

Para monitorar todas essas grandezas simultaneamente, a PTI decidiu combiná-las matematicamente para formar um número para uso no sistema de proteção. Esse número foi chamado de estatística  $Z$  e é calculado da seguinte forma:

$$Z = (X - Y)^T [P]^{-1} (X - Y)$$

onde,

$X$  = vetor das componentes não características (12 x 1), podendo conter números complexos;

$Y$  = média de várias amostras anteriores do vetor  $X$ ;

$[P]$  = matriz de covariância dos elementos do vetor  $X$ .

Para evitar falsos *trips* nesse método de detecção, foi necessário estabelecer um limiar de  $Z$ , sendo que o critério para operação de *trip* era que no mínimo 4 amostras sucessivas excedessem o limiar de  $Z$ .

Os pesquisadores da PTI indicaram uma eficiência do método de 40% na detecção de faltas de alta impedância, baseados nos resultados computacionais. Além disso, observaram que o algoritmo poderia detectar a abertura de um elo fusível como uma falta de alta impedância, uma vez que cada evento desse tinha o efeito de alterar o equilíbrio entre as três fases. Diante da baixa eficiência de detecção, a técnica foi abandonada posteriormente, segundo [1].

### 3.2.3. Detecção do fasor da corrente de 3º harmônico

A *Nordon Research and Development* desenvolveu um detector o qual utilizava o ângulo de fase da corrente de falta de 3º harmônico com relação à tensão fundamental como indicador de condutor caído ao solo.

O desenvolvimento foi baseado na premissa de que a corrente gerada por uma falta de condutor caído ao solo com arco produz uma corrente de 3º harmônico com uma relação única de fase com referência à tensão de fase sob falta. Como o arco está relacionado com a tensão do sistema, verificou-se que o ângulo de fase da componente de 3º harmônico da corrente de defeito de alta impedância é sempre o mesmo com relação à tensão de fase.

Para encontrar somente a corrente de falta de 3º harmônico, sem a contribuição da corrente normal de 3º harmônico do sistema, uma média do fasor do 3º harmônico é calculada e armazenada. Então, quando cada novo fasor é calculado, a média armazenada é subtraída vetorialmente pelo mesmo.

O critério para operação de *trip* desse detector era composto pelo seguinte conjunto de eventos:

- ✓ o ângulo do fasor resultante da corrente de 3º harmônico deve estar na mesma direção que o ângulo da tensão de fase sob falta;
- ✓ a magnitude do fasor é maior que o nível de limiar pré-determinado, ajustado de tal forma que variações graduais do nível de harmônicos normal do sistema não sejam indicadas como falta.

Mudanças normais do sistema como operação de banco de capacitores, operações de fechamento e abertura, mudanças de *taps* de reguladores de tensão, podem causar mudanças súbitas na corrente de 3ª harmônica. Porém, segundo os autores, essas mudanças produzirão diferentes mudanças fasoriais que aquelas causadas por faltas decorrentes de condutores caídos ao solo, sendo possível distinguir os dois tipos de mudanças.

### 3.2.4. Detecção por algoritmo de energia

No projeto EPRI 1285-3 [6], os pesquisadores desenvolveram um algoritmo de energia, o qual detectava um aumento súbito no nível de corrente de uma dada frequência ou banda de frequência. O algoritmo de energia foi inicialmente aplicado em uma corrente de alta frequência (2 a 10 kHz) e posteriormente para correntes não harmônicas e harmônicas de baixa frequência.

Os pesquisadores basearam-se em observações feitas durante faltas propositalmente com condutores caídos ao solo com arco, as quais produziam um aumento significativo de corrente de alta frequência, devido à característica de resistência não-linear da falta enquanto o arco existia, geralmente sendo intermitente. Também observaram que outros eventos normais do sistema produziam aumentos similares, porém sempre num tempo limitado a poucos ciclos. Isso indicou que o monitoramento do aumento da atividade sustentada de alta frequência da corrente poderia ser usado como indicador dessas faltas, além do tempo que é o fator discriminante para evitar falsos *trips*.

O princípio dessa detecção é que faltas de alta impedância com arco são responsáveis pela injeção de altas frequências na corrente de falta enquanto o arco existir, geralmente sendo intermitentes. Sua distinção com operações normais do sistema como chaveamento de bancos de capacitores, operação de chaves, operação de disjuntor, é que essas últimas, apesar de também injetarem altas frequências na corrente do sistema, são de curta duração, da ordem de alguns ciclos. Essa teoria foi verificada no laboratório com o auxílio de um centelhador e em campo, através de testes propositalmente. Dessa forma, o tempo é um fator importante para esse método de detecção, pois distingue entre uma falta de alta impedância com arco e operações normais do sistema. O indicador do método de detecção é a variação da atividade de componentes de alta frequência na corrente de fase acima da condição normal do sistema.

Sob condições normais, o algoritmo de energia se mantém no estado “Normal”. Então, a média do nível de energia de uma frequência particular é calculada e armazenada, sendo a energia calculada como a soma dos quadrados dos valores amostrados de um ciclo de 60 Hz. A seguir é descrita a lógica adotada para indicação do estado do sistema:

- 1º) calcula-se o nível de energia médio de componentes de alta frequência (2 a 10 kHz) em cada ciclo de 60 Hz para condições normais do sistema;
- 2º) a cada ciclo calcula-se novamente o nível de energia e se compara com a média. Se o nível de energia desse ciclo é maior que 1,5 vezes a média, o

algoritmo considera a ocorrência de um evento e o nível de energia é incorporado à média. Caso contrário, o nível de energia é incorporado à média e calcula-se o nível de energia do outro ciclo sem considerar a ocorrência de um evento.

- 3º) No caso da indicação de um evento, calcula-se o nível de energia do próximo ciclo e se o mesmo é maior 1,5 vezes que a média, é dado um incremento de contagem do evento e assim sucessivamente até o término de um tempo pré-determinado. Caso contrário, a consideração do evento continua e calcula-se o nível de energia do próximo ciclo e volta-se ao início desse passo.
- 4º) Após o término de um tempo pré-determinado, verifica-se quantos incrementos foram contados naquele intervalo. Caso o número de incrementos seja superior a um valor pré-determinado, o algoritmo acusa a falta. Caso contrário volta-se ao 1º passo, já não considerando um evento.

Dois protótipos foram construídos, sendo um para testes em laboratório com a utilização de centelhador e outro para testes no campo. O protótipo aplicado para os testes em laboratório obteve resultados excelentes, atuando para todas as faltas de alta impedância com arco modeladas, segundo [1]. Já o protótipo aplicado no campo foi instalado em um alimentador tipicamente residencial, durante um período de 3 meses, ressaltando-se que os bancos de capacitores foram retirados de serviço durante o período de testes. Segundo [6], durante esse período nenhuma ocorrência natural de falta de alta impedância com arco foi relatada, e não houve nenhuma operação de falso *trip*.

Segundo [1], o algoritmo de energia também foi aplicado posteriormente em harmônicos ímpares, pares e não-harmônicos numa faixa abaixo de 1200 Hz. O desempenho do algoritmo aplicado a esses harmônicos, quando testado com dados de faltas propositalmente com condutores caídos ao solo foi satisfatório, especialmente para correntes de harmônicas pares e não-harmônicas.

Esse método de detecção apresentava as seguintes limitações:

- ✓ bancos de capacitores ligados em estrela aterrada atenuam os ruídos de alta frequência gerados pela falta de alta impedância com arco, pois drenam grande parte desses ruídos para a terra, reduzindo a confiabilidade do método de detecção;

- ✓ faltas de alta impedância com arco com nível de corrente muito baixo (da ordem de 10 A) não geram sinais de alta frequência suficientes para serem detectadas com confiabilidade;
- ✓ faltas de alta impedância com condutores rompidos, porém sem tocar o solo, não podem ser detectadas por esse método, pelo mesmo motivo acima exposto;
- ✓ o ruído gerado pela falta de alta impedância com arco pode ser transmitido para outros alimentadores ligados no barramento da SE, o que pode gerar falsos *trips* nos mesmos com a aplicação desse método.

Ressalta-se, porém, que esse método de detecção aplica-se a todas as faltas de alta impedância com arco e não só para aquelas com condutores caídos ao solo, tendo como exemplo galhos de árvores tocando condutores nus, não distinguindo um tipo de falta do outro.

Além disso, alguns tipos de carga que apresentam ruídos significativos podem dificultar a detecção de faltas de alta impedância com arco por esse método.

### **3.2.5. Detecção por algoritmo de aleatoriedade**

Na maioria das faltas com condutor caído ao solo, a corrente é intermitente, devido ao comportamento do arco. Isso se dá porque, em geral, o arco dura um curto período de tempo que varia de alguns ciclos a algumas dezenas de ciclos e, a seguir, nenhuma corrente é gerada num período de tempo similar. Mesmo durante o período com arco, há geralmente grandes variações da magnitude de corrente de um ciclo para outro. Este fenômeno dificulta a performance de muitos algoritmos propostos.

Pesquisadores da TAMU desenvolveram um algoritmo com o propósito de não ser afetado por este comportamento aleatório, o qual poderia usar esse tipo de comportamento como indicador de falta com condutor caído ao solo com arco [1, 8].

O algoritmo utiliza os mesmos níveis de energia do algoritmo de energia, assim como a metodologia de cálculo de sua média, com a diferença básica que neste algoritmo a falta poderá ser indicada de acordo com os critérios abaixo:

- o conta-se o número de transições de arco (alto nível energia) para não-arco (baixo nível de energia), durante um curto período de tempo (aproximadamente 30 ciclos);

- o conta-se o número de ciclos adjacentes que apresentam uma diferença de energia de outros de uma certa quantidade (como no algoritmo de energia)
- o se um dos contadores excede seu limiar até o término do tempo pré-estabelecido, o algoritmo indica estado “Falta”.

Segundo [1], o algoritmo foi testado apenas em laboratório para corrente de alta frequência (2-6 kHz), tendo boa performance na maioria dos casos, porém não atuando para os dados de faltas de alta impedância com pouca atividade de alta frequência. O algoritmo ainda distinguiu eventos normais do sistema como “Distúrbios”.

### **3.2.6. Detecção de taxa de variação**

O princípio desse método é o uso de um detector de taxa de variação de corrente para faltas de condutores caídos ao solo, uma vez que as mudanças de corrente devido às faltas de alta impedância são rápidas, enquanto que o comportamento de correntes de carga normal do sistema tendem a sofrer variações lentas, comparando as duas situações.

Embora nunca construído, o detector proposto poderia monitorar um sinal proporcional ao valor eficaz da corrente de neutro. Esse sinal poderia passar por um filtro “passa-alta”, o qual permitiria somente a passagem de sinais que apresentassem rápidas variações de magnitudes por unidade de tempo, bloqueando sinais que apresentassem variações lentas. A saída desse filtro poderia ser monitorada e uma falta seria sinalizada se a saída excedesse um limiar [1].

### **3.2.7. Detecção por análise espectral de arco**

Pesquisadores da TAMU, no projeto EPRI 1285-3 [6], investigaram o espectro da corrente de falta produzido por uma falta com condutor caído ao solo. Eles descobriram que o espectro no domínio da frequência de um arco é único, o qual produz uma distribuição  $1/f$  mostrada na Figura 2.5 do Capítulo 2. Pela média do espectro de frequência de um determinado número de ciclos, uma distribuição  $1/f$  pode ser vista durante uma falta com arco. Enquanto certas cargas do sistema podem apresentar vasta banda de ruído, o ruído é repetitivo a cada ciclo, o que causa certas frequências discretas, ao invés de um amortecimento da característica de uma distribuição de frequências de condutor caído ao solo com arco.

Calculando esta média do espectro de frequência enquanto o algoritmo de detecção é processado, o espectro de frequência pode ser examinado sempre que o algoritmo de detecção indicar uma falta [1]. Neste caso, se o espectro de frequência indicar que o evento o qual

causou a operação do algoritmo de detecção não é semelhante àquele caracterizado por uma falta com arco, o sinal de *trip* pode ser inibido. Desta forma, a segurança do sistema contra falsos *trips* pode ser melhorada.

### 3.2.8. Técnicas de extração de corrente de falta

Pesquisadores da TAMU propuseram o uso da discriminação entre sinais de corrente com variações rápidas e sinais de corrente com variações lentas, segundo [1]. Eles examinaram duas técnicas para extração da corrente de falta da corrente total da linha, baseadas em amostras ponto-a-ponto.

A primeira técnica simplesmente subtrai ponto-a-ponto a amostra de um ciclo de seu anterior. Sob condições normais, o resto da diferença deverá ser muito pequeno, uma vez que a corrente nessa situação apresenta variações lentas. Se o resto apresentar um valor substancial, provavelmente, alguma coisa ocorreu no sistema. Utiliza-se o tempo como um fator discriminatório, dessa forma. Se a corrente vai de um nível estável para outro nível estável, nenhuma falta é indicada, pois provavelmente tenha ocorrido algum chaveamento no sistema. Se por outro lado, o resto continua a flutuar até um certo grau, a falta é indicada.

A segunda técnica, bem similar à primeira, calcula o espectro de frequência do sinal de corrente em cada momento. Usando essa informação espectral, essa técnica tenta prever quais as amostras de corrente no próximo ciclo. Se houver uma diferença pequena entre a amostra do próximo ciclo e a prevista, o sistema é assumido normal. Se há uma grande discrepância sustentada, a falta é indicada.

### 3.2.9. Detecção por análise do padrão de centelhamento

Esse método considera o fenômeno de geração de *sparks* numa falta de alta impedância com condutor caído ao solo relacionado à onda de tensão de fase do sistema sob falta, num padrão repetitivo. A corrente começa a fluir quando a tensão do *gap* de ar entre o condutor e a terra atinge um valor o qual ocasiona a disrupção e continua a fluir até que a tensão no ponto de falta não consiga manter o fluxo de corrente através do *gap*, valor esse próximo à passagem por zero. Então, esse padrão é repetido no próximo semiciclo da onda de tensão. Esse centelhamento causa uma atividade de alta frequência. Esta seqüência de eventos produz uma atividade de alta frequência a qual pode ser relacionada à tensão de fase.

Então, pesquisadores da TAMU perceberam que procurar um nível de aumento da atividade em porções do período de tensão poderia distinguir faltas com arco de outros eventos os quais podem causar um aumento repentino na atividade de alta frequência. Assim, o fator de atuação é a correlação positiva do padrão de centelhamento e o ângulo de fase da tensão.

### **3.2.10. Análise de carga**

Em pesquisas realizadas com representantes de várias concessionárias, ficou claro que a grande preocupação dos mesmos é a detecção de condutores rompidos caídos ao solo e não de outros tipos de faltas de alta impedância, uma vez que os acidentes com o público ocorrem com mais frequência nesse tipo de situação.

Os métodos de detecção por monitoramento de corrente com arco elétrico não são capazes de detectar faltas de alta impedância com condutores rompidos caídos ao solo do lado da carga. Já aqueles que incorporam mecanismos para avaliar variações súbitas de carga ou grau de desequilíbrio podem ser sensíveis a esse tipo de falta. Além disso, todos esses métodos apresentam eficiências diferentes e nenhum, isoladamente, é capaz de detectar com confiança e segurança, todas as faltas de alta impedância com condutor rompido.

Sendo assim, a exigência pela segurança dos métodos, somente atuando para faltas desse tipo e evitando falsos *trips* que podem também levar a grandes riscos de acidentes, levou os pesquisadores da TAMU a desenvolverem um algoritmo de análise de carga para monitorar padrões da corrente de carga e complementar os algoritmos de detecção por corrente de condutor rompido [1, 8].

O princípio do algoritmo é baseado no fato de que, se um condutor é rompido, algum percentual da corrente total do alimentador é perdido. Então, uma seqüência de eventos em que há uma perda repentina de corrente de carga seguida por uma indicação de arco de um ou mais algoritmo de detecção de falta com arco daria maior segurança à detecção da falta com condutor rompido caído ao solo.

### **3.2.11. O Relé de Terra de Relação**

Em 1977 a PP&L, juntamente com a *Westinghouse*, iniciou estudos avaliando vários esquemas de detecção de faltas de alta impedância, dentre eles a do Relé de Terra de Relação

(*Ratio Ground Relay* – RGR), onde a sensibilidade do mesmo varia inversamente proporcional ao carregamento do alimentador.

Esses estudos foram conduzidos sobre quatro projetos de RGR com relé eletromecânico [11], usando o conceito de disco de indução com enrolamentos de operação e restrição. O torque para fechamento do contato é produzido pela corrente residual ( $3I_0$ ) no enrolamento de operação. O torque para abertura do contato é produzido pela combinação corrente de fase de seqüência positiva e/ou negativa no enrolamento de restrição. Os projetos foram modelados com técnicas digitais e os protótipos foram construídos através de testes em computador analógico da *Westinghouse* o qual modelou um dos circuitos da PP&L. Para especificar os ajustes de *taps* foi necessário examinar o desequilíbrio de carga normal, pois um *trip* devido à abertura de um elo fusível numa derivação seria indesejável. Um esquema RGR foi escolhido conforme os requisitos. O elemento de restrição respondia a  $|I_1|^2 - |I_2|^2$  acoplado com o elemento de operação  $|3I_0|^2$ .

Através de testes realizados, segundo [3], observou-se que a performance do relé para uma falta fase-terra dependia do nível de carga, localização da falta ao longo do alimentador e da impedância da falta. Como o elemento restritivo depende do nível da carga, o seu limite de operação varia ao longo do tempo. Considerando que um sistema de distribuição real possui correntes desequilibradas, o relé foi projetado para operar em três níveis de desequilíbrio diferentes, porém fixos. Porém, como o nível de desequilíbrio de corrente é variável ao longo do tempo, existe a possibilidade de falsa operação do relé.

Relés RGR foram instalados em 6 circuitos de distribuição de 12 kV da PP&L por um período de 18 meses até 1985. Porém, segundo [1] nenhuma falta de alta impedância ocorreu em qualquer circuito durante o período de monitoramento, ressaltando-se que os relés reagiram apropriadamente a desequilíbrios normais do sistema.

A *Westinghouse* introduziu o relé no mercado em 1981, o qual foi comprado e instalado em 14 concessionárias. Em 1988, foi realizada uma pesquisa com essas concessionárias, sendo que apenas uma colocou o relé em total operação para *trip* e bloqueio, e as outras concessionárias colocaram o relé para avaliação somente. Entretanto, foi verificado pelas concessionárias, um inaceitável número de falsas operações do relé, motivo pelo qual várias concessionárias os retiraram de serviço e algumas os deixaram, no máximo, no modo alarme. Essas experiências mostraram que o uso deste tipo de relé requer, mesmo como monitor:

- ✓ equilíbrio freqüente de correntes de fase;

- ✓ esquemas agressivos contra toques de árvore;
- ✓ uma resposta muito estruturada e efetiva por operadores quando o *trip* ou alarme ocorre.

Uma vez que essas práticas são difíceis de ser implantadas na realidade das concessionárias, o relé parece ter sido ignorado.

### 3.2.12. O Monitor Digital de Alimentador

Para melhorar a detecção de faltas de alta impedância pelo monitoramento de corrente, foi desenvolvida uma tecnologia pela TAMU depois de mais de uma década de pesquisa, com o patrocínio do EPRI. Essa tecnologia foi incorporada num equipamento de monitoramento para alimentadores aéreos de distribuição e foi chamada de *Digital Feeder Monitor (DFM)* [13], o qual é um relé da *General Electric (GE)* que deve ser instalado na subestação para monitorar um alimentador.

#### a) Funcionamento do DFM

O equipamento incorpora nove algoritmos de alta impedância (vários descritos na seção 3.2) com um algoritmo especialista de detecção de arco (*Expert Arc Detector - EAD*) [9,13]. A detecção de falta de alta impedância requer entradas das 3 correntes de fase e da corrente de neutro via transformadores de corrente. As entradas de tensão promovem a identificação suplementar de fase e não são requeridas para a detecção de condutores caídos.

Para entender o funcionamento do DFM, é necessário entender a definição de falta de alta impedância na visão do relé:

- uma falta de alta impedância é caracterizada por ter uma impedância suficientemente alta tal que não é detectada pela proteção de sobrecorrente de fase ou de terra;
- uma falta de condutor caído ocorre quando o condutor já não está intacto no topo do poste, e sim, foi rompido entrando em contato com a terra ou objeto aterrado;
- uma falta com arco é qualquer falta de alta impedância a qual exhibe um arco elétrico.

Combinações desses tipos de faltas são possíveis. Um exemplo é uma falta com condutor caído, de alta impedância e com arco elétrico. A intenção do DFM é detectar faltas de alta impedância com arco, e diferenciar aquelas às quais apresentam condutores caídos de outras que não apresentam.

O DFM assume que um condutor está caído se e somente se ocorrer uma perda de carga ou um distúrbio de sobrecorrente antes da ocorrência de um arco também detectado. Se nenhuma dessas condições inicia o arco, o DFM assume que o condutor ainda está intacto. Essa lógica de detecção aumenta a segurança da detecção de faltas de alta impedância com condutores rompidos pelo monitoramento de corrente. A Tabela 3.2 ilustra essa lógica de avaliação do relé, onde N significa não existência e S existência do fenômeno.

Tabela 3.2 – Lógica de decisão do relé DFM

Arco elétrico	Perda de Carga	Sobrecorrente	Decisão
N	N	N	normal
N	N	S	sobrecorrente
N	S	S	sobrecorrente
S	N	N	"Arco"
S	N	S	condutor caído
S	S	N	condutor caído
S	S	S	condutor caído

No DFM, a detecção de um condutor caído ou condição de arco elétrico é realizada pela execução dos seguintes nove algoritmos:

- ✓ Algoritmo de Energia
- ✓ Algoritmo de Aleatoriedade
- ✓ Algoritmo Especialista Detector de Arco
- ✓ Algoritmo Detector de Evento de Carga
- ✓ Algoritmo de Análise de Carga
- ✓ Algoritmo de Extração de Carga
- ✓ Algoritmo de Análise do Padrão do Arco
- ✓ Algoritmo de Análise Espectral
- ✓ Algoritmo Identificador de Suspeita de Arco

A Figura 3.1 e os procedimentos e funções de cada algoritmo descritos a seguir explicam o funcionamento de todos os algoritmos numa plataforma integrada.

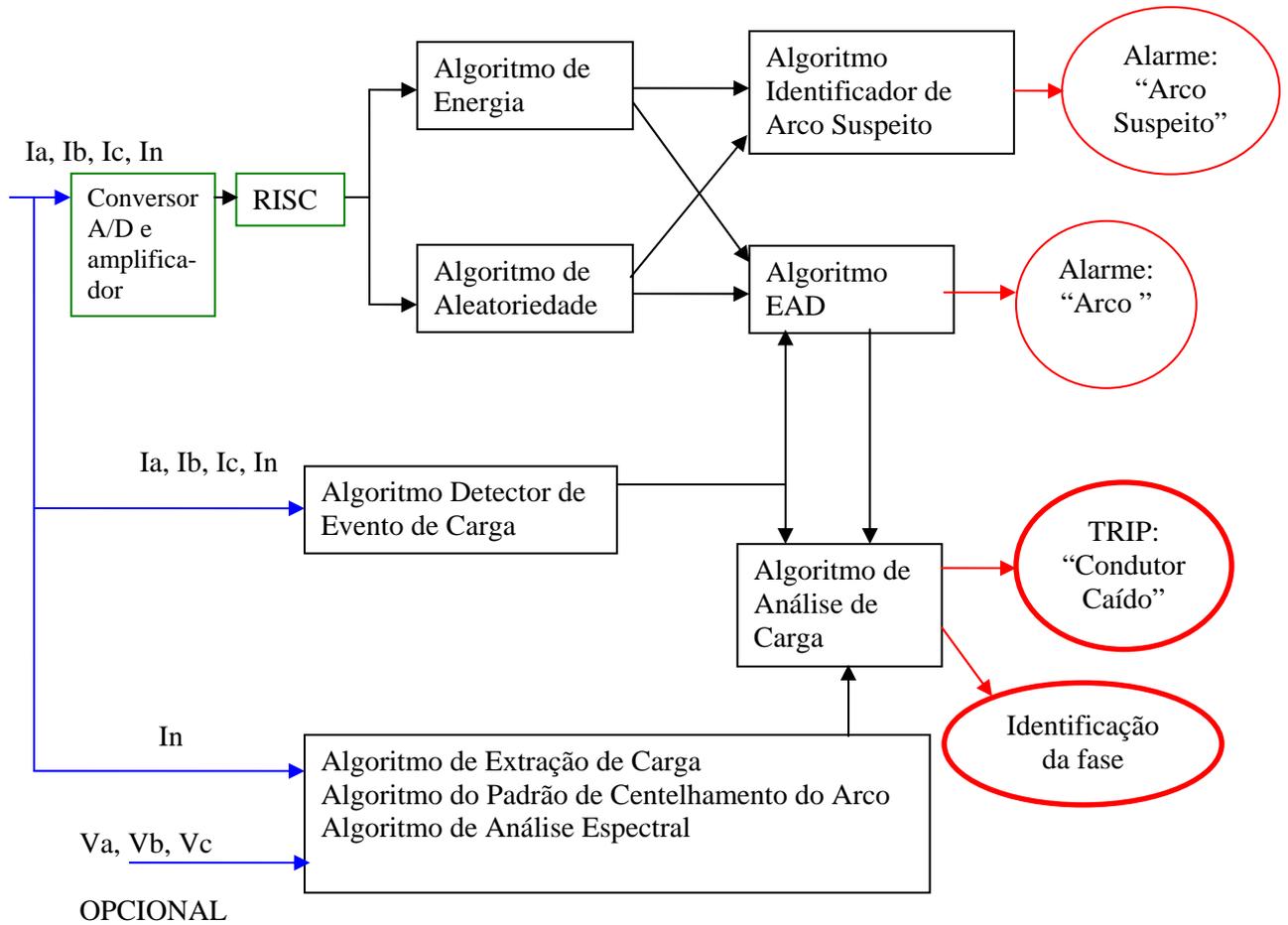


Figura 3.1: Diagrama de blocos dos algoritmos do DFM

A saída “arco” ocorre relativamente rápida quando um arco persistente está presente. A saída “arco suspeito” ocorre relativamente lenta (fração de uma ou duas horas) quando o arco é intermitente (exemplo: galho de árvore encostando no condutor, isolador com defeito). A saída “condutor caído” ocorre somente quando uma perda precipitada de carga ou uma condição de sobrecorrente indicam a ocorrência de uma falta antes da detecção do arco. A saída “identificação da fase” é determinada quando ambas saídas “arco elétrico” e “condutor caído” ocorrem.

As entradas de corrente passam primeiramente por um conversor A/D, são amplificadas e usada uma alta taxa de amostragem da forma de onda para as entradas de corrente e tensão, em conjunto com um microprocessador de alta performance de ajuste de instrução reduzida (*High-Performance Reduced Instruction Set Microprocessor – RISC*), para obter a resposta de frequência requerida para detecção de falta com arco.

Os algoritmos de Energia e de Aleatoriedade são os algoritmos básicos para a detecção de arco elétrico característico de faltas de alta impedância de condutor rompido caído ao solo. O DFM processa esses algoritmos, em cada um dos seguintes parâmetros, para cada corrente de fase e de neutro:

- Harmônicos ímpares;
- Harmônicos pares;
- Não-harmônicos.

Num sistema de 60Hz, o componente não-harmônico consiste de uma soma dos componentes de 30, 90, 150, ..., 750 Hz, enquanto num sistema de 50 Hz, consiste na soma dos componentes de 25, 75, 125, ..., 625 Hz. Se qualquer um dos algoritmos detecta um evento que segundo seus princípios é característico de arco elétrico numa falta de alta impedância em um desses componentes, o evento é relatado ao algoritmo EAD, reiniciando seu funcionamento logo após.

O algoritmo EAD tem o propósito de assimilar as saídas dos algoritmos básicos de detecção de arco dentro de um nível de confiança da crença da existência do arco, por fase. Salienta-se que existem atualmente 24 algoritmos básicos de detecção de arco independentes, uma vez que o Algoritmo de Energia e o Algoritmo de Aleatoriedade são processados para os harmônicos ímpares, harmônicos pares e não-harmônicos para cada corrente de fase e de neutro. A assimilação realizada por esse algoritmo é feita pela contagem do número de indicações de crença no arco determinadas por qualquer um dos 24 algoritmos, sobre um curto período de tempo. Esse algoritmo ainda leva em conta o número de diferentes algoritmos que indicaram a crença do arco. Vários pesos são assumidos para cada um desses parâmetros para refletir a importância da informação de cada parâmetro. Esses pesos são derivados da análise de horas de dados de mais de 300 faltas propositalis e outros eventos. O nível de confiança de crença no arco desse algoritmo para cada fase aumenta com o número de algoritmos que indicaram crença de um arco. Ele também aumenta com o aumento de indicações de qualquer algoritmo básico. Estes aumentos do nível de confiança ocorrem porque indicações múltiplas e consecutivas e indicações múltiplas e independentes são mais características da presença de arco que um simples algoritmo dando uma simples indicação. A Tabela 3.3 apresenta valores de ajustes de sensibilidade de arco desse algoritmo, com os seus respectivos valores de confiança do arco. Quanto maior o ajuste de sensibilidade, mais rápida será a detecção do arco e menos segura será sua decisão.

Tabela 3.3 – Valores de sensibilidade de arco do Algoritmo Especialista Detector de Arco

Ajuste de sensibilidade do arco	Número requerido de altos níveis de confiança de arco	Nível de confiança do arco
1	5	89%
2	4	83%
3	4	77%
4	4	71%
5	3	65%
6	3	59%
7	3	53%
8	3	47%
9	2	41%
10	2	35%

O Algoritmo Detector de Evento de Carga examina por fase, uma leitura de valores eficazes num intervalo de 2 ciclos para cada corrente de fase e de neutro. Ele então ajusta sinalizadores (*flags*) para cada uma das correntes para os seguintes eventos:

- uma condição de sobrecorrente;
- uma perda precipitada de carga;
- uma alta taxa de variação de corrente;
- um evento trifásico significativo;
- uma condição de abertura de disjuntor.

Esses *flags* são examinados pelo Algoritmo de Análise de Carga. Seus estados contribuem para a diferenciação do algoritmo entre faltas com condutores caídos com arco e condutores intactos com arco, e inibem o algoritmo EAD de indicar um alarme de arco por um tempo limitado permitindo uma coordenação com a proteção existente.

O Algoritmo de Análise de Carga tem o propósito de diferenciar entre condutores caídos com arco e condutores intactos com arco, através da procura por uma perda significativa de carga ou um distúrbio de sobrecorrente no início do episódio do arco. A presença do arco no sistema é determinada baseada na saída do algoritmo EAD. Se o DFM encontra um arco persistente no sistema (alarme “Arco”), o Algoritmo de Análise de Carga então considera o tipo de incidente que iniciou o arco e classifica o condutor com arco como caído ou intacto. Outra função do algoritmo é promover coordenação entre o DFM e a proteção convencional de sobrecorrente do sistema através da observação do tempo do intervalo do início do arco, antes de dar uma indicação de arco.

Se o Algoritmo de Análise de Carga determina que um condutor caído ou um arco existe, ele tenta determinar a fase para a qual a condição de falta de alta impedância existe. Ele faz isto de uma maneira hierárquica. Primeiro, se uma perda significativa de carga ativou o Algoritmo de Análise de Carga, e se houve uma perda significativa de carga somente em uma fase, aquela fase é identificada. Se não houve uma perda de carga em uma única fase, e se uma condição de sobrecorrente em somente uma fase ativou o algoritmo, aquela fase é identificada. Se ambos esses testes falharem para identificar a fase, a fase com o nível de confiança mais alto (uma fase mais alta que as outras duas em pelo menos 25%) é identificada. Finalmente, se nenhum desses testes promove a identificação da fase, o resultado do Algoritmo de Análise do Padrão de Centelhamento do Arco é checado. Se esse teste falha, a fase não é identificada.

O Algoritmo de Extração de Carga tenta encontrar um período quiescente durante uma falta com arco tal que possa determinar o nível de carga de referência para a corrente de neutro. Se ele tiver sucesso fazendo isso, ele então remove o componente de carga da corrente total de neutro medida, resultando em um sinal o qual consiste somente da componente de falta da corrente de neutro. Esta informação é então promovida como entrada do Algoritmo de Análise do Padrão de Centelhamento do Arco.

O Algoritmo de Análise de Centelhamento do Arco tenta promover a identificação da fase faltosa baseado na correlação entre a componente de falta da corrente de neutro medida e as tensões de fase. O resultado da análise é checado pelo Algoritmo de Análise de Carga se seus outros métodos de identificação de fase não tiveram sucesso.

O Algoritmo de Análise Espectral analisa as componentes não-harmônicas da corrente de neutro no sistema e correlaciona a forma das componentes não-harmônicas do espectro a um espectro de arco ideal  $1/f$ . Uma alta correlação promove a confirmação da crença do DFM sobre o arco no sistema de potência.

O Algoritmo Identificador de Arco Suspeito tem o propósito de detectar eventos de arco múltiplos e esporádicos. Se tomados individualmente, tais eventos não são suficientes para justificar um alarme de arco. Quando tomados cumulativamente, entretanto, esses eventos justificam um alarme para os operadores do sistema tal que a causa do arco possa ser investigada.

## b) Experiências no campo com o DFM

Segundo informações da GE [15], unidades do DFM têm sido testadas em mais de 60 concessionárias desde 1992. Algumas experiências de concessionárias às quais testaram unidades do DFM e que foram encontradas na literatura pesquisada são apresentadas a seguir.

### Experiências na *Electricidad de Caracas*, Venezuela

Em julho de 1995, foram realizados 11 testes propositais com o DFM na SE San Antonio [14], na saída de um alimentador de distribuição com neutro multiterrado com o nível de tensão de linha de 12,47 kV. Os testes foram realizados em vários tipos de superfície, com os resultados apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados dos testes de condutores caídos ao solo realizados em Caracas

Número do teste	Superfície do Teste	Comprimento do condutor em contato com a superfície (metro)	Operação do DFM
1	asfalto seco	4	NÃO
2	concreto seco	4	SIM
3	concreto seco	4	SIM
4	terra seca	4	SIM
5	grama seca	4	SIM
6	asfalto molhado	4	NÃO
7	concreto molhado	4	SIM
8	terra molhada	4	SIM
9	grama molhada	4	SIM
10	asfalto seco	10	SIM
11	asfalto molhado	10	NÃO

Apesar das atuações do DFM, não se pode tirar conclusões definitivas de sua performance, uma vez que as faltas foram realizadas logo na saída do alimentador, onde há grande perda de carga. Além disso, não foi verificada a performance do DFM para operações normais do sistema como chaveamento, a fim de verificar se o mesmo apresenta boa segurança na detecção. Porém, um fato interessante nos testes é que o DFM não atuou para três faltas onde a superfície é asfalto, como previsto pelos pesquisadores que desenvolveram o relé.

Segundo informações de [14], 27 unidades do DFM foram instaladas em vários alimentadores da *Electricidad de Caracas* após os testes, no final de 1995, com planejamento da instalação de mais 48 unidades no ano de 1996.

### Experiência em Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil

Em 1995, a CEMIG realizou testes com um relé DFM em laboratório na região metropolitana de Belo Horizonte e em campo na cidade de Sete Lagoas. Os testes em laboratório serviram para melhor conhecer o comportamento dos algoritmos e as principais características do relé, de modo que medidas preliminares fossem tomadas na execução dos testes em campo, como uma boa parametrização do relé. Foram realizados 16 testes em campo, na rede de um alimentador em outubro e novembro de 1995, envolvendo vários tipos de solo (terra, grama, concreto e asfalto) em várias localizações, sendo o relé instalado em determinada SE e chegando-se às observações abaixo.

- I) Em superfícies úmidas, nos primeiros minutos da falta, o solo pode ter um comportamento puramente resistivo, fazendo com que haja baixo conteúdo harmônico e não-harmônico, além de pouca aleatoriedade, com predominância da componente fundamental na corrente de falta. Porém, com o decorrer do tempo, o calor da falta pode vitrificar os arredores do solo onde o condutor se encontra, resultando em condições que podem exibir uma maior atividade de arco com conseqüente aumento do conteúdo harmônico e não-harmônico, com maior aleatoriedade. Como o DFM é baseado no monitoramento de harmônicos e não-harmônicos, a confiabilidade de detecção é menor nos primeiros minutos e tende a aumentar com o decorrer do tempo, de acordo com as características do solo.
- II) Pouca atividade de arco também é observada numa falta com condutor partido ao solo do lado da carga, uma vez que a tensão no condutor é menor que aquela no condutor partido do lado fonte.
- III) A confiabilidade do DFM para detecção de faltas com condutores rompidos caídos ao solo é maior que a proteção convencional por sobrecorrente.

Com relação à observação I, em regiões com alto adensamento populacional, isso é um grande problema, pois até que o DFM indique um condutor caído, a probabilidade de alguma pessoa se acidentar aumenta. Ressalta-se ainda que muitas ocorrências de condutores partidos são freqüentes em épocas de chuva. Isso mostra uma limitação do DFM, apesar de que a proteção convencional de sobrecorrente seria ainda pior por não atuar em qualquer tempo.

Com relação à observação II, é uma situação pior que a anterior, pois a tensão no condutor é inferior que a do condutor do lado da fonte, mas ainda fatal do ponto de vista de vida humana.

Ambas observações I e II levam a crer que a sensibilidade do DFM deve ser aumentada em períodos chuvosos de modo a tentar compensar o problema de pouca atividade de arco elétrico nessas situações, lembrando da redução da segurança da decisão de condutor rompido dessa forma.

A observação III se deve pelo fato que o DFM atua por monitoramento de componentes harmônicas e não-harmônicas da corrente de falta provocadas pelo arco, enquanto que os equipamentos de proteção convencionais, não.

#### Experiências na Companhia Energética do Ceará (COELCE)

De junho de 2001 a março de 2002, a Companhia Energética do Ceará (COELCE) e o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) realizaram um estudo [12] sobre faltas de alta impedância, dentro de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, avaliando a performance de três relés de fabricantes diferentes: ALSTOM S.A, *ZIV Aplicaciones y Tecnologia S.A* e GE. Todos os relés apresentavam várias funções convencionais de proteção incluindo neutro sensível, tendo os relés da ALSTOM e ZIV a proteção para faltas de alta impedância baseando-se na relação  $I_2/I_1$  e o relé da GE chamado de F60 com uma unidade separada chamada HiZ para detecção de faltas de alta impedância, que é a descendente do DFM com diferença básica nas interfaces do *software*. Foram realizadas simulações com os dados de medição de alimentadores da COELCE, ensaios de laboratório e em campo em cidades do Ceará, com os relés selecionados. Algumas observações importantes do trabalho são citadas a seguir.

- I) Em asfalto seco, o nível de atividade de arco é muito baixo, o que praticamente impossibilita a detecção da falta pela função HiZ do relé F60 da GE, o que é declarado pelo próprio fabricante.
- II) Em testes de laboratório em areia e brita molhadas, também houve pouca atividade de arco, o que dificultou a atuação do relé F60.
- III) Nos testes em campo, com condutor caído em asfalto, areia e terra, nenhum relé atuou.
- IV) Em um dos testes de campo realizado, o desequilíbrio de corrente no neutro reduziu quando houve a ocorrência da falta, pois antes da mesma já havia um desequilíbrio nas fases e a corrente de falta foi superior à corrente normal de operação.

Diante das experiências da CEMIG e COELCE, pode-se concluir que a atuação do DFM ou da função HiZ do relé F60 têm alta dependência com o nível de atividade de arco na falta com condutor caído ao solo. Considerando que a atividade do arco está relacionada com o tipo de solo e superfície, sua umidade, sua composição e até mesmo a forma e o comprimento que o condutor toca o solo, sua confiabilidade torna-se um parâmetro muito volátil, ressaltando que ainda assim é mais confiável que a proteção convencional de sobrecorrente para proteção de faltas de alta impedância.

### **3.3. MÉTODO DE DETECÇÃO POR RESPOSTA AO IMPULSO**

Esse método baseia-se no princípio das propriedades de reflexão e refração contidas na teoria de ondas viajantes, quando existe descontinuidade do meio de propagação.

O alimentador recebe uma excitação de uma fonte impulsiva e a resposta do mesmo é analisada nos domínios da frequência e do tempo. A partir da análise das frequências que compõem o sinal verifica-se a existência de uma falta e no domínio do tempo obtém-se a informação à respeito do tipo da falta, ou seja, baixa ou alta impedância e a distância da mesma até a subestação é calculada [3].

Considera-se que o sistema formado por um alimentador de uma rede de distribuição é um sistema cujas características são conhecidas e que a ocorrência de uma falta altera as características do alimentador. Para se identificar um sistema linear através de modelagem, deve-se escrever a sua função de transferência. Para isso, um impulso de tensão é injetado na entrada da fase do sistema sob teste e a sua resposta é medida. Através desses dois sinais (entrada e saída) calcula-se a função de transferência, que é uma expressão matemática que descreve o sistema. Com essa função de transferência, qualquer que seja a função excitação, pode-se calcular a resposta do sistema. Porém, se o sinal de entrada for sempre o mesmo, a identificação se dá apenas observando a resposta. Caso esta não coincida com a esperada, significa que alguma alteração ocorreu no sistema sob teste.

No caso de um alimentador, esta alteração poderá significar dois grupos de eventos distintos: abertura ou fechamento de chaves ou a ocorrência de uma falta, sendo essas últimas de baixa ou alta impedância.

A abertura e fechamento de chaves é um evento previsível, uma vez que se conhece a localização das chaves ao longo do alimentador. Dessa forma, pode-se definir o alimentador como um sistema que possui várias funções de transferência, operando com qualquer uma delas aleatoriamente.

Portanto, para identificar uma falta, deve-se criar um banco de dados com as respostas esperadas e comparar a resposta encontrada com as armazenadas neste banco. Caso a diferença entre a resposta encontrada e a padrão seja maior que o erro máximo admissível, então pode-se concluir que é uma falta.

Desta forma, o ponto principal desse método de detecção é a montagem do banco de dados, pois o sistema é identificado através dele. A modelagem do sistema que comporá o banco é feita conforme as leis de propagação de ondas viajantes, ou seja, os componentes do sistema são representados pelas suas impedâncias características e seu tempo de trânsito.

O tratamento das respostas é realizado no domínio da frequência e a comparação é feita através da amplitude de algumas componentes do espectro de frequência.

Segundo [3], para a distinção entre faltas de baixa impedância e faltas de alta impedância, o algoritmo será processado até um tempo determinado coordenado com a proteção convencional. Se a falta é de baixa impedância e temporária, o algoritmo não indicará a falta, pois o sistema tende a voltar ao regime normal de operação no caso de abertura e fechamento de equipamentos de proteção. Caso a proteção convencional não atue, é indicada a falta de alta impedância (ou o relé/elo fusível está em estado de falta).

Porém, dessa forma, não há uma distinção direta entre uma falta de baixa impedância sustentada de uma falta de alta impedância com confiabilidade, pois na verdade essa lógica apenas distingue uma falta de baixa impedância temporária de outros tipos de falta. Por exemplo, se houve uma falta de baixa impedância sustentada com operação de um elo fusível, o trecho a jusante da falta não voltará a seu estado normal até que se repare o defeito e seja fechada a chave fusível com a troca do elo queimado. Entretanto, com o cálculo da localização da falta e conhecendo-se a localização dos equipamentos de proteção instalados ao longo do alimentador, pode-se distinguir a abertura de um equipamento de um rompimento de cabo, sendo que faltas que ocorrem numa faixa de 100 metros próximas de elos fusíveis podem ser confundidas.

Um grande avanço desse método com relação aos métodos baseados em monitoramento de corrente está na localização do ponto de defeito. Pela análise da resposta no tempo (diferença entre a resposta padrão e a resposta a qual indicou a falta) e considerando que a onda injetada viaja aproximadamente na velocidade da luz, é calculada a distância entre o ponto do defeito e a subestação, sem, contudo, indicar o local exato em virtude da ramificação da linha de distribuição.

Considerando que, numa localização de falta a menos de 100 metros de um equipamento de proteção instalado no alimentador, caracterize-se uma atuação do mesmo, e ainda com uma boa precisão do algoritmo de localização, o método proposto poderá indicar a atuação de equipamentos de proteção, principalmente de elos fusíveis, o que reduziria o tempo de restabelecimento de energia devido à maior facilidade de localização do equipamento de proteção operado pelas equipes de operação.

Existem algumas recomendações para esse método, abaixo descritas:

- deve-se colocar filtros série passa-baixa em bancos de capacitores instalados no meio do alimentador, uma vez que esses eliminam a possibilidade do método identificar faltas à jusante desse equipamento;
- deve-se colocar filtros série passa-baixa entre o ponto de injeção e a barra da subestação, assim como um filtro passa-alta entre a fonte impulsiva e o ponto de injeção.

### **3.4. MÉTODO DE DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE TENSÃO**

Esse método consiste na detecção de condutores rompidos através do monitoramento de desequilíbrio de tensão em um ponto localizado a jusante da falta [2].

Um dos fatores que contribuíram para a pesquisa desse método por MALAGODI [2] foi um levantamento estatístico feito sobre faltas de alta impedância com rompimento de condutores da rede primária junto a duas concessionárias brasileiras de energia elétrica: Eletricidade de São Paulo S.A (ELETROPAULO) e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Várias ocorrências foram acompanhadas, sendo que na ELETROPAULO, de 65 casos cadastrados, em todos houve rompimento de condutor. Dos 297 casos cadastrados na CPFL, apenas em 10,7% (32 casos) não houve rompimento do condutor, porém, desse percentual quase metade (15 casos) foram detectados por algum dispositivo de proteção. Isso sinaliza que um equipamento de proteção capaz de detectar com segurança e confiabilidade o rompimento do condutor numa falta de alta impedância estará cobrindo grande parte das ocorrências dessas faltas, o que representa 95% no caso do levantamento feito numa das concessionárias.

Além disso, outro motivador é que os métodos de detecção que utilizam os sinais de corrente como indicadores de faltas de alta impedância, são muito limitados devido aos baixos valores de corrente que podem ocorrer nessas faltas.

O princípio do sistema de proteção proposto é que quando um condutor se rompe, as tensões no primário da parte do alimentador à frente do ponto partido, apresentam grande desequilíbrio, sendo que o desequilíbrio das tensões de fase pode ser detectado pelo monitoramento de seus componentes de seqüência negativa ou zero.

Para quantificar o desequilíbrio de tensão, foram definidas duas grandezas, sendo  $G2$  a relação entre o módulo da componente de seqüência negativa de tensão e o módulo da componente de seqüência positiva, e  $G0$ , a relação entre o módulo da componente de seqüência zero de tensão e o módulo da componente de seqüência positiva, dadas por:

$$G2 = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad \text{e} \quad G0 = \frac{|V_0|}{|V_1|}$$

onde,

$V_2$  é a componente de seqüência negativa de tensão,

$V_1$  é a componente de seqüência positiva de tensão

$V_0$  é a componente de seqüência zero de tensão

Através de simulações no programa computacional ATP, MALAGODI [2] verificou se a medida de desequilíbrio de tensão é uma forma segura para detectar o rompimento do condutor, principalmente devido à presença de transformadores de distribuição. Na análise, os seguintes aspectos foram considerados:

- ✓ dois tipos de conexões de transformadores de distribuição: transformadores trifásicos com os enrolamentos primários conectados em delta e transformadores monofásicos conectados entre fase e neutro;
- ✓ várias condições de carga no sistema;
- ✓ condições diferentes de contato do condutor rompido ao solo (contato do lado fonte, contato do lado carga e diferentes valores de impedância de contato).
- ✓ rompimento de um e dois condutores da rede primária;
- ✓ sistema com e sem banco de capacitores ligados.

Os resultados da análise foram os seguintes, segundo [2, 10]:

- a) No caso de rompimento de uma das fases do alimentador, para todos os casos analisados, o percentual de seqüência negativa, assim como de seqüência zero, nas tensões de fase à frente do ponto da falta estão na faixa de 50 a 100%;

- b) No caso de rompimento de duas fases do alimentador, para sistemas de distribuição com transformadores monofásicos conectados entre fase e neutro, os percentuais de seqüência negativa e zero são os mesmos e iguais a 100%;
- c) No caso de rompimento de duas fases, para sistemas com transformadores trifásicos conectados em delta, quando o contato do cabo caído com o solo ocorre do lado da carga, estes percentuais variam entre 50 e 100%. Entretanto, no caso do contato ocorrer no lado da fonte, somente a componente de seqüência zero existirá e, por isso, o monitoramento de somente a componente de seqüência negativa não permitirá a detecção da falta;
- d) Para sistemas de distribuição em operação normal, sem condutores partidos, apenas cargas desequilibradas podem produzir desequilíbrios de tensão. Os dados mostrados na dissertação indicam que os percentuais das componentes de seqüência negativa e zero dificilmente excedem 5% mesmo em casos “não-realísticos” de cargas extremamente desequilibradas. Isto é válido também para sistemas utilizando transformadores trifásicos e monofásicos. Os resultados também mostram que, para faltas com um ou dois condutores partidos, o desequilíbrio das tensões será muito maior que aqueles observados em condições normais da rede.

A conclusão da análise é que o monitoramento do desequilíbrio de tensão por meio da componente de seqüência zero permite uma precisa e confiável forma de se detectar condutores partidos das redes primárias de distribuição.

Dessa forma, um sensor foi construído para monitorar a componente de seqüência zero das tensões de fase a qual é feita através da detecção do campo elétrico resultante dos condutores primários, não ficando em contato com nenhum deles. O princípio de funcionamento do equipamento é baseado no fato de que a tensão induzida na antena do sensor pelo campo elétrico resultante é quase zero no caso de equilíbrio das tensões. Entretanto, no caso da abertura de uma das fases, as tensões tornam-se desequilibradas e o campo elétrico resultante induz uma tensão na antena a qual é detectada pelo circuito eletrônico do sensor.

Um protótipo do sensor foi testado no campo de uma rede de distribuição da ELETROPAULO, junto aos laboratórios do Instituto de Eletrotécnica e Energia na Cidade Universitária, e medições foram realizadas comprovando os resultados acima obtidos nas simulações e a eficiência do sensor.

Ressalta-se que a atuação temporizada do sensor evita falsas indicações para transitórios do sistema de distribuição, em que se retorna ao regime de operação após decorrido determinado tempo, tendo como exemplos atuações de religador para faltas temporárias de baixa impedância onde há religamentos satisfatórios e a atuação trifásica de equipamentos de proteção em faltas sustentadas de baixa impedância.

Após os resultados obtidos, um protótipo do sensor foi construído e instalado no sistema de supervisão e controle da Companhia Energética de São Paulo (CESP), onde não foi relatada nenhuma ocorrência de rompimento de condutor num período de um ano e não houve nenhuma atuação indevida, não apresentando falha do circuito eletrônico sob condições climáticas adversas. Outro protótipo foi também construído e instalado num alimentador rural da CPFL e simulou-se o rompimento de cabo através da abertura de uma chave fusível, sendo que o sensor sinalizou corretamente o desequilíbrio de tensão. Outros dois protótipos foram instalados na CPFL e, num período de dois anos, duas ocorrências de abertura de uma das fases foram detectadas. Finalmente, mais dois protótipos foram construídos e instalados em um alimentador rural da CESP, sendo que, em um período de um ano, nenhum rompimento de cabo foi registrado.

A filosofia da proteção de rompimento de condutor é a instalação de sensores em pontos estratégicos do alimentador, acoplada a um sistema de comunicação de cada sensor com o COD, de modo que através dos sinais enviados pelos sensores se possa localizar o defeito, ressaltando-se que o nível de proteção do alimentador dependerá de sua topologia e da quantidade de sensores instalados.

Verifica-se, pelo conteúdo da dissertação de MALAGODI, que o grande desafio deste tipo de proteção é a confiabilidade ou distinção entre um rompimento de cabo com alta impedância e uma abertura monopolar de um equipamento de proteção a montante do local de rompimento de cabo, no caso de uma falta de baixa impedância. Além disso, um fator limitante para implantação economicamente viável desse método é a definição do sistema de comunicação entre os sensores e o COD.

### **3.5. MÉTODOS PARA REDUÇÃO DO PROBLEMA DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA**

A mitigação do problema de faltas de condutores rompidos ao solo pode ser conseguida com a automação de sistemas, melhorias de práticas de construção, manutenção e operação de

alimentadores e/ou a implantação de simples equipamentos, até que a solução definitiva e eficiente seja alcançada.

Entretanto, essas melhorias para a segurança podem entrar em controvérsia com os aspectos econômicos e de operação, mas são de grande importância para a redução do problema.

Porém, é importante ressaltar que, apesar de todos esses métodos oferecerem alguma melhoria, nenhum representa uma solução direta para o problema de detecção de faltas de alta impedância. Mesmo se todas as propostas descritas abaixo fossem utilizadas, um certo percentual de condutores caídos poderia ainda se manter indetectável.

### **3.5.1. Sistemas de automação da distribuição**

Muitas concessionárias têm implantado algum nível de automação da distribuição em seus alimentadores, o que usualmente inclui o Sistema de Supervisão e Controle da Distribuição (SSCD). Esse sistema normalmente oferece as seguintes facilidades:

- sistema de comunicação;
- capacidade de processamento de dados distribuídos ao longo do alimentador através de unidades remotas;
- disjuntores, chaves seccionadoras e religadores telecomandados, podendo ser controlados a distância;
- monitoramento de tensões, correntes e estado de equipamentos;
- monitoramento de tensões, correntes e potência em medidores de unidades consumidoras.

A expansão dos sistemas de automação se deve às questões econômicas e, principalmente, de confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. A detecção de faltas de alta impedância pode ser melhorada dentro dessa expansão, através da inclusão no projeto de automação de métodos de detecção de faltas com condutores rompidos. Esta proteção pode ser instalada inicialmente ou posteriormente à implantação do sistema. Chaves fusíveis operadas eletronicamente oferecem alguma promessa para essa necessidade.

Um exemplo do aproveitamento do SSCD com relação à detecção de rompimento de condutores é a interligação de sensores de desequilíbrio de tensão com equipamentos de proteção telecomandados instalados ao longo do alimentador. Isso reduziria o custo de instalação de sistemas de comunicação para esse sistema de proteção.

### 3.5.2. Melhorias de práticas de construção

A preocupação com os padrões e práticas de construção de redes de distribuição do tipo aéreas está associada a causas ou fatores que contribuem para o rompimento de condutores do circuito primário, pois melhorias podem aumentar a probabilidade do contato de condutores de fase rompidos com o condutor neutro ou reduzir a probabilidade de rompimento de condutores, reduzindo o número de faltas de alta impedância. Existem várias formas de melhorar as práticas de construção, podendo citar:

- ✓ uso de condutores com grandes seções: um cenário comum para a ocorrência de rompimento de condutores começa com uma falta normal, seja provocada por descargas atmosféricas ou contato com árvores, as quais fundem o condutor primário, ficando energizado no solo (condutores com maiores seções dissipam muito mais calor em um arco sem se fundirem e são mais resistentes a falhas mecânicas provindas de fadiga ou devido a esforços de árvores e gelo);
- ✓ uso de configurações que aumentam as chances de contato do condutor fase com o neutro num eventual rompimento do condutor fase;
- ✓ evitar derivações sem fusíveis, especialmente em condutores de pequena seção ou quando a carga é insignificante;
- ✓ substituição de redes nuas por protegidas ou isoladas, pois essas reduzem a probabilidade de rompimento de condutor primário devidos às suas características físicas;
- ✓ evitar conexões no meio do vão;
- ✓ melhorar a proteção contra descargas atmosféricas;
- ✓ evitar construções de rede de distribuição sobre áreas de intensa vegetação, pois na ocorrência de um rompimento de condutor, sua localização é difícil, uma vez que o condutor pode ficar pendurado num galho ou arbusto, menos visível ao público e geralmente de difícil acesso às equipes de manutenção;
- ✓ incentivar a construção de redes subterrâneas, pois além do benefício quanto à segurança, em algumas situações podem ser mais econômicas que redes aéreas com relação ao custo de manutenção quando avaliado em longo prazo, além de promoverem benefícios estéticos;
- ✓ construir redes de distribuição aéreas com nível de tensão relativamente elevado, como 34,5 kV.

A falha de alta impedância sendo convertida em uma falha de baixa impedância reduz sensivelmente o risco de acidentes envolvendo condutores ao solo. Esta conversão pode ser feita com a instalação de dispositivos mecânicos que sejam atuados pelo próprio cabo ao longo de sua queda, após a ocorrência de uma falha com ruptura do cabo. Estes dispositivos estarão adequadamente aterrados para permitir que o sistema de proteção do alimentador atue. Deve-se manter o cuidado de não reduzir o NBI da linha de distribuição, que poderia levar a ocorrência de outras falhas por falta de isolamento.

Um exemplo típico de um dispositivo mecânico para redução de faltas de alta impedância é o chamado guarda mecânico (Figura 3.2). Guardas mecânicos têm o principal objetivo de forçar o contato metálico com o condutor neutro de qualquer condutor fase rompido, através da instalação de uma haste metálica suspensa no neutro. O resultado é a geração de uma corrente de curto-circuito capaz de sensibilizar o equipamento de proteção. Tem as seguintes vantagens: localiza o cabo rompido, usa o sistema de proteção por sobrecorrente existente para desenergizar um cabo rompido, oferece proteção para condutores rompidos do lado da carga e nenhuma ação ou decisão é requerida ao operador. É mais eficiente contra condutores os quais estão somente suspensos ou abaixados sem tocar a terra ou sem se quebrar. Este tipo de problema ocorre quando cruzetas caem, isoladores são quebrados ou acontece uma falha na amarração do condutor à estrutura. A principal desvantagem desse método é o custo de material e mão-de-obra para instalação, uma vez que exige o trabalho com veículos com cestas aéreas e deve ser instalado em praticamente todos os vãos do alimentador que tem rede convencional, para ter bons resultados.

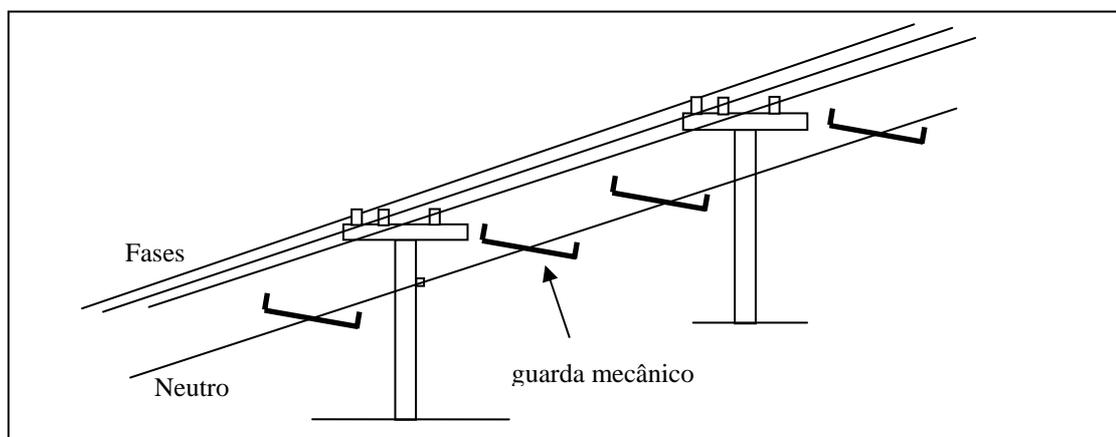


Figura 3.2: Desenho esquemático de guardas mecânicos em RDA convencional

### **3.5.3. Melhorias de práticas de operação e manutenção**

Melhorias de práticas de operação são limitadas pela própria estrutura da rede de distribuição e do comportamento das cargas instaladas. Um exemplo típico desse problema são extensos ramais rurais e suas respectivas cargas, que forçam um elevado ajuste da proteção de terra, o que prejudica a atuação para faltas de alta impedância.

Já melhorias de práticas de manutenção podem ser aplicadas sem grandes problemas, porém é extremamente dependente da disponibilidade de recursos financeiros.

No item 2.5.3 foram citadas algumas ações que podem reduzir o problema de rompimento de condutores em circuitos primários de redes de distribuição.

Infelizmente, nos últimos dez anos, está havendo um aumento do roubo de materiais e equipamentos em redes de distribuição, em linhas de transmissão e subestações, motivados por fatores como o aumento da terceirização de serviços em concessionárias, incentivo à reciclagem de materiais de alumínio e dificuldades sociais e econômicas do país. Especificamente no que se refere a redes de distribuição, está havendo uma quantidade enorme de roubo de condutores neutro de alumínio, principalmente em áreas rurais. A ausência do condutor neutro, além de aumentar as chances de faltas de alta impedância num rompimento de condutor, ainda provoca várias conseqüências no funcionamento de equipamentos da rede e de clientes e gera riscos de acidentes para eletricitistas, animais e a população em geral. Esse problema tem preocupado várias concessionárias brasileiras, principalmente por causa do prejuízo financeiro (milhares de km de cabo neutro a serem recompostos) e ações nos mais variados setores têm sido tomadas para sua redução. Porém, os efeitos dessas ações não são imediatos e prevê-se que o problema ainda irá perdurar por vários anos.

### **3.5.4. Programas sociais e sistemas de respostas de emergência**

Além de todos os métodos de detecção de condutores rompidos, das melhorias de práticas de construção, operação e manutenção, um fator importante na redução de acidentes nesse tipo de falta é a conscientização da população no que se refere ao risco de um condutor caído ao solo.

Por isso, a realização de programas educacionais ao público, como mensagens em rádios e televisões, palestras em escolas, entre outros, onde se ensinam os principais procedimentos no

caso de condutores da rede elétrica caídos ao solo, com ênfase no que não se deve fazer, podem reduzir o número de acidentes nessas ocorrências.

Além disso, concessionárias podem melhorar a resposta a relatos e indicações de condutores rompidos ao solo. Muito pode ser melhorado se a comunidade, as agências de segurança, despachantes e o sistema físico de distribuição são vistos como um macro sistema, podendo citar algumas ações:

- ✓ treinamentos para policiais, bombeiros, trabalhadores municipais e eletricitistas, os quais podem tomar ações corretivas após um relato de condutor rompido, sendo que as próprias concessionárias podem conduzir esse treinamento;
- ✓ as concessionárias devem considerar um relato de condutor rompido como um condutor da média tensão energizado até que se confirme ser um cabo telefônico ou do sistema de TV a cabo ou outro condutor de baixa tensão;
- ✓ o desenvolvimento e aplicação de um sistema de comunicação padronizado entre o despacho de serviços dos CODs da concessionária e o atendimento telefônico policial podem trazer maior rapidez de ações nos casos de relatos de condutores rompidos.

### **3.6. ABRANGÊNCIA DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO**

Diante dos métodos de detecção mencionados anteriormente, pode-se resumir a aplicabilidade de cada um frente a cada tipo de faltas de alta impedância que são consideradas a seguir:

1. Falta ativa série com condutor caído ao solo do lado fonte;
2. Falta ativa série com condutor caído ao solo do lado carga;
3. Falta ativa série com condutor não caído ao solo (tocando um objeto);
4. Falta ativa shunt;
5. Falta passiva.

Para isso, os métodos de detecção são classificados em cinco categorias, sendo a categoria E aplicada para redução de faltas de alta impedância como o caso de guardas mecânicos:

Grupo A – Detecção por monitoramento da corrente de seqüência zero

Grupo B – Detecção por monitoramento de tensão

Grupo C – Detecção por monitoramento de sinais de corrente de fase fora de 60 Hz

Grupo D – Aplicação de Sinais

### Grupo E – Aumento da corrente de falta

A Tabela 3.5 mostra a aplicabilidade das categorias de métodos de detecção com relação aos tipos de faltas de alta impedância:

Tabela 3.5 – Aplicação dos métodos de detecção de faltas de alta impedância

Grupos de métodos de detecção	Tipos de faltas de alta impedância				
	1	2	3	4	5
<b>Grupo A</b>	x	x			
<b>Grupo B</b>	x	x	x		x
<b>Grupo C</b>	x		x	x	
<b>Grupo D</b>	x	x	x		x
<b>Grupo E</b>	x	x	x		x

Verifica-se que, nas faltas de alta impedância tipo série, ou seja, onde há rompimento de condutor, as quais geram os maiores riscos de acidentes para a população e propriedades, as categorias dos Grupos B, D e E apresentam maior aplicação. Já a categoria do Grupo C, apesar de ser aplicada a vários tipos de faltas de alta impedância série e shunt, apresenta um grande problema, pois não é aplicável para faltas com rompimento de condutores caídos ao solo do lado carga, que é um grande risco. A categoria do Grupo E tem grande aplicabilidade nas faltas com rompimento de condutores e, na verdade, não detecta faltas de alta impedância, uma vez que irá transformá-las em faltas de baixa impedância. É interessante ainda observar que integrando algumas categorias de métodos de detecção, como B + C, ou C + D, haverá uma total aplicabilidade para os tipos de faltas de alta impedância.

Entretanto, a probabilidade de detecção das categorias A, C e E depende muito das características locais da falta, podendo citar o nível de desequilíbrio de corrente originado pela falta (categoria A), o nível de atividade do arco elétrico (categoria C), tipo de estrutura da rede (categoria E). Já nas categorias B e D não há essa dependência, fazendo com que esses métodos provavelmente tenham maior probabilidade de detecção nas faltas às quais são aplicáveis.

É importante ainda destacar o fator sensibilidade que afeta qualquer método de detecção de faltas de alta impedância. As limitações de sensibilidade são usualmente utilizadas para distinguir entre condições de falta e não-falta. A Figura 3.2 mostra que nenhum único método de detecção detectará todas as condições elétricas que podem resultar de um condutor caído ao solo [1]. Pode-se observar ainda que as questões de segurança e confiabilidade de detecção de qualquer método são concorrentes, pois quando se aumenta uma reduz-se a outra. Por

exemplo, um outro método poderia detectar maior quantidade de faltas (círculo com borda leve com área maior que o método da Figura 3.3), porém, em contrapartida, o método teria maior probabilidade de falsas detecções.

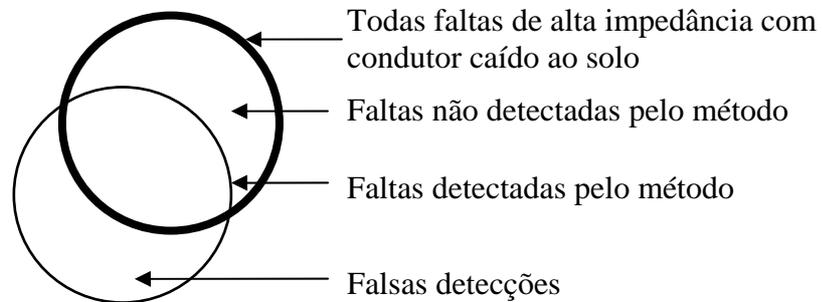


Figura 3.3: Desenho esquemático da detecção de faltas de alta impedância

Porém, a faixa de detecção pode ser aumentada fazendo a integração de vários métodos de detecção, como mostrado na Figura 3.4. Em algumas condições, somente um método detectará a condição de um tipo de falta, enquanto que em outras condições vários métodos poderão detectar outro tipo de falta. Da mesma forma anterior, também haveria um aumento da probabilidade de falsas detecções nessa situação.

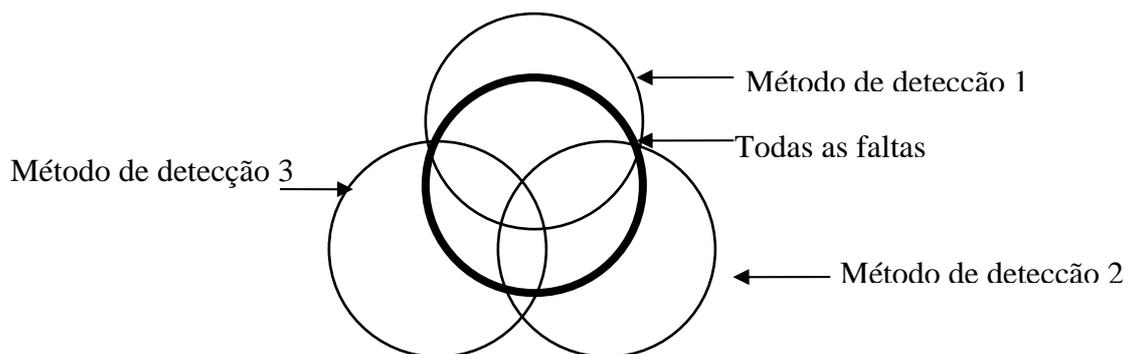


Figura 3.4 – Desenho esquemático de métodos de detecção integrados

### 3.7. PROBLEMAS OPERACIONAIS DE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Todos os métodos de detecção apresentados trazem problemas operacionais e/ou limitações operacionais ou econômicas, as quais são apresentadas a seguir.

Considerando que, atualmente, os métodos de detecção baseados no monitoramento de sinais de corrente geralmente são aplicados em relés de subestações, no caso de uma atuação de “condutor caído” existirá uma dificuldade na decisão do *trip* ou alarme, pois o *trip* irá desligar todo o alimentador. Dependendo da situação poderá provocar outros riscos de acidentes, principalmente se o alimentador atender uma ou mais cidades, podendo citar riscos com desligamentos de sinais de trânsito, hospitais, sistemas de produção, entre outros. Uma forma de reduzir essa dificuldade é analisar as características dos alimentadores que estão sendo protegidos contra faltas de alta impedância, verificando os atendimentos a áreas urbanas e rurais.

Outro problema desses métodos de detecção é o tempo de atuação que segundo GRAIG G. WESTER [15] pode chegar a atingir até 5 minutos. Em áreas com alto adensamento populacional isso é um problema, ao contrário de áreas rurais onde o risco de uma pessoa se aproximar de um condutor caído ao solo é bem menor.

Ressalta-se ainda que grande quantidade de rompimento de condutores não ocorre em troncos de alimentadores, e sim em ramais com condutores nus e de seções reduzidas, onde provavelmente a perda de corrente devida à ocorrência não é significativa visto da SE. No caso do DFM, isso reduz a confiabilidade de detecção, uma vez que a indicação de um condutor caído é realizada se e somente se antes do início do arco tiver havido uma ocorrência de perda de carga ou uma ocorrência de sobrecorrente.

Outra limitação do DFM é que faltas de alta impedância com rompimento de condutores com baixa atividade de arco, a probabilidade e confiabilidade de detecção reduzem drasticamente, principalmente em solos como asfalto e areia, uma vez que seus algoritmos básicos de detecção de arco atuam pela atividade de alta frequência gerada pelo arco. Além disso, rompimentos de condutores caídos do lado carga não são detectados pelo DFM, o que é um grande risco.

Mesmo que esses métodos de detecção façam o relé atuar corretamente, com confiabilidade e segurança, ainda se tem o problema de localização do condutor rompido, o que demandará um grande tempo para que as equipes de operação identifiquem o ponto da falta, pois terão que inspecionar praticamente todo o alimentador. No caso da decisão de desligamento de todo o alimentador, o risco de acidente de faltas de alta impedância por rompimento de condutores ficaria eliminado, ao passo que a decisão de alarme, não desligando o alimentador, aumentará as chances de ocorrências de acidentes até que as equipes de operação encontrem o defeito.

Já os métodos de detecção por monitoramento de tensão não apresentam os problemas citados acima, uma vez que sua sensibilidade é local e é possível localizar a falta através de um sistema de comunicação eficiente, principalmente onde houver um nível avançado de automação da distribuição.

Entretanto, na maioria dos casos não existe um monitoramento remoto do estado de chaves-fusíveis, sendo esse o fator dificultador para esse tipo de sistema de proteção. Como os sensores atuam para desequilíbrio de tensão causado por rompimento de condutor, pode-se sinalizar uma falta de alta impedância incorretamente no caso de atuação/abertura de chaves fusíveis operadas devido a faltas de baixa impedância à montante do ponto de localização do sensor de desequilíbrio de tensão. Sendo assim, até então, não é possível uma distinção confiável entre uma falta de rompimento de condutor e uma abertura monopolar de qualquer equipamento de proteção a montante da falta, considerando que não se sabe o estado desses equipamentos remotamente. Uma redução do problema seria um critério de detecção onde um rompimento de condutor só seria indicado se não houvesse uma ocorrência de sobrecorrente monitorada pelo COD em algum equipamento de proteção a montante dos sensores os quais indicaram a falta. Uma solução seria a instalação de sensores em todos os equipamentos de proteção à montante dos sensores instalados nos finais de rede de distribuição. Apesar desse problema, se tem um ganho com esse sistema de proteção, uma vez que as faltas poderiam ser localizadas com a implantação de um sistema de localização apropriado. Um dos grandes desafios desse sistema de proteção era o custo de implantação dos sistemas de comunicação. Talvez, nos dias de hoje, com os avanços das tecnologias de comunicação, esse desafio possa ser transposto com mais facilidade.

O método de detecção de resposta ao impulso parece promissor, entretanto deve ser bem amadurecido principalmente no que se refere à montagem do banco de dados, que é primordial para a confiabilidade e segurança desse método. Uma outra preocupação é a influência do sinal injetado no comportamento das cargas atendidas pelo alimentador e pelos próprios equipamentos da rede de distribuição. A localização da falta também é um fator que deve ser mais trabalhado devido à característica de ramificação dos alimentadores. Bancos de capacitores ligados em estrela aterrada instalados no alimentador protegido com esse método de detecção praticamente eliminam sua eficiência, apesar de que filtros passa-alta podem ser instalados no ponto central da estrela desses bancos. Além disso, é interessante ressaltar que numa falta de alta impedância há um comportamento não linear da resistência no ponto de falta, o que pode influenciar na detecção da falta, uma vez que o método utiliza uma função

de transferência baseada em um sistema linear. Uma vantagem adicional desse método é a possibilidade de identificação de atuações de equipamentos de proteção instalados ao longo do alimentador, o que reduziria o tempo de restabelecimento do fornecimento de energia elétrica.

O método de instalação de guardas mecânicos em vãos do alimentador pode trazer uma redução de faltas de alta impedância, mas tem limitações econômicas, uma vez que sua instalação deve compreender todos os vãos da área do alimentador que se pretende proteger.

### 3.8. CONCLUSÕES

Todos os métodos e equipamentos de detecção de faltas de alta impedância apresentados têm certo nível de eficiência e suas respectivas limitações, com graus diferenciados entre eles. Porém, nenhum deles se apresenta como uma solução definitiva para a detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Dessa forma, pode-se concluir frente às características das redes de distribuição, do sistema de proteção convencional e das faltas com condutor rompido caído ao solo:

- o objeto principal das pesquisas de faltas de alta impedância é a segurança de vidas humanas;
- a principal causa de acidentes com faltas de alta impedância é o rompimento de condutores de circuitos primários de redes de distribuição;
- existe uma alta probabilidade de acidentes com condutores rompidos energizados em áreas urbanas com elevado adensamento populacional com relação a áreas rurais;
- existem vantagens e limitações dos principais métodos de detecção de falta de alta impedância apresentados;
- que uma solução eficiente deve abranger a detecção e localização de condutores rompidos, com confiabilidade e segurança, e atuação rápida do trecho sob falta.

Portanto, é proposto nessa dissertação o estudo do monitoramento de desequilíbrio de tensão em RDA com instalação de sensores em pontos estratégicos da rede, com o objetivo de detecção, distinção e localização de condutores rompidos em áreas urbanas com alto adensamento populacional, devendo abranger:

- ✓ o método de detecção de rompimento de condutore(s) primário(s);
- ✓ o método e algoritmo para localização da falta de rompimento de condutore(s) primário(s).

## 4. ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

### 4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como descrito no capítulo anterior, o principal problema de faltas de alta impedância é a segurança do público e de propriedades. Logo, um cabo partido do circuito primário da RDA energizado e caído ao solo numa área com alta densidade populacional representa um grande risco à vida de pessoas.

Como um cabo partido energizado gera uma “falta de fase” nos circuitos à jusante do ponto de rompimento, haverá um desequilíbrio de tensão entre as fases desses circuitos. Sendo assim, a forma matemática proposta para quantificar esse desequilíbrio de tensão é o cálculo das componentes simétricas em pontos à frente do local de rompimento do(s) condutor(es).

Porém, é importante distinguir uma falta de fase de um desequilíbrio acentuado de carga, o qual pode ser uma situação natural ou anormal no sistema de distribuição.

Dessa forma, neste instante, é conveniente uma leitura dos apêndices A e B, os quais apresentam o desenvolvimento das equações e os cálculos de desequilíbrio de tensão, respectivamente, incluindo os diagramas de seqüência e eventuais comentários, para as seguintes abordagens:

- 1) desequilíbrio acentuado de carga
- 2) abertura monopolar do circuito primário de RDA
- 3) abertura bipolar do circuito primário de RDA

Os resultados e conclusões dos cálculos são apresentados nesse capítulo, assim como os parâmetros definidos para mensurar o grau de desequilíbrio de tensão nas situações acima.

MALAGODI [2] estudou o grau de desequilíbrio de tensão através de dois parâmetros, dados por:

$$G2 = \frac{|V_{a2}|}{|V_{a1}|} \text{ (pu)} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

$$G0 = \frac{|V_{a0}|}{|V_{a1}|} \text{ (pu)} \quad \text{Eq. (4.2)}$$

onde,

$V_{a0}$  é a tensão de seqüência zero num ponto monitorado do alimentador, em volts

$V_{a1}$  é a tensão de seqüência positiva num ponto monitorado do alimentador, em volts

$V_{a2}$  é a tensão de seqüência negativa num ponto monitorado do alimentador, em volts

Porém, através de suas análises, SENGGER e MALAGODI propuseram a detecção do desequilíbrio de tensão através do monitoramento de apenas a componente de seqüência zero. Isto porque em um alimentador, numa abertura bipolar à montante de transformadores ligados em delta no primário, as tensões de seqüência negativa são zero, e dessa forma  $G2$  é zero.

Além disso, GARCIA-SANTANDER et al em [17] propuseram também outra metodologia para detecção do desequilíbrio de tensão, chamada de tensão diferencial relativa, dada como:

$$\Delta V_d = \frac{|V_d - V_{d0}|}{|V_{d0}|} \text{ (pu)} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

onde

$\Delta V_d$  é a tensão diferencial relativa, em pu

$V_d$  é a tensão de seqüência positiva num ponto de monitoramento do alimentador depois do ponto da falta, em volts

$V_{d0}$  é a tensão de seqüência positiva num ponto de monitoramento antes do ponto da falta, em volts

Ambos os métodos acima, propõem a instalação de sensores para detecção do nível de desequilíbrio de tensão em finais de rede, como é ilustrado na Figura 4.1 através dos pontos 10, 11, 19, 21, 23, 26 e 31 e na saída do alimentador na SE.

O método de MALAGODI e SENGGER consiste no monitoramento do nível de desequilíbrio de tensão em pontos onde são instalados sensores, utilizando a tensão de seqüência zero, sendo que, no caso de se atingir valores acima de um valor pré-determinado, a falta é detectada. Já o método proposto por GARCIA-SANTANDER et al consiste no monitoramento da diferença entre o nível de equilíbrio de tensão num sensor e outro sensor instalado à montante do primeiro, de modo que, num determinado momento, se compara o grau de equilíbrio de um ponto antes da falta com um ponto após a falta, resultando na detecção da falta. Pode-se observar que os objetivos dos dois métodos são os mesmos, ou

seja, verificar o grau de desequilíbrio de tensão em pontos do alimentador de modo a detectar a falta no alimentador.

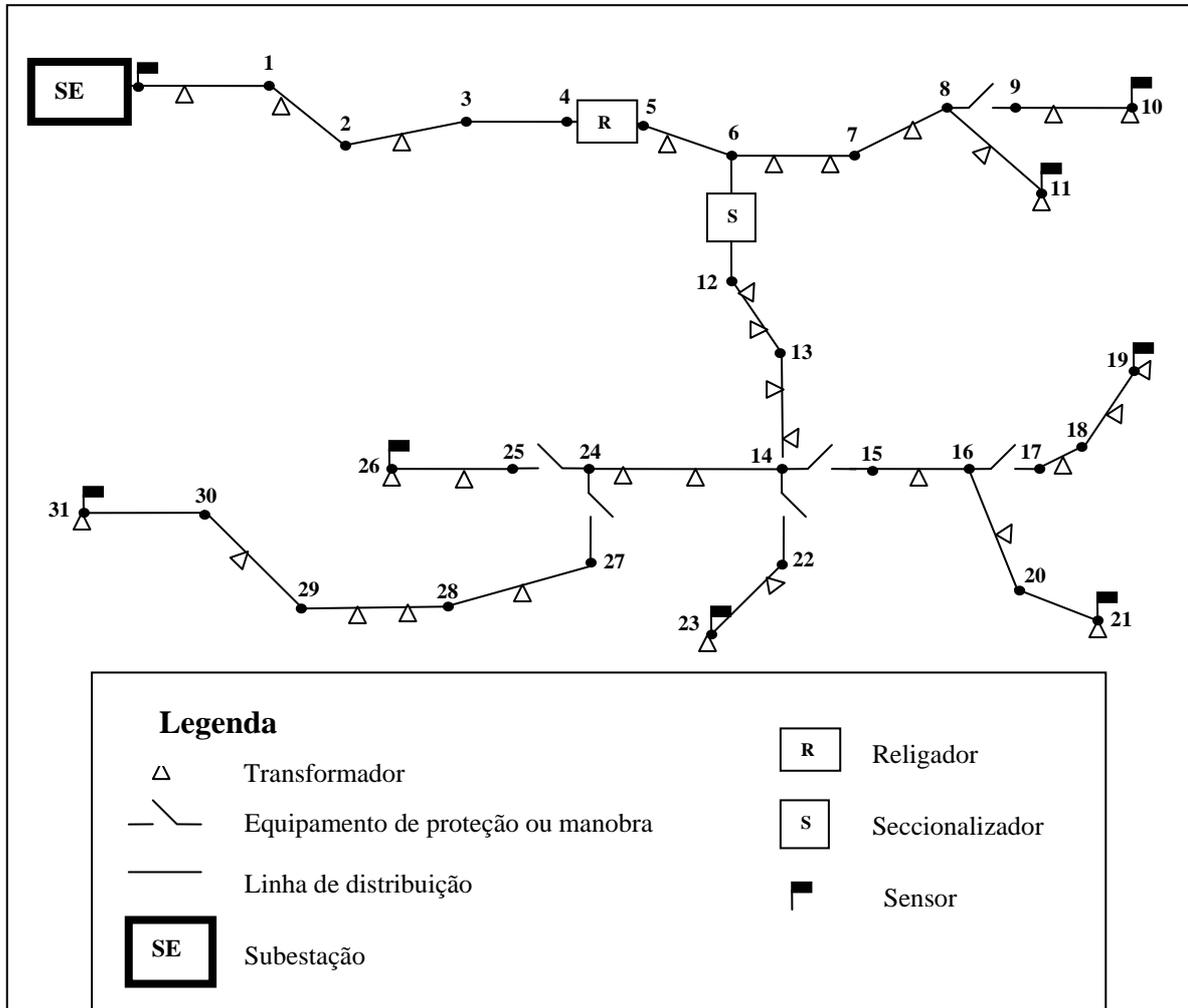


Figura 4.1: Desenho esquemático de um alimentador típico de distribuição

Dessa forma, neste capítulo são analisados os dois métodos propostos. Para a variável de monitoramento proposta por SENER e MALAGODI, será utilizado o parâmetro aqui chamado de  $\alpha_0$  e será dado como:

$$\alpha_0 = \frac{|V_{a0}|}{|V_{NF}|} \text{ (pu)} \quad \text{Eq. (4.4)}$$

onde  $V_{NF}$  é a tensão nominal fase-neutro da fonte, em volts.

Entretanto, para melhoria das análises do desequilíbrio de tensão, também será analisado o parâmetro  $\alpha_2$ , dado como:

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2}|}{|V_{NF}|} \quad (\text{pu}) \quad \text{Eq. (4.5)}$$

Além disso, também será analisado o parâmetro  $\Delta V_d$ , proposto em [17], com o detalhe de que neste trabalho,  $V_{d0}$  é a tensão de seqüência positiva da fonte. Como nos cálculos as tensões da fonte são consideradas equilibradas,  $|V_{d0}|$  será igual ao módulo da tensão fase-neutro nominal da fonte. Além disso,  $V_d$  será a tensão de seqüência positiva em qualquer ponto do alimentador. Desse modo, o cálculo desse parâmetro não irá comparar as tensões de seqüência positiva entre dois pontos quaisquer do alimentador e sim a tensão de seqüência positiva de um ponto do alimentador com a da fonte, sendo essa última considerada como referência.

Os cálculos de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  foram realizados no MatLab® para as seguintes situações:

- carga localizada no final de um alimentador, cabo 4 AWG CA, com 15 km de extensão;
- carga localizada no final de um alimentador, variando sua extensão de 0 a 20 km, para cinco tipos de cabos considerados, os quais são muito utilizados em alimentadores da CEMIG que atendem áreas urbanas:
  - ✓ cabo 336 MCM CA
  - ✓ cabo 4/0 AWG CA
  - ✓ cabo 1/0 AWG CA
  - ✓ cabo 2 AWG CA
  - ✓ cabo 4 AWG CA

Simulações no ATP® [19] com auxílio da ferramenta gráfica ATP-Draw® (versão 3.9) também foram realizadas de modo a confirmar os cálculos efetuados. Posteriormente, para verificar a defasagem entre os fasores, foram estimados fasores no MatLab® (versão 6.5) para os casos simulados no ATP®.

Além disso, ainda foram avaliadas aberturas monofásicas e bifásicas no alimentador representado na Figura 4.1.

Para o desequilíbrio acentuado de carga no circuito primário de RDA, foram analisadas quatro situações:

- a. carga ligada entre duas fases
- b. carga ligada entre uma fase e neutro
- c. carga ligada entre duas fases e neutro
- d. carga desequilibrada ligada em triângulo

Para a abertura monopolar no circuito primário de RDA, foram analisadas quatro situações:

- a) Modo analítico: representação de carga desequilibrada ligada em triângulo conectada no final de um alimentador trifásico com extensão de 2 km, sem condutor tocando o solo e sem banco de capacitores, para os cinco tipos de cabos descritos anteriormente.
- b) Através de simulações no ATP® e cálculo de fasores no MatLab® através da representação do alimentador da Figura 4.1 com as seguintes situações:
  - ✓ abertura da fase “a” sem cabo tocando o solo, com e sem banco de capacitores.
  - ✓ abertura da fase “a” com cabo tocando o solo no lado fonte com resistência de contato com a terra de 80 e 8000  $\Omega$ \*, com e sem banco de capacitores.
  - ✓ abertura da fase “a” com cabo tocando o solo no lado carga com resistência de contato com a terra de 80 e 8000  $\Omega$ , com e sem banco de capacitores.

Para a abertura bipolar no circuito primário de RDA, foram analisadas as mesmas situações da abertura monopolar, porém com abertura bipolar nas fases a e b.

## 4.2. RESUMO DA ANÁLISE DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Visando uma compreensão sintetizada dos casos citados anteriormente e apresentados no apêndice B sobre os níveis de desequilíbrio de tensão devido ao desequilíbrio acentuado de carga e aberturas monopolar e bipolar, é apresentada a Tabela 4.1 com os valores máximos de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , visando uma melhor comparação e avaliação entre os casos.

\* Os valores 8.000 e 80  $\Omega$  foram utilizados baseando-se na faixa típica de corrente de faltas de alta impedância num sistema com tensão fase-neutro de 7967 V, ou seja, 1 a 100 A.

Ressalta-se que nos casos de abertura monopolar e bipolar,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  foram calculados do lado carga, onde ficariam instalados os sensores.

Nos casos de desequilíbrio acentuado de carga, onde as tensões de fase apresentam valores muito baixos,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  atingiram seus valores máximos de 13%, 7% e 14%, respectivamente. Já no caso de abertura monopolar, os menores valores desses parâmetros foram de 40%, 40% e 42%, respectivamente. Na abertura bipolar, os parâmetros atingiram 44%, 0 e 73%, respectivamente. Dessa forma, verifica-se que o parâmetro  $\alpha_2$  não serve para distinguir um desequilíbrio de tensão entre uma abertura bipolar e um desequilíbrio acentuado de carga no alimentador, sendo por isso descartada a hipótese de sua utilização como grandeza de monitoramento de desequilíbrio de tensão para o propósito deste trabalho. Dessa forma, pode-se definir um limiar de 0,3 pu, com uma boa margem de segurança, para a sensibilização de um sensor quanto à detecção de falta de fase no alimentador, de modo a não operar para um desequilíbrio acentuado de carga.

Tabela 4.1 – Valores máximos de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  resultantes dos cálculos de desequilíbrio de tensão

Caso	Descrição	Bco capacitores (kvar)	Resistência contato cabo-solo(ohms)	Parâmetros deseq. tensão (pu)		
				Alfa 0	Alfa 2	DeltaVd
<b>Desequilíbrio acentuado de carga: cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20km da fonte</b>						
B.1.1	Carga ligada entre duas fases do alimentador	-	-	0,0	0,07	0,07
B.1.2	Carga ligada entre uma fase e neutro	-	-	0,13	0,04	0,04
B.1.3	Carga ligada entre duas fases e neutro	-	-	0,12	0,05	0,09
B.1.4	Carga desequilibrada ligada triângulo	-	-	0,00	0,02	0,14
<b>Abertura Monopolar</b>						
B.2.1	Cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20km da fonte	-	-	0,52	0,44	0,59
	Cabo 336 MCM CA com a carga localizada a 20km da fonte	-	-	0,52	0,52	0,52
B.2.2.1	Sem cabo tocando o solo: alimentador Figura 4.1	-	-	0,51	0,50	0,52
		300	-	0,52	0,51	0,52
		600	-	0,53	0,52	0,54
		1200	-	0,55	0,53	0,55
B.2.2.2	Com cabo tocando o solo no lado fonte: alimentador Figura 4.1	-	80	0,51	0,50	0,52
		1200	-	0,56	0,53	0,55
		-	8.000	0,51	0,50	0,52
		1200	-	0,55	0,53	0,55
B.2.2.3	Com cabo tocando o solo no lado carga: alimentador Figura 4.1	-	80	0,40	0,40	0,42
		1200	-	0,41	0,40	0,42
		-	8.000	0,50	0,49	0,52
		1200	-	0,55	0,53	0,55
<b>Abertura Bipolar</b>						
B.3.1	Cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20km da fonte	-	-	1,00	0,00	1,00
	Cabo 336 MCM com a carga localizada a 20km da fonte	-	-	1,00	0,00	1,00
B.3.2.1	Sem cabo tocando o solo: alimentador Figura 4.1	-	-	0,99	0,00	1,00
		1200	-	0,99	0,00	1,00
B.3.2.2	Com cabo tocando o solo no lado fonte: alimentador Figura 4.1	-	80	1,00	0,00	1,00
		1200	-	0,91	0,31	0,89
		-	8.000	1,00	0,00	1,00
		1200	-	0,91	0,31	0,89
B.3.2.3	Com cabo tocando o solo no lado carga: alimentador Figura 4.1	-	80	0,44	0,27	0,73
		1200	-	0,91	0,31	0,89
		-	8.000	0,44	0,27	0,73
		1200	-	0,91	0,31	0,89

É interessante ainda destacar a pouca influência em  $\alpha_0$  e  $\Delta V_d$  com a presença dos bancos de capacitores, dos valores de resistência de contato entre o cabo e o solo, e o lado de rompimento do mesmo (carga ou fonte). Isso é uma grande vantagem com relação aos métodos de corrente anteriormente apresentados, uma vez que a tendência das redes de distribuição é aumentar a utilização de cabos protegidos em seus circuitos primários de áreas urbanas e o rompimento desse tipo de cabo apresenta maior probabilidade de ocorrência de faltas de alta impedância devido a seu nível de isolamento.

Dessa forma, tanto  $\alpha_0$  e  $\Delta V_d$  podem ser considerados bons parâmetros para a distinção de um desequilíbrio de carga provocado por uma abertura monopolar/bipolar de um desequilíbrio de carga acentuado, apresentando grande probabilidade de detectar uma falta de fase no alimentador com segurança e confiabilidade.

Em termos de praticidade e custo do sensor e das informações no sistema de comunicação,  $\alpha_0$  se torna mais interessante, uma vez que trabalha apenas com os valores da tensão de seqüência zero no ponto de sensoriamento. Já  $\Delta V_d$  trabalha com a diferença entre a tensão de seqüência positiva no ponto de sensoriamento e a tensão de seqüência positiva da fonte. Na utilização de  $\alpha_0$  como parâmetro de detecção da falta, o sensor enviaria apenas um pulso ou *bit* para o COD, através de determinado canal de comunicação, apenas no momento da ocorrência da falta. Enquanto que com a utilização de  $\Delta V_d$ , o sensor teria que enviar o valor da tensão de seqüência positiva a cada instante pré-determinado para o COD, independente da ocorrência ou não da falta, de forma que um sistema computacional no COD fizesse os cálculos dos fasores das tensões de fase e seqüência, calculando  $\Delta V_d$  a cada instante, com o objetivo de monitorar o sistema com relação a uma falta de fase. Além disso, para medir a componente de seqüência positiva no ponto onde se localiza o sensor, é necessária a instalação de transformadores de potencial (TP) nas fases do circuito primário da RDA, o que poderia dificultar a implantação da metodologia com relação aos custos associados.

Assim, é proposta a utilização da tensão de seqüência zero como parâmetro de monitoramento do desequilíbrio de tensão em alimentadores de distribuição, visando a proteção contra rompimento de cabos do circuito primário de acordo com o nível de segurança pretendido.

Ressalta-se, porém, que a proposta de construção dos sensores e do sistema de comunicação dos sensores com o COD não é objeto de estudo deste trabalho. Entretanto, será proposto no capítulo seguinte como deve ser o funcionamento dos sensores, os critérios com

relação à quantidade e onde instalar os mesmos, além da lógica e algoritmo para localização da falta de fase no alimentador. Também é feita uma pequena abordagem sobre os requisitos do sistema de comunicação.

## 5. ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE ROMPIMENTO DE CONDUTORES PRIMÁRIOS DE RDA

Como visto no capítulo anterior,  $\alpha_0$  será considerado neste trabalho como o parâmetro de monitoramento do desequilíbrio de tensão em redes de distribuição, com o propósito principal da detecção de rompimento de condutores do circuito primário caídos e energizados ao alcance de pessoas e animais, caracterizando uma falta de alta impedância.

Sendo assim, é proposto neste capítulo um algoritmo para localização de abertura série de uma ou duas fases do alimentador, assim como suas principais características e observações relacionadas ao sistema de proteção associado.

O fenômeno de abertura série de fase(s) será chamado neste trabalho de “falta de fase(s)”, sendo que o algoritmo proposto é restringido à localização de falta de uma ou duas fases no alimentador supervisionado.

### 5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O SISTEMA DE SUPERVISÃO PARA DETECÇÃO DE FALTA DE FASE EM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO

Pode-se perceber que, na verdade, a solução proposta ao problema em questão está mais ligada à supervisão e controle do que à proteção de sistema, uma vez que os circuitos primários do alimentador são supervisionados com relação ao desequilíbrio de tensão do alimentador, para posterior localização da falta. Desse modo, deve-se disponibilizar todas as informações necessárias para que o operador do COD tenha condições para uma tomada de decisão segura e confiável com relação à abertura de equipamentos de proteção específicos do alimentador, assim como de manobras associadas, visando à segurança da população e menores impactos para as unidades consumidoras afetadas pela ocorrência da falta.

É importante ainda destacar que considerando o regime permanente senoidal (RPS) após alguns segundos da ocorrência, do ponto de vista de desequilíbrio de tensão nos circuitos à jusante da falta, o rompimento do cabo num vão é análogo a:

- rompimento de *jumper* em uma estrutura de encabeçamento de RDA;

- abertura monofásica de um equipamento de proteção, seja por curto-circuito ou operação manual;
- abertura monofásica manual ou defeito numa chave faca.

Ou seja, uma “falta de fase” num determinado circuito do alimentador pode ter sido ocasionada por vários tipos de ocorrências, mesmo algumas que não ofereçam risco ao público, mas que podem resultar em desequilíbrios de tensão entre as fases bem próximos um dos outros. Entretanto, a distinção do evento será mais precisa quanto maior o nível de supervisão do alimentador. Ou seja, quanto mais sensores instalados no alimentador, maior o nível de segurança do sistema proposto para a distinção entre um rompimento de condutor primário e outros eventos que causam praticamente o mesmo desequilíbrio de tensão.

O sistema proposto ainda deve distinguir uma falta de fase de outros eventos transitórios que eventualmente podem ocorrer no alimentador. Para isso, os sensores devem ignorar esses eventos transitórios através da inserção de um tempo de atraso para sua atuação. Em [2], MALAGODI propõe esse tempo de atraso na ordem de 30 milissegundos, ou seja, quase dois ciclos de fundamental.

Além disso, o sistema deve ignorar manobras de abertura e fechamento de chaves faca e fusível quando do restabelecimento de energia no sistema e/ou em contingências operativas. Para isso, deve ser criada uma lógica no sistema de supervisão para ignorar os desequilíbrios de tensão nessas situações.

A detecção da componente de seqüência zero pelo sensor pode ser realizada através da medição do campo elétrico resultante das três fases, dispensando o uso de transformadores de potencial e de corrente. Protótipos desse tipo de sensor foram construídos e testados no trabalho de MALAGODI [2], apresentando resultados satisfatórios. Quando as tensões primárias estão equilibradas, a tensão resultante induzida na antena do sensor é quase zero. No entanto, quando as tensões sofrem um grande desequilíbrio, a tensão na antena cresce e é detectada por um circuito eletrônico. Maiores detalhes com relação aos testes, diagrama de blocos e custo do sensor podem ser consultados em [2].

Apesar do sistema de comunicação também não ser objeto de estudo deste trabalho, recomenda-se que o mesmo atenda aos seguintes requisitos:

- transmissão simultânea de dados da atuação e identificação dos sensores, uma vez que vários sensores podem atuar ao mesmo tempo;
- confiabilidade ou imunidade a ruídos;

- segurança, de modo a verificar o estado de funcionamento dos sensores;
- baixo custo.

Além disso, sugere-se o estudo da viabilidade de utilização da comunicação via celular, que vem crescendo muito na área de supervisão e medição da distribuição.

## **5.2. METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA DE FASE EM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO**

Conhecendo-se o número das barras onde estão instalados os sensores atuados e não atuados por desequilíbrio de tensão, e os pares de barras que representam as ligações dos componentes do alimentador, é possível localizar a falta através da metodologia proposta por [17], a qual consiste basicamente nos seguintes passos:

- 1º. Identificação de todas as barras no caminho série de cada sensor até a barra da fonte, de forma ordenada, gerando-se um vetor para cada sensor chamado aqui de vetor de “percurso de rede”;
- 2º. Identificação de todas as barras comuns aos percursos de rede de cada sensor;
- 3º. Localização da falta nas duas últimas barras comuns aos percursos de rede de cada sensor, tomando-se a barra da fonte como a primeira barra.

Os dados de pares de barras são retirados da representação do alimentador em programas específicos da concessionária.

Já o número das barras onde estão instalados todos os sensores é uma informação que já deve estar disponível no programa de localização da falta de fase no COD, de acordo com o ponto de instalação de cada sensor. Os números das barras dos sensores atuados serão dados provenientes das informações enviadas pelos próprios sensores pelo sistema de comunicação ao COD.

Para identificar o percurso de rede de cada sensor, uma vez que se trabalha com barras não direcionais na representação do alimentador, é proposta neste trabalho uma metodologia criada pelo autor deste trabalho, baseada na geração de uma matriz, a qual possibilita a identificação da barra antecessora do percurso de rede de qualquer barra do alimentador. Essa matriz, denominada aqui de “Matriz de Percurso de Rede”, tem representadas em suas colunas, as barras sucessoras e em suas linhas, as barras antecessoras, de modo que há apenas um elemento com valor igual a 1 em cada coluna. Dado o número de barra representada por uma determinada coluna, sua barra antecessora dentro de seu percurso de rede é a barra

representada pela linha na qual está localizado o único elemento com valor igual a 1 daquela coluna. Dessa forma, conhecendo-se a barra antecessora do percurso de rede de qualquer barra, é possível conhecer todos os percursos de rede das barras do alimentador, possibilitando a localização da falta através dos três passos descritos anteriormente.

O sistema de localização de falta de fase pode ser representado pelo esquema da Figura 5.1.

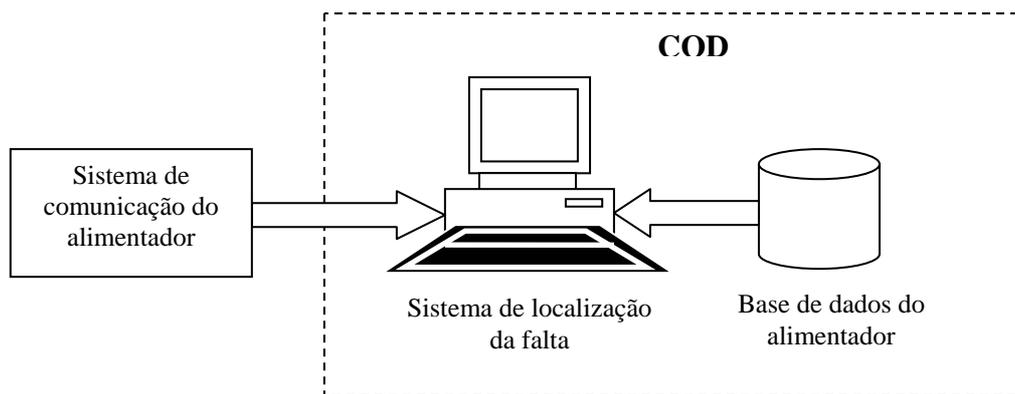


Figura 5.1: Representação do sistema de localização de falta de fase

### 5.3. ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA DE FASE EM ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO

Para testar a metodologia de localização de falta de fase englobando o procedimento da construção da “Matriz de Percurso de Rede”, foi elaborado um algoritmo no MatLab® o qual foi avaliado na localização de várias faltas provenientes de simulações no ATP®.

Para processar o algoritmo, é necessária a entrada de dois arquivos de dados gerados através de simulações no ATP® com o alimentador devidamente representando:

- ✓ um arquivo em formato texto contendo o número das barras dos sensores, assim como seus respectivos valores de tensão e instantes de tempo de todas as três fases de cada sensor;
- ✓ um arquivo em formato texto contendo as ligações dos componentes do alimentador, ou seja, seus respectivos pares de barras.

O diagrama de blocos da Figura 5.2 apresenta a estrutura geral do algoritmo, o qual é detalhado nos itens a seguir.

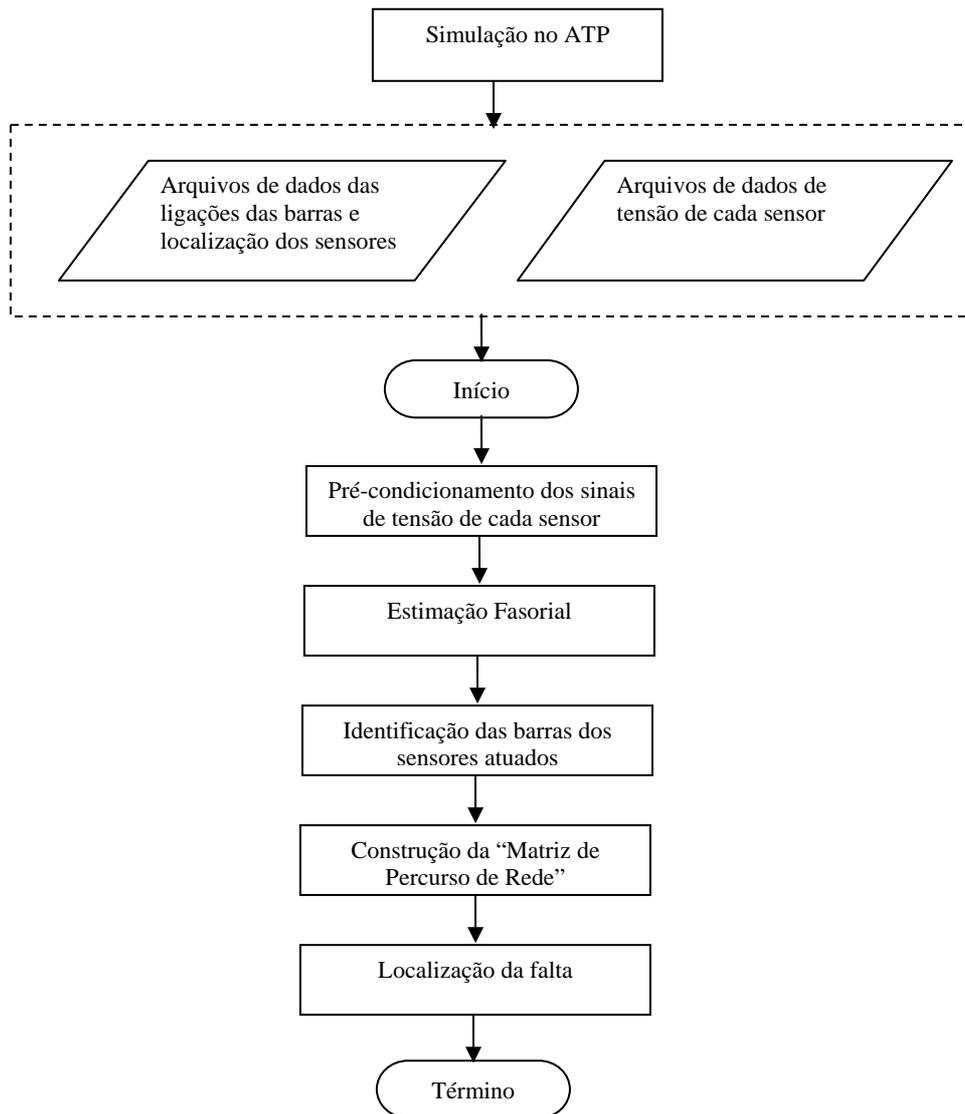


Figura 5.2: Diagrama de blocos da estrutura do algoritmo

### 5.3.1. Representação do alimentador no ATP

Para realizar as simulações do alimentador no ATP® é preciso representar as ligações de cada componente, as linhas aéreas de distribuição, as cargas, os equipamentos (manobra, proteção, compensação de reativos, etc), os sensores, a fonte e as faltas, além do conhecimento dos valores de tensão de saída do barramento da SE.

- **Ligações dos componentes**

A topologia do alimentador é dada através das ligações de cada componente ou de pares de barras, as quais devem ser numeradas.

- **Linhas Aéreas de Distribuição**

Ao contrário das linhas de transmissão, as linhas de distribuição aéreas apresentam, normalmente, vãos de pequena extensão. Conseqüentemente, estas linhas podem ser satisfatoriamente representadas através de segmentos de modelos  $\pi$ . A Figura 5.3 apresenta o modelo  $\pi$  representativo de segmento trifásico de comprimento  $\ell_{rs}$ , entre duas barras quaisquer r e s, onde  $Z_\ell$  e  $Y_t$  correspondem, respectivamente, à matriz de impedâncias longitudinais em  $\Omega/km$  e à matriz das admitâncias transversais, dada em  $S/km$ .

Na representação em componentes de fase, estas matrizes podem ser desequilibradas, o que normalmente ocorre nos sistemas de distribuição, onde não há a transposição dos condutores. Assim, é possível representá-las como sendo:

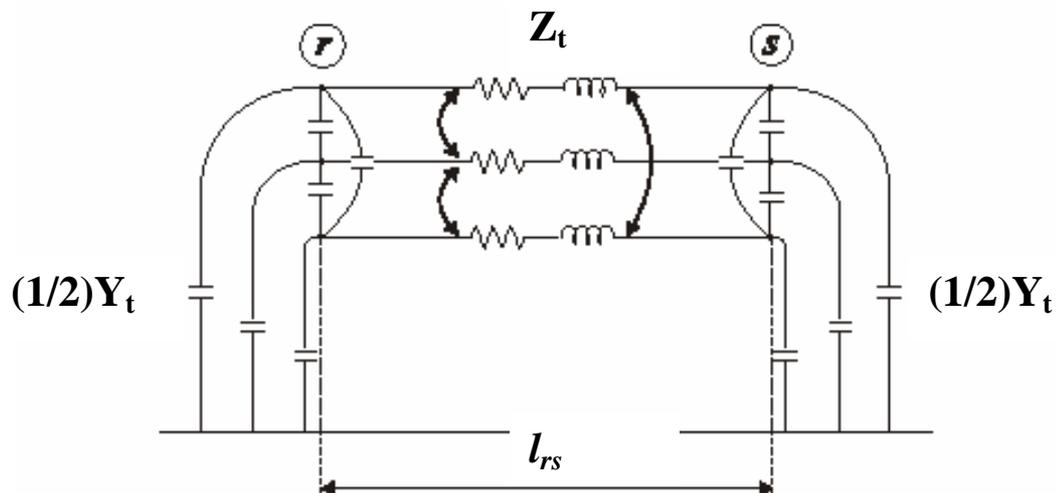


Figura 5.3: Modelo  $\pi$  representativo de segmento trifásico

$$Z_l = R + j\omega L = \begin{bmatrix} Z_{l(aa)} & Z_{l(ab)} & Z_{l(ac)} \\ Z_{l(ba)} & Z_{l(bb)} & Z_{l(bc)} \\ Z_{l(ca)} & Z_{l(bc)} & Z_{l(cc)} \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(5.1)}$$

$$Y_t = j\omega C = \begin{bmatrix} Y_{t(aa)} & Y_{t(ab)} & Y_{t(ca)} \\ Y_{t(ab)} & Y_{t(bb)} & Y_{t(bc)} \\ Y_{t(ca)} & Y_{t(bc)} & Y_{t(cc)} \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(5.2)}$$

No banco de dados das companhias de energia elétrica, em geral, já se encontram calculados os parâmetros elétricos dos cabos e equipamentos mais utilizados pela empresa. Geralmente, estes dados correspondem apenas aos parâmetros longitudinais de seqüência positiva e zero. Isso implica em se desprezar os parâmetros transversais das linhas e admitir que

$$\begin{aligned} Z_{l(p)} &= Z_{l(aa)} = Z_{l(bb)} = Z_{l(cc)} \\ Z_{l(m)} &= Z_{l(ab)} = Z_{l(bc)} = Z_{l(ca)} \\ Y_t &= 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. (5.3)}$$

onde se obtém no domínio das fases que

$$Z_{l(p)} = \frac{1}{3}(Z_{l(0)} + 2Z_{l(1)}) \quad \text{Eq. (5.4)}$$

$$Z_{l(m)} = \frac{1}{3}(Z_{l(0)} - Z_{l(1)}) \quad \text{Eq. (5.5)}$$

onde  $Z_{l(0)}$  e  $Z_{l(1)}$  são as impedâncias de seqüência zero e positiva da linha de distribuição, respectivamente.

Ressalta-se que normalmente os parâmetros de seqüência negativa são considerados iguais aos de seqüência positiva, por se tratar de elementos passivos.

- **Cargas**

É comum encontrar, ao longo das redes de distribuição, cargas ligadas a transformadores instalados tanto em ramais laterais, quanto no tronco principal dos alimentadores. Neste trabalho, as cargas foram representadas por elementos de impedância constante, sendo apenas trifásicas. A determinação do valor exato desta impedância exigiria o conhecimento do carregamento atual de cada transformador, no momento da falta. Como este dado não é disponível, variando em função do dia e horário, é necessário um mecanismo para representar um determinado patamar de carga. Pode ser adotado um método que consiste em distribuir a potência complexa total medida  $S_{atual}$  no alimentador em determinado instante (que pode representar um horário de carga leve, média ou pesada) proporcionalmente à potência nominal  $S_{nom}$  de cada transformador, sendo a carga total máxima instalada dada por:

$$S_{total} = \sum_{i=1}^t S_{nom} \quad \text{Eq. (5.6)}$$

sendo  $t$  igual ao número total de transformadores.

A determinação de  $S_{atual}$  pode ser realizada através de medições no barramento da SE ou através de cálculos de fluxo de potência em programa específico.

- **Equipamentos de proteção, manobra e compensação de reativos**

A representação de equipamentos de proteção e manobra pode ser feita através da inserção no ATP® de chaves normalmente fechadas, colocadas como blocos trifásicos, uma vez que nos interessa apenas sua localização, ressaltando-se que não há necessidade de representar as chaves de manobra normalmente abertas do alimentador que fazem a interface com outro alimentador para atendimento em contingência operativa.

Já equipamentos de compensação de reativos como bancos de capacitores podem ser representados com um bloco de circuito R-L-C série trifásico ligado em estrela aterrada, tendo apenas os valores de capacitância diferentes de zero.

- **Sensores**

Os sensores podem ser representados por medidores de tensão trifásicos instalados em barras localizadas em final de rede e em outras barras estratégicas, definidas de acordo com o nível de segurança pretendido.

- **Fonte**

Como a detecção e localização da falta são realizadas em regime permanente senoidal, não é necessário representar a impedância equivalente da fonte e sim conhecer apenas os valores de tensão de saída do barramento da SE que atende o alimentador no patamar de carga selecionado. Dessa forma, a SE é representada por fontes de tensão simétricas e defasadas de 120° entre si.

- **Faltas**

As faltas de fase representadas no alimentador são com abertura monofásica ou bifásica. Para isso é inserida no ATP® uma chave trifásica controlada por tempo onde se faz a abertura monofásica ou bifásica. É importante destacar que, com a inserção desse elemento, é criada mais uma barra no caso em simulação.

No caso de rompimento de cabos caídos ao solo, três situações a seguir podem ser representadas pela inserção de um bloco trifásico R-L-C, onde R representará o valor de resistência de contato do cabo com o solo para a(s) fase(s) sob falta:

- ✓ cabo caído ao solo, lado fonte, com determinada resistência de contato;
- ✓ cabo caído ao solo, lado carga, com determinada resistência de contato;

- ✓ cabo caído ao solo, lado fonte e lado carga, com determinada resistência de contato.

A Figura 5.4 apresenta uma imagem do ATP® que ilustra a representação de uma situação de abertura de fase(s) com cabo caído ao solo, lado carga, com determinada resistência de contato.

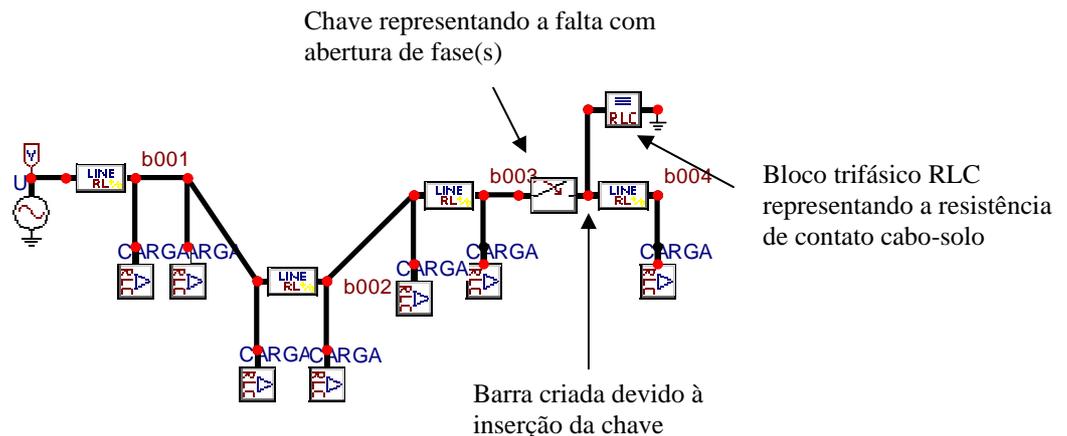


Figura 5.4: Imagem do ATP® representando uma situação de abertura de fase(s) com cabo caído ao solo, lado carga, com determinada resistência de contato.

### 5.3.2. Exemplo de localização de falta pelo algoritmo

Para melhor compreensão do algoritmo de localização de falta de fase, é dado um exemplo através do alimentador representado na Figura 5.5 com uma abertura monopolar no trecho 3-200, representando um rompimento de cabo caído ao solo, lado carga, com resistência de contato com a terra de  $8000\Omega$ . Ressalta-se que a barra 200 foi criada para a simulação da falta e a barra associada à fonte (ou SE) tem o número de 999.

#### a) Processamento do caso no ATP

Após representado no ATP® o alimentador com suas principais características, assim como os sensores de tensão, o caso é processado gerando dois arquivos de saída:

- ✓ arquivo contendo várias informações, dentre elas os dados de tensão de cada nó onde se encontram os respectivos sensores: **arquivo.lis**
- ✓ arquivo contendo várias informações, dentre elas todos os nós do alimentador e suas respectivas ligações ou pares de nós: **arquivo.atp**

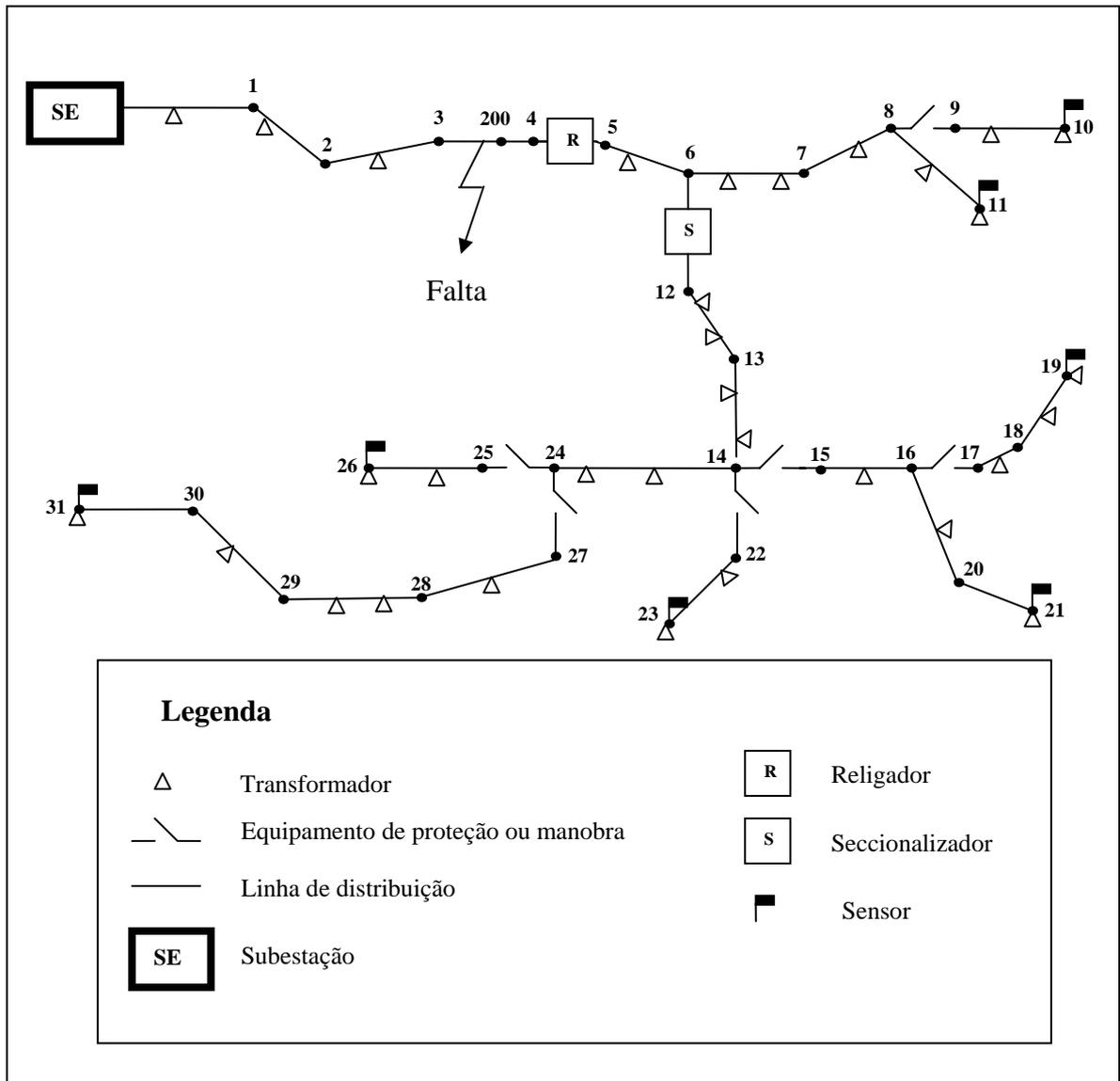


Figura 5.5: Desenho esquemático de um alimentador típico de distribuição

### b) Processamento do algoritmo

Ambos arquivos com extensão “lis” e “atp” são abertos no programa elaborado no MatLab®, e são gerados outros dois arquivos:

- ✓ arquivo contendo apenas os dados de tensão de cada fase onde foram instalados os sensores, assim como os passos de cada iteração (*STEP*) e seus respectivos valores de tempo: **arquivo.out**

- ✓ arquivo contendo apenas os pares de nós que representam as ligações dos mesmos através de linhas e equipamentos devidamente representados:

**arquivo.red**

### c) Identificação das barras e suas respectivas ligações (pares de barras)

No arquivo.red são identificadas todas as ligações série do alimentador e gerada uma matriz de dimensão (p x 2) onde cada par de barras é inserido numa linha, sendo p o número de pares de barras do alimentador.

Através dessa matriz, são identificadas todas as barras e contado o número de vezes em que cada uma aparece na matriz, de forma a gerar outra matriz. Além disso, as barras são organizadas na matriz em ordem crescente de numeração, ressaltando que a barra da fonte é colocada na primeira coluna da matriz, assim como o número de ligações que a mesma tem no caso. Uma terceira linha é ainda criada na matriz, sendo gerado uma numeração de 1 até o número de nós, com intervalo de 1, a qual servirá para passos posteriores do algoritmo. Essa matriz foi chamada de “Nós”.

Assim, tem-se para a matriz “Nós”:

Linha 1  $\Rightarrow$  número das barras (numeração da concessionária)

Linha 2  $\Rightarrow$  número de vezes que a barra aparece no arquivo.red

Linha 3  $\Rightarrow$  número da barra (numeração seqüencial do programa)

Para o caso em questão, tem-se a seguinte matriz “Nós”:

999	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	200
1	2	2	2	2	2	3	2	3	2	1	1	2	2	4	2	3	2	2	1	2	1	2	1	3	2	1	2	2	2	2	1	2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33

### d) Identificação dos sensores atuados

Antes de identificar os sensores atuados é necessário efetuar o tratamento dos dados de tensão, a identificação de todos os sensores, a estimação de fasores e o cálculo de  $\alpha_0$  para cada sensor, sendo todos esses passos detalhados a seguir.

No arquivo.out são retirados os dados de tensão das fases a, b e c de todos os sensores, gerando uma matriz com ((m x 3) + 2) colunas e de k linhas, onde m é o número de sensores e k o número de iterações do caso. Além disso, é gerado um vetor chamado de “Sensores” contendo o número dos sensores associados a cada 03 colunas dos dados de tensão da matriz anterior.

Para o caso em questão, tem-se o seguinte vetor “Sensores”:

$$\text{Sensores} = [19 \ 26 \ 31 \ 23 \ 21 \ 10 \ 11]$$

Os dados de tensão são filtrados com uma frequência de corte de 120 Hz a fim de retirar os harmônicos de 2ª ordem ou acima, presentes eventualmente na simulação no ATP®, de forma a evitar o *aliasing*.

Após a filtragem, os dados resultantes são interpolados obedecendo a um número de pontos por ciclo previamente determinado. No caso em questão, foi arbitrado 16 pontos/ciclo.

Após a interpolação é realizada a estimação de fasores para cada intervalo de tempo, para os valores de tensão de cada sensor. É utilizada a metodologia “Erros Mínimos Quadrados” com sete regressores [18] e realizada a compensação do deslocamento angular de cada fasor.

São então calculadas as tensões de seqüência e, posteriormente, o valor de  $\alpha_0$ . Se o valor calculado for maior que um valor pré-determinado, soma-se 1 numa determinada variável chamada de “contALFA0” que tem valor inicial igual a zero. Caso contrário, não é somado 1. No caso em questão, o valor limiar de  $\alpha_0$  foi definido como 0,3 pu, como sugerido no capítulo anterior.

Faz-se o mesmo procedimento para o próximo intervalo de tempo, de modo que quando a variável “contALFA0” atingir um valor pré-determinado relacionado a um atraso de tempo (da ordem de 30 ms, como sugerido por MALAGODI), é somado 1 num contador de sensores atuados e armazenado o número da barra onde está instalado aquele sensor, assim como o último valor calculado de  $\alpha_0$ . Esse procedimento proporciona um atraso de tempo na atuação do sensor, permitindo a não atuação em operações transitórias no sistema. Nesse instante, já não é mais preciso continuar a estimação de fasores desse sensor e todo o processo é realizado para o próximo sensor até que se percorra os dados de tensão de todos os sensores.

Como resultado desse procedimento, tem-se o número de sensores atuados numa variável chamada de “NSA\_ALFA0” e o número dos nós dos sensores atuados e seus respectivos valores finais de  $\alpha_0$  armazenados numa matriz chamada “MSA\_ALFA0”.

Para o caso em questão tem-se:

$$\text{NSA\_ALFA0} = 7$$

$$\text{MSA\_ALFA0} = \begin{bmatrix} 19 & 26 & 31 & 23 & 21 & 10 & 11 \\ 0.5051 & 0.5051 & 0.5051 & 0.5051 & 0.5051 & 0.5051 & 0.5051 \end{bmatrix}$$

e) **Montagem da “Matriz de Percurso de Rede” e metodologia de localização de falta**

Para a localização da falta de fase em alimentador é utilizada a metodologia proposta em [17], como descrito anteriormente. A metodologia é ilustrada tomando-se como exemplo o alimentador representado na Figura 5.5 com um rompimento de condutor no trecho 13-12 e não no trecho 3-200 considerado anteriormente.

Dessa forma, atuarão os sensores instalados nos seguintes pontos: 19, 21, 23, 26 e 31. Partindo-se da barra onde se encontra cada sensor atuado, devem ser conhecidas todas as barras à montante que estiverem em série com esses pontos até o nó da fonte, ou o que é chamado aqui de “percurso de rede” de cada uma dessas barras.

Dessa forma, tem-se os seguintes “percursos de rede”, sendo que a barra da fonte tem o número 999:

$$\begin{aligned} 19 &\rightarrow [19 \ 18 \ 17 \ 16 \ 15 \ 14 \ 13 \ 12 \ 6 \ 5 \ 4 \ 200 \ 3 \ 2 \ 999] \\ 21 &\rightarrow [21 \ 20 \ 16 \ 15 \ 14 \ 13 \ 12 \ 6 \ 5 \ 4 \ 200 \ 3 \ 2 \ 999] \\ 23 &\rightarrow [23 \ 22 \ 14 \ 13 \ 12 \ 6 \ 5 \ 4 \ 200 \ 3 \ 2 \ 999] \\ 26 &\rightarrow [26 \ 25 \ 24 \ 14 \ 13 \ 12 \ 6 \ 5 \ 4 \ 200 \ 3 \ 2 \ 999] \\ 31 &\rightarrow [31 \ 30 \ 29 \ 28 \ 27 \ 24 \ 14 \ 13 \ 12 \ 6 \ 5 \ 4 \ 200 \ 3 \ 2 \ 999] \end{aligned}$$

Identificando todas as barras comuns aos “percursos de rede” dos sensores, obtém-se o seguinte vetor:

$$[14 \ 13 \ 12 \ 6 \ 5 \ 4 \ 200 \ 3 \ 2 \ 999]$$

Segundo a metodologia, a falta estaria localizada entre as duas últimas barras comuns partindo-se da barra da fonte, ou seja, a indicação da falta seria entre as barras 14 e 13, o que não é verdade. Porém, deve-se considerar as barras do “percurso de rede” de cada sensor como apenas aquelas à montante e em série que são derivações até a barra da fonte, porém podendo incluir a barra da fonte e a barra onde está localizado o sensor, obtendo-se, dessa forma, os seguintes “percursos de rede”:

$$\begin{aligned} 19 &\rightarrow [19 \ 16 \ 14 \ 6 \ 999] \\ 21 &\rightarrow [21 \ 16 \ 14 \ 6 \ 999] \\ 23 &\rightarrow [23 \ 14 \ 6 \ 999] \\ 26 &\rightarrow [26 \ 24 \ 14 \ 6 \ 999] \\ 31 &\rightarrow [31 \ 24 \ 14 \ 6 \ 999] \end{aligned}$$

A informação de quais barras são barras de derivação pode ser retirada da segunda linha da matriz “Nós”, bastando que se verifique quais barras possuem mais de duas ligações.

Para este exemplo, as barras comuns a todos os “percursos de rede” serão: 14, 6 e 999. Usando novamente a metodologia descrita em [17] adicionando-se o procedimento descrito anteriormente, a indicação da falta seria acertadamente entre os nós 14 e 6. Apesar de não apontar o ponto exato de localização da falta, o uso da metodologia indica o trecho correto onde está localizada a falta entre duas barras de derivação. Dessa forma, para que se possa utilizar essa metodologia de localização da falta é importante considerar apenas as barras de derivação, uma barra de derivação e a barra associada à fonte (no caso de atuação de todos os sensores), e uma barra de derivação e a barra onde está localizado o sensor (no caso de atuação de apenas um sensor), para a seleção das duas últimas barras comuns aos “percursos de rede” de todos os sensores atuados.

Por isso, para o desenvolvimento do algoritmo, é fundamental conhecer além da identificação das barras onde estão instalados os sensores atuados, a quantidade de ligações que cada barra apresenta e o “percurso de rede” de cada sensor atuado. Para conhecer o “percurso de rede” de cada sensor é preciso conhecer o direcionamento completo da rede, englobando inclusive os ramais provenientes de derivações, de modo que, para qualquer ponto selecionado, seja possível identificar as barras que constituem seu “percurso de rede”.

Propõe-se então neste trabalho uma nova metodologia criada pelo autor, que consiste em determinar uma “Matriz de Percurso de Rede”, construída através dos passos a seguir, tomando-se como exemplo o alimentador em questão e a falta localizada no trecho 3-200:

1º. Montar uma matriz nula quadrada de ordem  $n$ , onde  $n$  é o número total de barras do alimentador. Para o caso em questão tem-se uma matriz nula  $33 \times 33$ .

De um modo fictício, a numeração das barras são colocadas nas colunas e linhas, simetricamente, ressaltando que a barra da fonte deve estar localizada na primeira coluna e primeira linha. Entretanto, para facilitar o procedimento da montagem da “Matriz de Percurso de Rede”, toma-se como referência todas as barras vinculadas à numeração seqüencial das colunas e linhas da matriz até então montada. Pode-se então utilizar para isto, a terceira linha da matriz “Nós”. Tomando-se como exemplo a barra “15” do alimentador em questão, a mesma estará representada na matriz com o número “16” e estará localizada na coluna 16 e linha 16.

2º. Inserir o número 1 em dois elementos da matriz para cada par de barras, uma vez que não se sabe num par de barras qual é a antecessora tomando-se como base a barra da fonte, ou seja, até o momento não existe a informação do direcionamento das barras. Assim, para o par de barras “a-b”, onde “a” e “b” são os números de determinadas



4°. Zerar todos os elementos que não fazem parte do “percurso de rede”. Partindo-se da primeira linha onde é representada a barra da fonte, deve-se identificar os elementos que têm o valor 1 e zerar os seus elementos simétricos, ressaltando-se que quando o elemento for uma barra fim de rede não há necessidade de se fazer esse procedimento, uma vez que sua linha já se encontra com todos os elementos nulos. Para cada elemento identificado, faz-se o mesmo procedimento, até que se percorra todas as barras da rede, ressaltando a necessidade de aplicação de uma função de memória ordenada com atualização, a qual é detalhada a seguir.

Como exemplo, será utilizada a rede em questão.

- 1) Partindo-se da primeira linha, identifica-se o elemento (1,2);
- 2) Então se deve zerar o elemento (2,1). Utilizando a numeração da coluna desse primeiro elemento identificado que é 2, deve-se passar para a linha 2 e fazer o mesmo procedimento sucessivamente até se atingir a linha 7.
- 3) Na linha 7, como o elemento (7,6) já se encontra zerado, tem-se os elementos (7,8) e (7,13) dessa linha com valor igual a 1. Logo, deve-se zerar os elementos (8,7) e (13,7).

Porém, nessa etapa há duas opções: passar para a linha 8 ou para a linha 13. Para qualquer uma das linhas escolhidas, deve-se retornar posteriormente para continuar o procedimento na outra linha. Dessa forma, é preciso utilizar uma espécie de memória ordenada e que seja atualizada constantemente, de forma a serem armazenados os números de todas as linhas que serão percorridas ordenadamente. A essa memória será utilizada uma variável chamada “Pilha”. Armazenando na “Pilha” os valores 8 e 13 nessa ordem, pode-se prosseguir o procedimento, porém agora sempre atualizando a “Pilha”.

- 4) Como o primeiro elemento da “Pilha” é 8, deve-se passar para a linha 8. Como o elemento (8,7) já se encontra zerado, tem-se apenas o elemento (8,9) dessa linha com valor igual a 1. Logo, deve-se zerar o elemento (9,8), apagar o valor 8 da “Pilha” e colocar o valor 9 na “Pilha” após o valor 13, que era o último no passo anterior. Assim, a “Pilha” terá agora os valores 13 e 9 nessa ordem.
- 5) Como o primeiro elemento da “Pilha” é o 13, deve-se passar para a linha 13. Como o elemento (13,7) já se encontra zerado, tem-se apenas o elemento (13,14) dessa linha com valor igual a 1. Logo, deve-se zerar o elemento (14,13), apagar o valor 13 da “Pilha” e colocar o valor 14 na “Pilha” após o

valor 9, que era o último no passo anterior. Assim, a “Pilha” terá agora os valores 9 e 14 nessa ordem.

- 6) Como o primeiro elemento da “Pilha” é o 9, deve-se passar para a linha 9. Como o elemento (9,8) já se encontra zerado, tem-se os elementos (9,10) e (9,12) dessa linha com valor igual a 1. Como a linha 12 representa uma barra fim de rede, não é necessário zerar a linha 12, uma vez que já se encontra zerada e nem armazenar esse número na memória, uma vez que a rede tem uma terminação nesse ponto. Logo, deve-se zerar apenas o elemento (10,9), apagar o valor 9 da “Pilha” e colocar o valor 10 na “Pilha” após o valor 14, que era o último no passo anterior. Assim, a “Pilha” terá agora os valores 14 e 10 nessa ordem.

O procedimento então deve ser seguido até que se encontre a “Pilha” sem elementos armazenados, momento o qual sinaliza que a rede foi completamente percorrida. Dessa forma, a “Matriz Percurso de Rede” se encontra concluída e para o caso em questão essa matriz está apresentada na Figura 5.7.

Pode-se observar que para cada coluna existe apenas um elemento com valor 1. A respectiva linha desse elemento indica a barra antecessora da barra da coluna em análise. Dessa forma, pode-se percorrer toda a rede até o nó da fonte partindo de qualquer barra. Por exemplo, partindo-se da barra 25 referida à matriz, tem-se na coluna 25 apenas o elemento (15,25) com valor igual a 1. Sendo assim, a barra antecessora à barra 25 é a 15, que representam as barras 24 e 14, respectivamente, na rede do alimentador. O mesmo procedimento deve ser realizado sucessivamente até atingir o nó da fonte.

Dessa forma, pode-se identificar facilmente o “percurso de rede” de cada sensor atuado, de modo a localizar a falta, sendo a “Matriz de Percurso de Rede” montada apenas uma vez em todo o processo de processamento do algoritmo.

Para o caso em análise onde há um rompimento de fase no trecho 3-200, todos os sensores atuarão. Logo, haverá os seguintes “percursos de rede” já referidos aos nós do alimentador:

10 → [10 9 8 7 6 5 4 200 3 2 999]  
 11 → [11 8 7 6 5 4 200 3 2 999]  
 19 → [19 18 17 16 15 14 13 12 6 5 4 200 3 2 999]  
 21 → [21 20 16 15 14 13 12 6 5 4 200 3 2 999]  
 23 → [23 22 14 13 12 6 5 4 200 3 2 999]  
 26 → [26 25 24 14 13 12 6 5 4 200 3 2 999]  
 31 → [31 30 29 28 27 24 14 13 12 6 5 4 200 3 2 999]

	999	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	200				
999	1																																				
1	2																																				
2	3																																				
3	4																																				
4	5																																				
5	6																																				
6	7																																				
7	8																																				
8	9																																				
9	10																																				
10	11																																				
11	12																																				
12	13																																				
13	14																																				
14	15																																				
15	16																																				
16	17																																				
17	18																																				
18	19																																				
19	20																																				
20	21																																				
21	22																																				
22	23																																				
23	24																																				
24	25																																				
25	26																																				
26	27																																				
27	28																																				
28	29																																				
29	30																																				
30	31																																				
31	32																																				
200	33																																				

Figura 5.7: Matriz “Percurso de Rede” para o exemplo dado

As barras comuns a todos os “percursos de rede” são 6, 5, 4, 200, 3, 2 e 999. Considerando-se que dentre essas barras existe apenas uma barra de derivação (6), pode-se afirmar que a falta está localizada entre o nó 6 e o da fonte (999).

Para complementar o processo de detecção e localização da falta, o algoritmo ainda apresenta rotinas para os seguintes objetivos:

- ✓ identificação de inexistência de falta;
- ✓ localização de equipamentos de proteção que tiveram operação de abertura monofásica ou bifásica, principalmente chaves fusíveis, desde que haja dois sensores instalados nesses equipamentos, sendo um instalado no lado fonte e outro no lado carga.

Porém, é importante salientar que o algoritmo, na forma como foi implementado, trabalha exclusivamente com barras que representam circuitos trifásicos. Apesar de ser uma limitação,

pode-se dizer que sua abrangência é muito grande diante do problema de rompimento de cabos o qual tem grande risco em áreas com alta densidade populacional, onde existem circuitos trifásicos em sua maioria. Além disso, a metodologia de detecção de falta de fase para ramais monofásicos é diferente da metodologia aqui apresentada, uma vez que existe apenas uma fase. Nesses casos, a falta de fase poderá ser detectada pela ausência de campo elétrico nos sensores. Já a sua localização também necessita da identificação dos “percursos de rede” dos sensores instalados nos finais de redes monofásicas. É preciso, pois, adicionar mais uma rotina no algoritmo de modo a incluir as barras monofásicas, suas ligações e seus respectivos sensores para encontrar seus respectivos “percursos de rede” para aumentar a abrangência do algoritmo para barras monofásicas.

#### 5.4. SIMULAÇÃO DE CASOS

Para verificar o comportamento do algoritmo, foram testados 194 casos com  $\Delta t = 100 \mu s$  e  $t_{máx} = 100 \text{ ms}$ , utilizando dois alimentadores representados no ATP®, em diferentes condições:

- ✓ inexistência de falta;
- ✓ variação do ponto de falta;
- ✓ abertura monopolar e abertura bipolar;
- ✓ variação da resistência de contato com a terra de 80 e 8.000  $\Omega$ ;
- ✓ variação do lado de contato do cabo ao solo: lado carga, lado fonte e ambos;
- ✓ presença e ausência de bancos de capacitores: 300 e 600 kVAr, a montante e a jusante da falta.
- ✓ com e sem sensores em determinados equipamentos de proteção.

As localizações das faltas foram selecionadas para atender as seguintes situações:

- falta localizada próxima à fonte, entre uma barra de derivação e outra barra que não seja derivação, com atuação de todos os sensores;
- falta localizada em final de rede, com atuação de apenas um sensor;
- falta que originou a abertura monofásica ou bifásica de um equipamento de proteção, com atuação de alguns sensores, partindo-se do pressuposto de instalação de dois sensores nesse equipamento, sendo um instalado no lado fonte e outro no lado carga.

- falta localizada em um trecho contendo pelo menos uma barra que não seja de derivação, com atuação de alguns sensores.

Na seção 5.4.1, são apresentados os casos de número 1 a 97, envolvendo um alimentador fictício, mas típico de redes de distribuição.

Na seção 5.4.2, são apresentados os casos de número 98 a 194, envolvendo um alimentador real da CEMIG.

#### 5.4.1. Testes de casos de um alimentador fictício

Basicamente, foram analisadas faltas em quatro pontos do alimentador representado na Figura 5.5, onde a barra 200 foi criada para inserção da chave que representa a abertura da(s) fase(s). As características desse alimentador estão descritas no item B.2.2 do Apêndice B.

A seguir, são apresentadas as Tabelas 5.1 a 5.4 com os resultados da localização das faltas indicadas pelo algoritmo para os casos simulados. Uma avaliação do comportamento do algoritmo é apresentada logo após as Tabelas dos casos simulados.

Tabela 5.1 – Resultados dos casos 2 a 25

Local exato da falta: trecho 3-200									
Nó sucessor ao nó 200: nó 4									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
1	nenhuma	-	-	-	-	-	-	Não há falta	-
2	monopolar	-	-	-	-	-	-	999 - 6	Sim
3	monopolar	600	3 e 12	-	-	-	-	999 - 6	Sim
4	monopolar	-	-	x	-	80	-	999 - 6	Sim
5	monopolar	600	3 e 12	x	-	80	-	999 - 6	Sim
6	monopolar	-	-	x	-	8.000	-	999 - 6	Sim
7	monopolar	600	3 e 12	x	-	8.000	-	999 - 6	Sim
8	monopolar	-	-	-	x	80	-	999 - 6	Sim
9	monopolar	600	3 e 12	-	x	80	-	999 - 6	Sim
10	monopolar	-	-	-	x	8000	-	999 - 6	Sim
11	monopolar	600	3 e 12	-	x	8000	-	999 - 6	Sim
12	bipolar	-	-	-	-	-	-	999 - 6	Sim
13	bipolar	600	3 e 12	-	-	-	-	999 - 6	Sim
14	bipolar	-	-	x	-	80	-	999 - 6	Sim
15	bipolar	600	3 e 12	x	-	80	-	999 - 6	Sim
16	bipolar	-	-	x	-	8000	-	999 - 6	Sim
17	bipolar	600	3 e 12	x	-	8000	-	999 - 6	Sim
18	bipolar	-	-	-	x	80	-	999 - 6	Sim
19	bipolar	600	3 e 12	-	x	80	-	999 - 6	Sim
20	bipolar	-	-	-	x	8000	-	999 - 6	Sim
21	bipolar	600	3 e 12	-	x	8000	-	999 - 6	Sim
22	bipolar	-	-	x	x	80	-	999 - 6	Sim
23	bipolar	600	3 e 12	x	x	80	-	999 - 6	Sim
24	bipolar	-	-	x	x	8000	-	999 - 6	Sim
25	bipolar	600	3 e 12	x	x	8000	-	999 - 6	Sim

Tabela 5.2 – Resultados dos casos 26 a 49

Local exato da falta: trecho 20-200									
Nó sucessor ao nó 200: nó 21									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
26	nenhuma	-	-	-	-	-	-	Não há falta	-
27	monopolar	600	3 e 21	-	-	-	-	16-21	Sim
28	monopolar	-	-	x	-	80	-	16-21	Sim
29	monopolar	600	3 e 21	x	-	80	-	16-21	Sim
30	monopolar	-	-	x	-	8.000	-	16-21	Sim
31	monopolar	600	3 e 21	x	-	8.000	-	16-21	Sim
32	monopolar	-	-	-	x	80	-	16-21	Sim
33	monopolar	600	3 e 21	-	x	80	-	16-21	Sim
34	monopolar	-	-	-	x	8000	-	16-21	Sim
35	monopolar	600	3 e 21	-	x	8000	-	16-21	Sim
36	monopolar	-	-	-	-	-	-	16-21	Sim
37	bipolar	600	3 e 21	-	-	-	-	16-21	Sim
38	bipolar	-	-	x	-	80	-	16-21	Sim
39	bipolar	600	3 e 21	x	-	80	-	16-21	Sim
40	bipolar	-	-	x	-	8000	-	16-21	Sim
41	bipolar	600	3 e 21	x	-	8000	-	16-21	Sim
42	bipolar	-	-	-	x	80	-	16-21	Sim
43	bipolar	600	3 e 21	-	x	80	-	16-21	Sim
44	bipolar	-	-	-	x	8000	-	16-21	Sim
45	bipolar	600	3 e 21	-	x	8000	-	16-21	Sim
46	bipolar	-	-	x	x	80	-	16-21	Sim
47	bipolar	600	3 e 21	x	x	80	-	16-21	Sim
48	bipolar	-	-	x	x	8000	-	16-21	Sim
49	bipolar	600	3 e 21	x	x	8000	-	16-21	Sim

Tabela 5.3 – Resultados dos casos 50 a 73

Local exato da falta: trecho 14-15									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
50	monopolar	-	-	x	-	80	14	14-15	Sim
51	monopolar	600	3 e 16	x	-	80	14	14-15	Sim
52	monopolar	-	-	x	-	80	14	14-15	Sim
53	monopolar	600	3 e 16	x	-	80	14	14-15	Sim
54	monopolar	-	-	x	-	8.000	14	14-15	Sim
55	monopolar	600	3 e 16	x	-	8.000	14	14-15	Sim
56	monopolar	-	-	-	x	80	14	14-15	Sim
57	monopolar	600	3 e 16	-	x	80	14	14-15	Sim
58	monopolar	-	-	-	x	8000	14	14-15	Sim
59	monopolar	600	3 e 16	-	x	8000	14	14-15	Sim
60	bipolar	-	-	-	-	-	14	14-15	Sim
61	bipolar	600	3 e 16	-	-	-	14	14-15	Sim
62	bipolar	-	-	x	-	80	14	14-15	Sim
63	bipolar	600	3 e 16	x	-	80	14	14-15	Sim
64	bipolar	-	-	x	-	8000	14	14-15	Sim
65	bipolar	600	3 e 16	x	-	8000	14	14-15	Sim
66	bipolar	-	-	-	x	80	14	14-15	Sim
67	bipolar	600	3 e 16	-	x	80	14	14-15	Sim
68	bipolar	-	-	-	x	8000	14	14-15	Sim
69	bipolar	600	3 e 16	-	x	8000	14	14-15	Sim
70	bipolar	-	-	x	x	80	14	14-15	Sim
71	bipolar	600	3 e 16	x	x	80	14	14-15	Sim
72	bipolar	-	-	x	x	8000	14	14-15	Sim
73	bipolar	600	3 e 16	x	x	8000	14	14-15	Sim

Tabela 5.4 – Resultados dos casos 74 a 97

Local exato da falta: trecho 13-200									
Nó sucessor ao nó 200: nó 14									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
74	monopolar	-	-	-	-	-	-	06-14	Sim
75	monopolar	600	3 e 14	-	-	-	-	06-14	Sim
76	monopolar	-	-	x	-	80	-	06-14	Sim
77	monopolar	600	3 e 14	x	-	80	-	06-14	Sim
78	monopolar	-	-	x	-	8.000	-	06-14	Sim
79	monopolar	600	3 e 14	x	-	8.000	-	06-14	Sim
80	monopolar	-	-	-	x	80	-	06-14	Sim
81	monopolar	600	3 e 14	-	x	80	-	06-14	Sim
82	monopolar	-	-	-	x	8000	-	06-14	Sim
83	monopolar	600	3 e 14	-	x	8000	-	06-14	Sim
84	bipolar	-	-	-	-	-	-	06-14	Sim
85	bipolar	600	3 e 14	-	-	-	-	06-14	Sim
86	bipolar	-	-	x	-	80	-	06-14	Sim
87	bipolar	600	3 e 14	x	-	80	-	06-14	Sim
88	bipolar	-	-	x	-	8000	-	06-14	Sim
89	bipolar	600	3 e 14	x	-	8000	-	06-14	Sim
90	bipolar	-	-	-	x	80	-	06-14	Sim
91	bipolar	600	3 e 14	-	x	80	-	06-14	Sim
92	bipolar	-	-	-	x	8000	-	06-14	Sim
93	bipolar	600	3 e 14	-	x	8000	-	06-14	Sim
94	bipolar	-	-	x	x	80	-	06-14	Sim
95	bipolar	600	3 e 14	x	x	80	-	06-14	Sim
96	bipolar	-	-	x	x	8000	-	06-14	Sim
97	bipolar	600	3 e 14	x	x	8000	-	06-14	Sim

Nos casos 1 e 26, onde não havia falta, o algoritmo indicou corretamente a inexistência da mesma.

Para todos os outros casos onde existia falta, a indicação da localização do trecho da falta pelo algoritmo foi correta, independente das características das várias situações simuladas.

Porém, quando a falta estava localizada entre duas barras que não são derivações, ou mesmo entre duas barras em que pelo menos uma não é derivação, o algoritmo indicou o trecho entre as duas barras de derivações das extremidades que contém o trecho exato da falta. Como exemplo, nos casos 74 a 97 a falta estava localizada entre as barras 13 e 200. Porém, nenhuma dessas barras é de derivação, mas estão inseridas no trecho das barras de derivação 06 e 14. Dessa forma, o algoritmo indicou que a falta está localizada dentro do trecho 06-14, que é uma indicação correta de localização da falta, mas não exata.

De qualquer forma, com essa indicação o operador do COD poderá rapidamente decidir por abrir remotamente o primeiro equipamento de proteção ou de manobra telecontrolado a montante da falta, desenergizando o circuito da falta, sendo que, no caso de um rompimento

de condutor primário caído ao solo, o risco de acidentes é eliminado com essa operação. Posteriormente, de acordo com as alternativas de contingência operativa daquele sistema de distribuição, pode-se isolar apenas o trecho sob falta, restabelecendo o fornecimento de energia para as demais unidades consumidoras localizadas fora do trecho. Como exemplo, se nos casos 74 a 97, existisse uma outra alternativa de alimentação no ponto 19 e o seccionizador instalado no trecho 6-12 fosse telecontrolado, poder-se-ia de imediato abrir o seccionizador remotamente, desligando, a princípio, todo o fornecimento de energia das unidades consumidoras localizadas a jusante da barra 12. Porém, com o auxílio de equipes de operação, poder-se-ia abrir a chave localizada no trecho 14-15 e fechar a chave de interligação com o outro alimentador que estaria localizada no ponto 19, restabelecendo a energia para todas as unidades consumidoras instaladas entre as barras 15 e 19 e entre as barras 16 e 21.

Já nas simulações dos casos 50 a 73, onde a falta está localizada no trecho 14-15, o algoritmo indicou a localização exata da mesma, uma vez que foram inseridos dois sensores nos pontos 14 e 15, respectivamente. Essas simulações foram realizadas para mostrar que caso seja de interesse da concessionária distinguir uma falta provocada por rompimentos de cabos com características de falta de alta impedância, de uma falta onde um equipamento de proteção operou abrindo uma ou duas fases (como chaves fusíveis), basta apenas colocar dois sensores próximos à estrutura onde está localizado o equipamento, sendo um instalado na primeira estrutura à montante e outro na primeira estrutura à jusante, por exemplo.

Se houver uma correlação de informações entre as barras dos sensores instalados nos equipamentos de proteção com seu respectivo código de identificação, o algoritmo poderá informar, no caso desse tipo de ocorrência, o equipamento que operou com sua respectiva localização, antes mesmo de qualquer cliente ligar para a concessionária reclamando da falta de energia em sua unidade consumidora. Isso proporcionará à concessionária uma maior rapidez no atendimento desses tipos de ocorrências, podendo reduzir inclusive o tempo real de interrupção de energia das unidades consumidoras afetadas, além de aumentar o nível de segurança na detecção de rompimento de condutores.

#### **5.4.2. Testes de casos de um alimentador da CEMIG**

Um alimentador de 13,8 kV da CEMIG foi representado no ATP® com sua topologia apresentada na Figura 5.8.

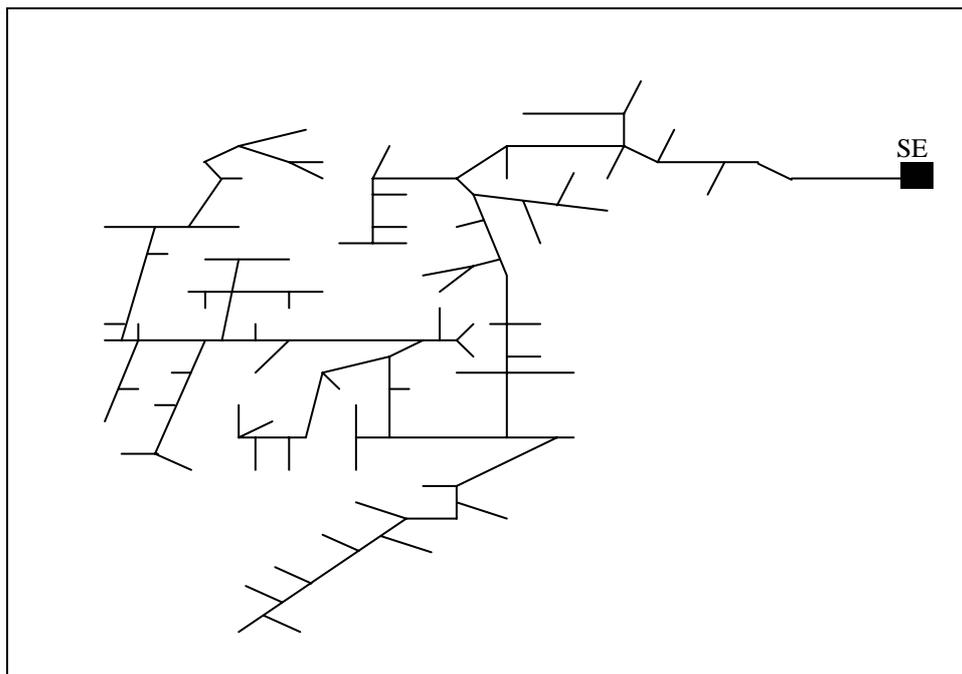


Figura 5.8: Desenho esquemático de alimentador de 13,8 kV da CEMIG

Todos os transformadores do alimentador, os quais foram representados, são trifásicos com o primário ligado em triângulo e o secundário ligado em estrela aterrada. As impedâncias dos transformadores foram calculadas com base nas correntes de carga, desprezando-se as impedâncias mútuas de fase entre os enrolamentos dos transformadores, uma vez que são muito pequenas quando comparadas com as impedâncias representativas das cargas. Além disso, não se dispunha desses dados, o que é desprezível para o objetivo em questão.

Os equipamentos de proteção e manobra presentes no alimentador também foram representados no ATP® através de chaves trifásicas normalmente fechadas. Não são representadas chaves normalmente abertas que fazem a interface com outro alimentador.

As tensões de fase de saída do barramento da SE foram consideradas nas simulações simétricas e iguais a 1 pu.

Considerando que o alimentador em questão apresenta menos que 1% de circuitos monofásicos com relação à extensão total de seus circuitos primários, e que a localização de falta de fase por desequilíbrio de tensão neste trabalho é direcionada apenas para linhas trifásicas, decidiu-se excluir os circuitos monofásicos para representação no ATP®. Sendo assim, considerando apenas as barras trifásicas do alimentador, suas principais características estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Principais características do alimentador da CEMIG

ALIMENTADOR CEMIG						
Rede				Quantidade de Transformadores Trifásicos	Quantidade de circuitos	Quantidade de barras
Aérea (%)	Protegida(%)	Isolada (%)	Extensão Total (km)			
83,49 (4)	15,05 (2)	1,46 (3)	13,75	97	202	215

NOTA: O valor entre parênteses indica o número de bitolas diferentes

Foram inseridos 67 sensores instalados nas barras localizadas em final de rede, mais um sensor instalado na barra da fonte.

Basicamente, foram analisadas faltas em quatro pontos do alimentador, onde a barra 300 foi criada para inserção da chave que representa a abertura da(s) fase(s). A seguir, são apresentados os detalhes da localização das faltas (Figuras 5.9 a 5.12), as características de cada caso e os resultados da localização da falta indicados pelo algoritmo (Tabelas 5.8 a 5.9).

Assim como nos casos 1 a 97, os resultados do algoritmo para os casos 97 a 194 também foram corretos com relação à localização da falta, ressaltando a indicação exata da falta para os casos 147 a 170, onde foram instalados dois sensores nos pontos 165 e 166, onde o equipamento de proteção está localizado.

No caso 98, onde não havia falta, o algoritmo indicou corretamente a inexistência da mesma.

Dessa forma, verifica-se que o algoritmo proposto também é eficaz para trabalhar com um grande número de barras que é a situação típica de alimentadores de distribuição.

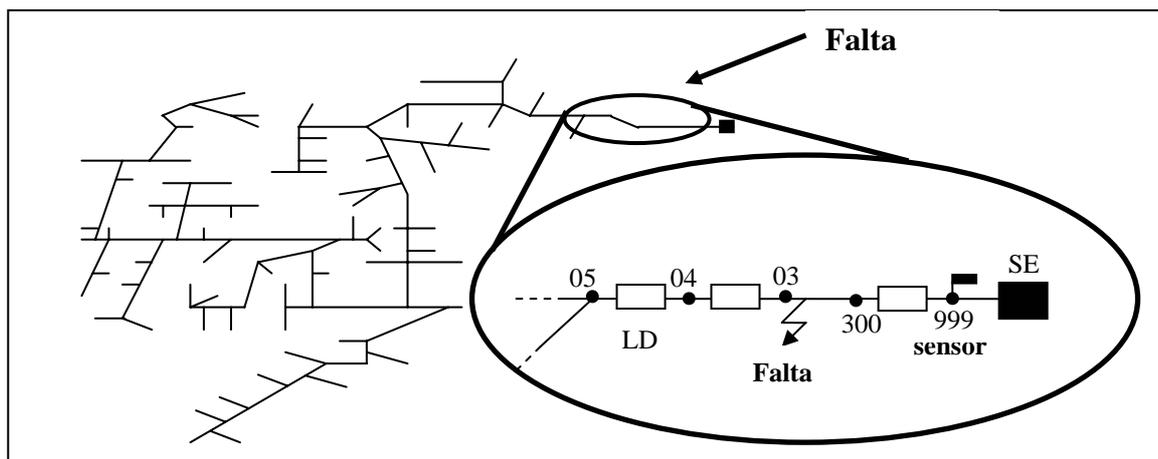


Figura 5.9: Desenho esquemático de um alimentador de 13,8 kV da CEMIG com falta no trecho 03-300

Tabela 5.6 – Resultados dos casos 98 a 122

Local exato da falta: trecho 2-300									
Nó sucessor ao nó 300: nó 160									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
98	nenhuma							Não há falta	-
99	monopolar	-	-	-	-	-	-	999-05	Sim
100	monopolar	600	1 e 5	-	-	-	-	999-05	Sim
101	monopolar	-	-	x	-	80	-	999-05	Sim
102	monopolar	600	1 e 5	x	-	80	-	999-05	Sim
103	monopolar	-	-	x	-	8.000	-	999-05	Sim
104	monopolar	600	1 e 5	x	-	8.000	-	999-05	Sim
105	monopolar	-	-	-	x	80	-	999-05	Sim
106	monopolar	600	1 e 5	-	x	80	-	999-05	Sim
107	monopolar	-	-	-	x	8000	-	999-05	Sim
108	monopolar	600	1 e 5	-	x	8000	-	999-05	Sim
109	bipolar	-	-	-	-	-	-	999-05	Sim
110	bipolar	600	1 e 5	-	-	-	-	999-05	Sim
111	bipolar	-	-	x	-	80	-	999-05	Sim
112	bipolar	600	1 e 5	x	-	80	-	999-05	Sim
113	bipolar	-	-	x	-	8000	-	999-05	Sim
114	bipolar	600	1 e 5	x	-	8000	-	999-05	Sim
115	bipolar	-	-	-	x	80	-	999-05	Sim
116	bipolar	600	1 e 5	-	x	80	-	999-05	Sim
117	bipolar	-	-	-	x	8000	-	999-05	Sim
118	bipolar	600	1 e 5	-	x	8000	-	999-05	Sim
119	bipolar	-	-	x	x	80	-	999-05	Sim
120	bipolar	600	1 e 5	x	x	80	-	999-05	Sim
121	bipolar	-	-	x	x	8000	-	999-05	Sim
122	bipolar	600	1 e 5	x	x	8000	-	999-05	Sim

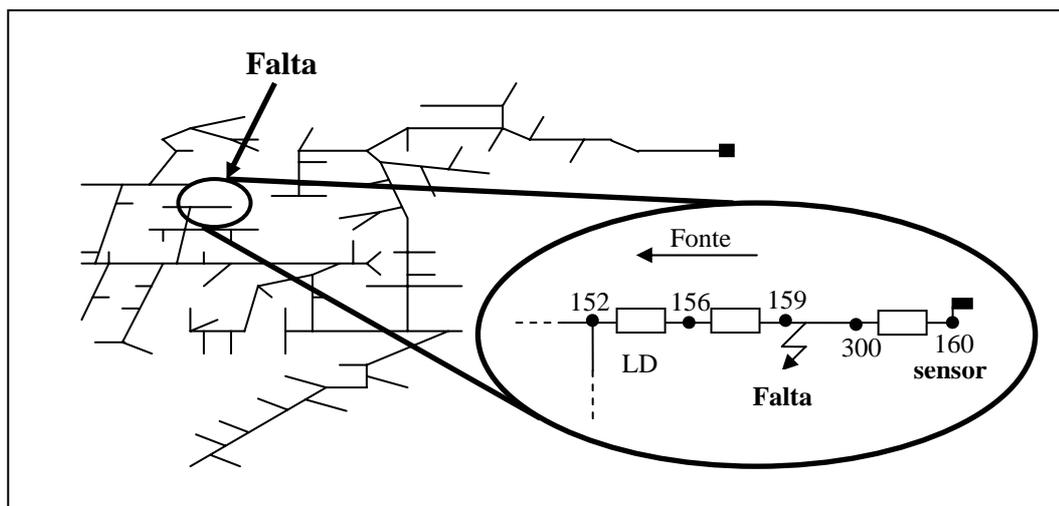


Figura 5.10: Desenho esquemático de um alimentador de 13,8 kV da CEMIG com falta no trecho 159-300

Tabela 5.7 – Resultados dos casos 123 a 146

Local exato da falta: trecho 159-300									
Nó sucessor ao nó 300: nó 160									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
123	monopolar	-	-	-	-	-	-	152-160	Sim
124	monopolar	600	159 e 300	-	-	-	-	152-160	Sim
125	monopolar	-	-	x	-	80	-	152-160	Sim
126	monopolar	600	159 e 300	x	-	80	-	152-160	Sim
127	monopolar	-	-	x	-	8.000	-	152-160	Sim
128	monopolar	600	159 e 300	x	-	8.000	-	152-160	Sim
129	monopolar	-	-	-	x	80	-	152-160	Sim
130	monopolar	600	159 e 300	-	x	80	-	152-160	Sim
131	monopolar	-	-	-	x	8000	-	152-160	Sim
132	monopolar	600	159 e 300	-	x	8000	-	152-160	Sim
133	bipolar	-	-	-	-	-	-	152-160	Sim
134	bipolar	600	159 e 300	-	-	-	-	152-160	Sim
135	bipolar	-	-	x	-	80	-	152-160	Sim
136	bipolar	600	159 e 300	x	-	80	-	152-160	Sim
137	bipolar	-	-	x	-	8000	-	152-160	Sim
138	bipolar	600	159 e 300	x	-	8000	-	152-160	Sim
139	bipolar	-	-	-	x	80	-	152-160	Sim
140	bipolar	600	159 e 300	-	x	80	-	152-160	Sim
141	bipolar	-	-	-	x	8000	-	152-160	Sim
142	bipolar	600	159 e 300	-	x	8000	-	152-160	Sim
143	bipolar	-	-	x	x	80	-	152-160	Sim
144	bipolar	600	159 e 300	x	x	80	-	152-160	Sim
145	bipolar	-	-	x	x	8000	-	152-160	Sim
146	bipolar	600	159 e 300	x	x	8000	-	152-160	Sim

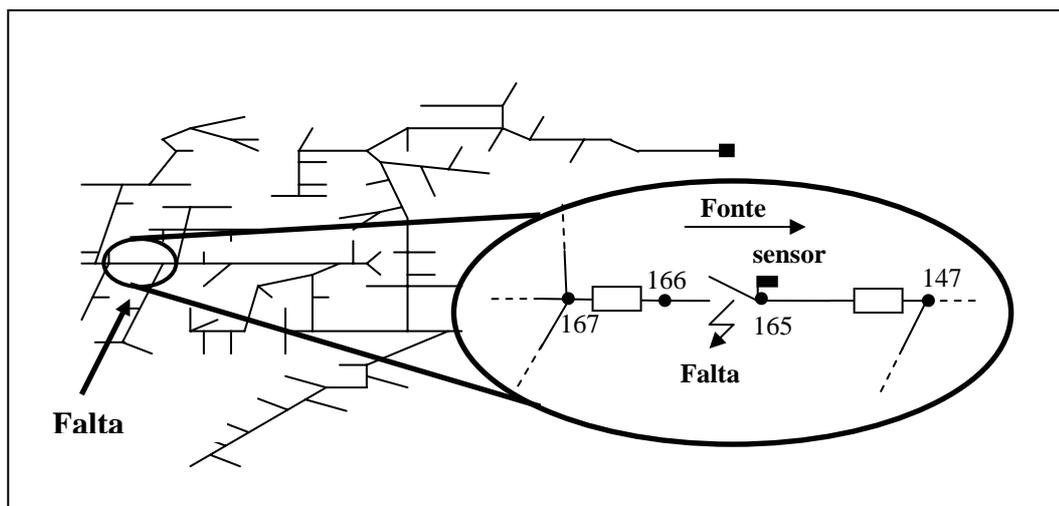


Figura 5.11: Desenho esquemático de um alimentador de 13,8 kV da CEMIG com abertura série no trecho 166-165

Tabela 5.8 – Resultados dos casos 147 a 170

Local exato da falta: trecho 165-166									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVAr	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
147	monopolar	-	-	-	-	-	165	165-166	Sim
148	monopolar	600	147 e 167	-	-	-	165	165-166	Sim
149	monopolar	-	-	x	-	80	165	165-166	Sim
150	monopolar	600	147 e 167	x	-	80	165	165-166	Sim
151	monopolar	-	-	x	-	8.000	165	165-166	Sim
152	monopolar	600	147 e 167	x	-	8.000	165	165-166	Sim
153	monopolar	-	-	-	x	80	165	165-166	Sim
154	monopolar	600	147 e 167	-	x	80	165	165-166	Sim
155	monopolar	-	-	-	x	8000	165	165-166	Sim
156	monopolar	600	147 e 167	-	x	8000	165	165-166	Sim
157	bipolar	-	-	-	-	-	165	165-166	Sim
158	bipolar	600	147 e 167	-	-	-	165	165-166	Sim
159	bipolar	-	-	x	-	80	165	165-166	Sim
160	bipolar	600	147 e 167	x	-	80	165	165-166	Sim
161	bipolar	-	-	x	-	8000	165	165-166	Sim
162	bipolar	600	147 e 167	x	-	8000	165	165-166	Sim
163	bipolar	-	-	-	x	80	165	165-166	Sim
164	bipolar	600	147 e 167	-	x	80	165	165-166	Sim
165	bipolar	-	-	-	x	8000	165	165-166	Sim
166	bipolar	600	147 e 167	-	x	8000	165	165-166	Sim
167	bipolar	-	-	x	x	80	165	165-166	Sim
168	bipolar	600	147 e 167	x	x	80	165	165-166	Sim
169	bipolar	-	-	x	x	8000	165	165-166	Sim
170	bipolar	600	147 e 167	x	x	8000	165	165-166	Sim

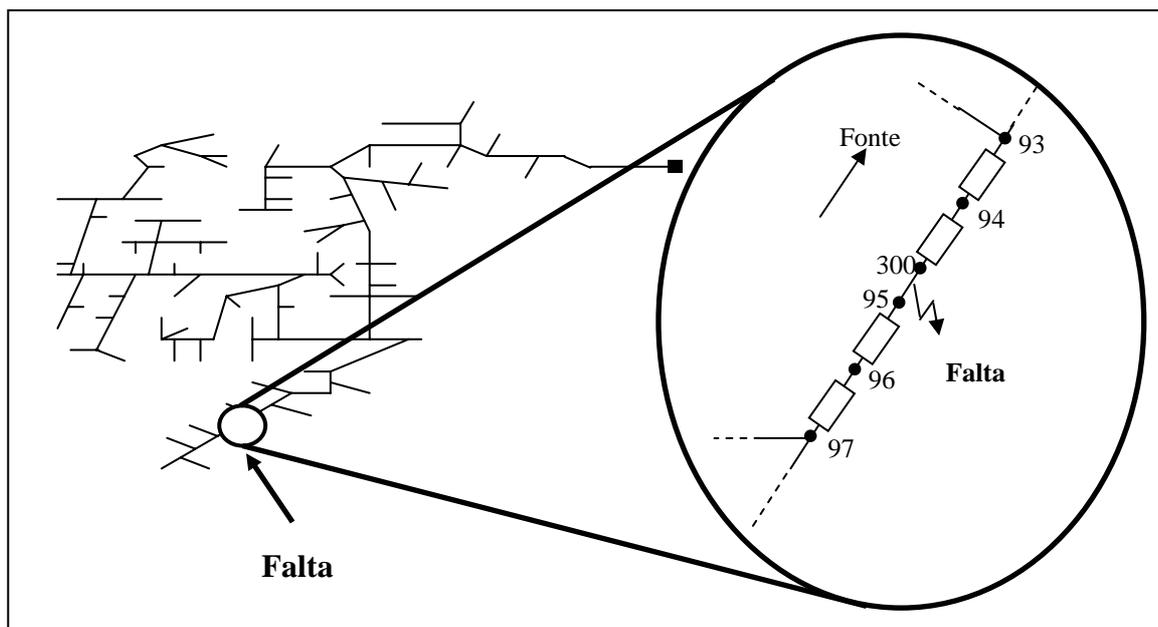


Figura 5.12: Desenho esquemático de um alimentador de 13,8 kV da CEMIG com falta entre o trecho 95-300

Tabela 5.9 – Resultados dos casos 171 a 194

Local exato da falta: trecho 95-300									
Nó sucessor ao nó 300: nó 96									
Caso	Tipo de abertura	Banco de capacitores		Lado do cabo caído ao solo		Resistência de contato cabo-solo (ohms)	Ponto equip. proteção com sensor	RESULTADO DO ALGORITMO	
		kVar	ponto(s)	fonte	carga			Indicação do trecho de falta ou se não há falta	Localização correta?
171	monopolar	-	-	-	-	-	-	93-97	Sim
172	monopolar	600	93 e 97	-	-	-	-	93-97	Sim
173	monopolar	-	-	x	-	80	-	93-97	Sim
174	monopolar	600	93 e 97	x	-	80	-	93-97	Sim
175	monopolar	-	-	x	-	8.000	-	93-97	Sim
176	monopolar	600	93 e 97	x	-	8.000	-	93-97	Sim
177	monopolar	-	-	-	x	80	-	93-97	Sim
178	monopolar	600	93 e 97	-	x	80	-	93-97	Sim
179	monopolar	-	-	-	x	8000	-	93-97	Sim
180	monopolar	600	93 e 97	-	x	8000	-	93-97	Sim
181	bipolar	-	-	-	-	-	-	93-97	Sim
182	bipolar	600	93 e 97	-	-	-	-	93-97	Sim
183	bipolar	-	-	x	-	80	-	93-97	Sim
184	bipolar	600	93 e 97	x	-	80	-	93-97	Sim
185	bipolar	-	-	x	-	8000	-	93-97	Sim
186	bipolar	600	93 e 97	x	-	8000	-	93-97	Sim
187	bipolar	-	-	-	x	80	-	93-97	Sim
188	bipolar	600	93 e 97	-	x	80	-	93-97	Sim
189	bipolar	-	-	-	x	8000	-	93-97	Sim
190	bipolar	600	93 e 97	-	x	8000	-	93-97	Sim
191	bipolar	-	-	x	x	80	-	93-97	Sim
192	bipolar	600	93 e 97	x	x	80	-	93-97	Sim
193	bipolar	-	-	x	x	8000	-	93-97	Sim
194	bipolar	600	93 e 97	x	x	8000	-	93-97	Sim

## 5.5. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Diante dos testes realizados, pode-se dizer que o algoritmo indicou corretamente a detecção e localização de todas as faltas de fase nos 194 casos simulados, assim como a inexistência da mesma quando de sua não ocorrência.

O nível de confiabilidade para distinção entre rompimento de cabos com características de faltas de alta impedância e operação de uma ou duas fases de equipamentos de proteção dependerá do número de sensores instalados no alimentador, ou seja, dependerá do nível de proteção pessoal e de segurança do sistema, pretendidos pela concessionária. Com relação à distinção contra rompimento de *jumpers*, principalmente em estruturas de encabeçamento, sugere-se uma análise estatística pelas concessionárias destes tipos de ocorrências frente a ocorrências de rompimento de cabos em seus circuitos primários de distribuição, o que pode sinalizar o nível de segurança do sistema de supervisão proposto para o caso em análise.

A metodologia ainda permitiu a localização de equipamentos de proteção que operaram com a abertura de uma ou duas fases, o que pode reduzir o tempo de atendimento a ocorrências no sistema de distribuição, uma vez que não há necessidade da solicitação de clientes para o restabelecimento de energia nesses casos. Recomenda-se que sejam realizadas medições com um protótipo de sensor numa estrutura de derivação trifásica com chave fusível instalada, de modo a verificar se a instalação de apenas um sensor na estrutura detecta a abertura de uma ou duas fases devido à operação do equipamento.

Além disso, a detecção e localização da falta com a aplicação da metodologia proposta não teve influência com relação:

- ao tipo de cabo (nu ou protegido) da RDA;
- ao lado onde o cabo está caído: lado carga ou lado fonte;
- ao comportamento e nível de corrente da falta ou até mesmo ausência de corrente;
- ao ponto de localização da falta no alimentador ou à distância elétrica da SE até o ponto anterior à falta;
- à presença ou não de bancos de capacitores.

Isso é uma grande vantagem com relação às metodologias e técnicas de detecção de faltas de alta impedância por monitoramento de corrente descritas no Capítulo 3 que, além de apresentarem grande limitação de eficácia com a variação desses parâmetros, não têm metodologia para a localização da falta.

Nos casos onde existem ramais monofásicos e que se deseja também uma supervisão nos mesmos, é preciso aprimorar o algoritmo para o propósito de testes de simulações. Porém, para a implantação do algoritmo na plataforma do COD, não há necessidade do processamento das rotinas de tratamento de dados, estimação de fasores e cálculo de  $\alpha_0$ , uma vez que o sistema de comunicação enviará as informações dos sensores atuados, sendo necessário apenas localizar a falta.

Nos casos de abertura intencional de equipamentos de proteção ou de manobra no alimentador, é indispensável a presença de um programa ou rotina que faça a inibição automática do programa de localização da falta, de modo a não gerar transtornos para o operador do COD.

Com relação ao sistema de detecção de desequilíbrio de tensão pelos sensores através da medição do campo elétrico resultante das fases do alimentador, recomenda-se a leitura do capítulo 3 de [2], onde são apresentados vários detalhes com relação ao custo, composição, eficiência e testes realizados com protótipos desenvolvidos.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. SÍNTESE DO TRABALHO E CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentadas as principais características das faltas de alta impedância em RDA, suas conseqüências e causas, assim como ações para a redução de sua frequência.

Foi mostrado que o problema de faltas de alta impedância está mais relacionado com a proteção pessoal do que com a proteção do sistema de distribuição, devido principalmente ao baixo nível de corrente gerado em suas ocorrências. Isso se traduz no grave problema da limitação das proteções convencionais de sobrecorrente com relação à sensibilidade a esses tipos de falta, agravando-se ainda devido às características das RDA e ao comportamento aleatório da falta. Dessa forma, o rompimento de condutores de circuitos primários da rede de distribuição tornou-se o principal foco deste trabalho, uma vez que quando caídos ao solo sem a interrupção sustentada da energia elétrica, provoca grandes riscos de acidentes fatais, especialmente em áreas com alto adensamento populacional.

Vários métodos de detecção desenvolvidos por concessionárias, fabricantes e instituições de pesquisa, destacando-se o EPRI e a TAMU, foram apresentados, assim como suas principais características, vantagens e desvantagens. Em geral os métodos se baseiam em três grandezas de monitoramento: corrente, tensão ou tempo de propagação de sinais injetados no alimentador.

Diante das avaliações realizadas com os métodos estudados e do problema de rompimento de condutores, foi selecionado o método baseado no monitoramento do desequilíbrio de tensão, o qual foi abordado com maior detalhamento, de modo a verificar sua eficiência através de cálculos. O estudo consistiu em avaliar as seguintes questões:

- se o nível de desequilíbrio de tensão poderia detectar o rompimento de condutores e distinguir essa ocorrência de um desequilíbrio acentuado de carga;
- qual parâmetro deveria ser utilizado para medir o desequilíbrio de tensão no alimentador com confiabilidade e segurança.

A análise foi efetuada utilizando-se três parâmetros compostos por componentes de seqüência das tensões:  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , baseados na componente de seqüência zero, negativa e

positiva, respectivamente. Foram realizados vários cálculos no MatLab® englobando diversas situações de desequilíbrio acentuado de carga em um alimentador para cinco tipos de cabos e variando-se sua extensão. Além disso, também foram simulados casos no ATP® com o alimentador fictício representado na Figura 4.1, de modo a avaliar o desequilíbrio de tensão em casos simultâneos de assimetria série e *shunt* (abertura monopolar e bipolar, com carga desequilibrada) no alimentador. Para esses casos, foram analisadas várias situações podendo citar: diferentes valores da resistência representativa de contato entre cabo e solo, existência ou não de bancos de capacitores e rompimento do lado carga ou lado fonte do alimentador. Os resultados mostraram que  $\alpha_0$  e  $\Delta V_d$  são parâmetros eficientes para o objetivo de detecção de desequilíbrio de tensão para todas as situações analisadas, o que é uma grande vantagem com relação a outros métodos de detecção, pois não são influenciados pelo nível e comportamento aleatório da corrente da falta de alta impedância, pelo tipo de condutor (nu ou protegido) e pelo lado de ocorrência da falta: carga ou fonte.

Entretanto, devido às suas vantagens práticas, o trabalho recomenda a utilização de  $\alpha_0$  para o propósito em questão, tendo como limiar de detecção o valor 0,3 pu, já contemplando uma boa faixa de segurança nesse valor.

Assim, considerando a tensão de sequência zero referida à tensão nominal como parâmetro de monitoramento do desequilíbrio de tensão, dada como  $\alpha_0$ , é proposto um sistema de supervisão de alimentador de distribuição com a instalação de sensores nos finais de rede, como em [2], e em outros pontos estratégicos do alimentador.

Para localizar o ponto de falta, foi proposto um algoritmo que utiliza a metodologia contemplada em [17] com pequenas modificações, porém utilizando a “Matriz de Percorso de Rede”, criada neste trabalho, a qual promove a informação de todas as barras contidas no caminho série de qualquer barra do alimentador, proporcionando dessa forma os dados necessários para a localização da falta. O desempenho do algoritmo foi avaliado através de testes de vários casos simulados no ATP®, inclusive de uma representação de um alimentador real da CEMIG. O algoritmo funcionou corretamente em todos os casos, indicando a localização correta das faltas. Além disso, nos casos onde foram inseridos sensores não só nos finais de rede, como também em pontos estratégicos do alimentador, o algoritmo indicou a localização exata da falta.

É importante destacar que o nível de confiabilidade para a distinção entre eventos de rompimento de condutores com características de faltas de alta impedância e eventos de

operação monofásica de equipamentos de proteção, dependerá do nível de segurança pessoal e do sistema pretendido pela concessionária, sendo que quanto maior o número de sensores a serem instalados, maior o nível de segurança.

Assim, o algoritmo poderá proporcionar a indicação não só da localização de rompimento de cabos primários das redes de distribuição como também a localização de equipamentos de operação atuados em até duas fases (como o caso de fusíveis) antes mesmo da reclamação do cliente por falta de energia, o que promoverá uma melhoria no nível de segurança pessoal e uma redução do tempo de atendimento a essas ocorrências.

Apesar do algoritmo trabalhar apenas com barras trifásicas, sua abrangência é muito grande em virtude da característica do problema de rompimento de condutores de redes de distribuição, o qual se apresenta com maior risco de acidente em áreas urbanas que são atendidas em sua maioria por redes trifásicas de distribuição.

Os resultados obtidos indicam que a metodologia proposta de detecção e localização de falta de fase para proteção pessoal contra rompimento de condutores com características de falta de alta impedância se mostrou eficaz, não tendo influência com relação:

- ao tipo de cabo (nu ou protegido) da RDA;
- ao lado onde o cabo está caído: lado carga ou lado fonte;
- ao comportamento e nível de corrente da falta ou até mesmo ausência de corrente;
- ao ponto de localização da falta no alimentador ou à distância elétrica da falta até a SE;
- à presença ou não de bancos de capacitores;
- ao nível de desequilíbrio de carga do sistema;
- ao nível de corrente do sistema em qualquer horário;
- a eventos transitórios do sistema.

Logo, a metodologia proposta se apresenta como uma interessante ferramenta não só para detecção e distinção destas faltas como também para a sua localização, o que é uma grande vantagem não só do ponto de vista de segurança como também operacional, uma vez que fornece ao operador do COD as informações necessárias para a tomada de decisão confiável e segura.

Futuramente, com maiores aprimoramentos e testes de campo, a metodologia pode se tornar uma alternativa para o problema em questão, visando a proteção da vida de pessoas em eventuais ocorrências de faltas de alta impedância.

## 6.2. PERSPECTIVA DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são relacionadas algumas propostas de continuidade, que poderão dar origem a trabalhos futuros.

### 6.2.1. Implantação da metodologia no campo em tempo real

Para a implantação da metodologia proposta, é necessária a definição do sistema de comunicação a ser utilizado, recomendando-se um estudo detalhado de cada concessionária, levando em consideração várias tecnologias como o caso de comunicação via celular e o nível de automação atual e previsto para seu sistema de distribuição.

No que se refere à proposta de utilização da metodologia de localização de falta, a “Matriz de Percurso de Rede” foi montada apenas uma vez para cada caso simulado de localização de falta. Assim, no caso de aplicação real da metodologia proposta, esta matriz pode ser construída “*off-line*” para cada alimentador supervisionado, de forma a aumentar a velocidade de processamento do algoritmo para a localização da falta, desde que não haja modificações nas configurações dos alimentadores. Nesse caso, bastaria apenas atualizar a matriz, também de forma “*off-line*”. Na CEMIG, por exemplo, existe o Sistema de Gerenciamento da Distribuição chamado de GEMINI, onde estão cadastradas todas as redes e suas barras. Do GEMINI, podem ser montadas (*off-line*) as matrizes utilizadas no programa para descrever a rede e suas ligações.

Visando testes no campo com a metodologia proposta, recomenda-se:

- a compra ou desenvolvimento de sensores baseados em medição de campo elétrico, e a realização de testes propositais no campo para verificar sua eficiência, principalmente quanto à detecção de operação de abertura monofásica ou bifásica de equipamento de proteção, como descrito anteriormente;
- testes em campo com um sistema de comunicação entre sensores e COD, definido após estudos detalhados;
- testes no COD com o algoritmo proposto, de modo a verificar sua eficiência na prática.

Caso os testes acima sejam satisfatórios, recomenda-se o aprimoramento do algoritmo para trabalhar em tempo real, com circuitos trifásicos e monofásicos, assim como o desenvolvimento de um programa ou rotina que faça a inibição de localização de falta quando de uma abertura de fase(s) intencional proveniente do COD. Finalmente, para avaliar todo o

sistema de supervisão já aprimorado, é interessante selecionar um alimentador o qual servirá de piloto para proteção contra rompimento de cabos primários caídos ao solo com característica de falta de alta impedância, instalando vários sensores no mesmo, assim como o sistema de comunicação já definido e o programa de localização de falta de fase aprimorado, durante um período de no mínimo 01 ano.

Diante do custo de investimento inicial e de manutenção desse tipo de sistema de supervisão e controle, e do custo médio por ano das indenizações pagas pela concessionária devido a acidentes com rompimento de cabos do circuito primário, pode-se fazer uma avaliação econômica para agregar a viabilidade de implantação desse sistema em determinadas regiões da concessionária, resguardado o ganho na proteção de vidas humanas proporcionado por esse sistema e a integração com eventuais sistemas de distribuição com nível avançado de automação.

Caso seja de interesse de concessionárias e instituições acadêmicas, talvez os trabalhos futuros propostos possam ser desenvolvidos através de um projeto patrocinado pelo programa de pesquisa e desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo necessário a submissão do mesmo à ANEEL por uma concessionária numa data pré-estabelecida e que o mesmo seja aprovado por esse órgão regulamentador.

#### **6.2.2. Estudo do desequilíbrio de tensão nos barramentos secundários de transformadores de distribuição**

Recomenda-se o estudo da detecção de desequilíbrio de tensão no secundário de transformadores de distribuição, de modo a agregar ao sistema de supervisão para proteção de rompimento de condutores de circuitos primários, não só maior precisão da localização da falta como também da detecção e localização de operação de chaves fusíveis nesses equipamentos, o que poderá aumentar o nível de segurança pessoal e reduzir o tempo de atendimento a ocorrências de faltas de baixa impedância com a operação monofásica desses equipamentos.

Para isso, é necessário o estudo de sensores localizados próximos aos barramentos secundários destes transformadores e o aprimoramento do algoritmo de localização das faltas.

Destaca-se que na CEMIG já existe um projeto parecido para faturamento, corte e religação a distância de unidades consumidoras (UC) de baixa tensão, onde uma remota é instalada no secundário de cada transformador de distribuição e os dados de consumo das UCs são transmitidos através dos próprios ramais secundários que fazem o suprimento de

energia elétrica, até as respectivas remotas. A comunicação é feita através de discagem via celular para um centro de faturamento, o qual pode desligar ou religar a UC remotamente, além de armazenar todas as curvas de carga da mesma, agregando dados para a melhoria da gestão de seu processo. Dentro desse projeto já estão inseridas mais de 120 mil UC.

Após esse estudo e verificada sua eficiência, pode-se fazer um teste piloto análogo ao item 6.1.1 e, talvez, ser agregada a outras tecnologias, como o caso do projeto da CEMIG mencionado acima.

## REFERÊNCIAS

- [1]. “*Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems*”, IEEE Tutorial Course, course text 90EH0310.3.PWR, 1989.
- [2]. MALAGODI, C. V. S.. “*Sistema de Proteção para Falhas de Alta Impedância*,” dissertação de mestrado, Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1997.
- [3]. SILVA, P. R.. “*Técnica Alternativa para detecção de faltas de alta impedância*”, dissertação de mestrado nº 089, Centro de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, 1992.
- [4]. FILIPPIN, C. G.; NETO, R. A. P.; STENZEL, J. N.; FILHO, E. M.; GAMBOA, L. R. A.; SCARASSATI, P.C.. “*Sistemas de Segurança Contra Rompimento de Cabos Condutores em Linhas de Distribuição*”, Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Salvador, 13-14 nov/2003. Anais. Salvador, ANEEL, 2003. Vol.1, p.173-178. Disponível em <<http://www.lactec.org.br/OInstituto/biblio.asp>>.
- [5]. CEMIG, “*Pesquisa sobre Rompimento de Condutores na Região Metropolitana de Belo Horizonte*”, Relatório DM/AE-AO/006/79.
- [6]. MAUCOIN, B.; RUSSEL, B. D.; J.TALLEY, T.. “*Detection of arcing faults on distribution feeders*”, Palo Alto, preparado por Texas A&M University, 1982 (EPRI Final Report, EL-2757).
- [7]. AUCOIN, B. M.. “*Status of High Impedance Fault Detection*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, Nº 3, mar/1985, pág. 638 a 644.
- [8]. MAUCOIN, B.; RUSSEL B. D.; BENNER, C. L.. “*High Impedance Fault Detection for Industrial Power Systems*”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Conference Record of the 1989 IEEE , Vol.2, out/1989, pág. 1788 a 1792.
- [9]. BENNER, C.L.; RUSSELL, B.D.. “*Practical High Impedance Fault Detection on Distribution Feeders*”, IEEE Transactions Industry Applications, Vol. 33 Nº 3 , Mai/Jun/1997, pág. 635 a 640.
- [10]. SENGER, E. C.; KAISER, W.; SANTOS, J.C.; BURT, P.M.S.; MALAGODI, C.V.S.. “*Broken Conductors Protection System using Carrier Communication*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, Nº 2, abr/2000, pág. 525 a 530.

- [11]. CALHOUN, H.; BISHP, M. T.; EICHLER; C. H.. “*Development and Testing of Electro-Mechanical Relay Detect Fallen Distribution Conductors*”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Nº 6, jun/1982, pág. 1643 a 1650.
- [12]. FIGUEIREDO, R. G.; FILHO, O. O.; CHAGAS, F. A.; NOVA, I. F.; SANTOS, L. E. D.. “*Medições, Estudos e Ensaio para Avaliação e Projeto de Proteção para Falhas Fase-Terra em Sistemas com alta Impedância de Contato*”, artigo apresentado no XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI 2002.
- [13]. PATTERSON, R.; TYSKA W.; RUSSELL, B. D.; AUCOIN, B. M.. “*A Microprocessor-Based Digital Feeder Monitor with High Impedance Fault Detection*”, Forty-Seventh Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, College Station, Texas, mar/1994.
- [14]. LÓPEZ, J. V.; MORALES, F. H.; CARSON V.. “*The Evaluation and Field Experience with a Digital High Impedance Fault Detector*”, First International Conference of Devices, Circuits and Systems, University of Simon Bolvar, Caracas, Venezuela, dez/1995.
- [15]. WESTER, C. G.. “*High Impedance Fault Detection on Distribution Systems*”, Rural Electric Power Conference, 1998. Artigo apresentado à 42ª Annual Conference , 26-28 abr/1998, pág. c5-1 a c5-5.
- [16]. FILHO, C. S. P.. “*Análise de Circuitos Trifásicos utilizando Componentes Simétricas*”, apostila da disciplina de Circuitos Polifásicos e Magnéticos do curso de engenharia elétrica da UFMG, 2004.
- [17]. GARCIA-SANTANDER, L.; BASTARDE, P.; PETIT, M.; GAL, I.; LOPEZ, E; OPAZO, H., “*Downed-Conductor Fault Detection and Location via a Voltage based Method for Radial Distribution Networks*”, artigo IEE Proceedings Gener. Transm. Distribution, Vol. 152, Nº 2, mar/2005.
- [18]. FILHO, C. S. P., “*Proteção Digital de Linhas de Transmissão*”, apostila do Curso de Extensão em Sistema de Energia Elétrica, Módulo II, Eletrobrás/FCO/UFMG, nov/1998.
- [19]. “*Alternative Transients Program*”, site desenvolvido por Dr. M. Kizilcay, jun/2001. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>>

# APÊNDICE A

## DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DE TENSÕES DE SEQÜÊNCIA

### A.1. EQUAÇÕES BÁSICAS DE COMPONENTES DE SEQÜÊNCIA

Dados:

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

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \text{ vetor das tensões de fase.}$$

$$\bar{V}_S = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}, \text{ vetor de tensões de seqüência.}$$

Pode-se provar em um sistema trifásico [16], para seqüência de fases “abc”, através da teoria de componentes simétricas que:

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad \bar{V}_S = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.1)}$$

$$\bar{I}_F = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \bar{I}_S = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.2)}$$

ou em notação matricial

$$\bar{V}_F = \tilde{Q} \cdot \bar{V}_S \quad \bar{V}_S = \tilde{Q}^{-1} \cdot \bar{V}_F \quad \text{Eq. (A.3)}$$

$$\bar{I}_F = \tilde{Q} \cdot \bar{I}_S \quad \bar{I}_S = \tilde{Q}^{-1} \cdot \bar{I}_F \quad \text{Eq. (A.4)}$$

onde  $\tilde{Q}$  é a Matriz de Transformação de *Fortescue* e é dada por:

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \text{ sendo } \tilde{Q}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.5)}$$

Um elemento trifásico passivo de rede, na sua forma mais geral, pode ser modelado pelo circuito elétrico da Figura A.1 a seguir:

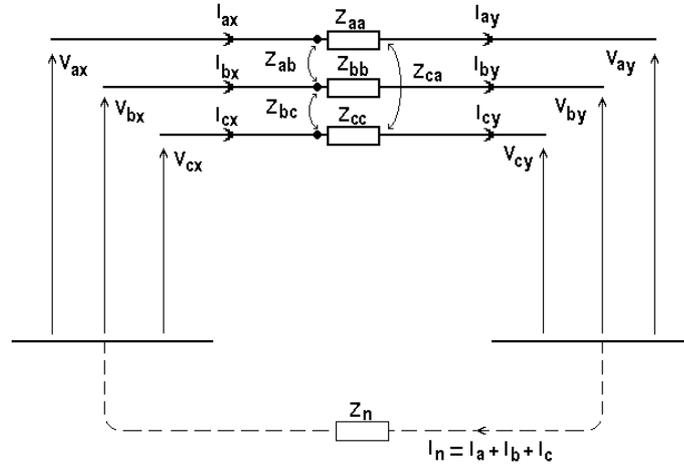


Figura A.1: Modelagem de um elemento trifásico

Em sistemas elétricos onde tanto as impedâncias próprias quanto as impedâncias mútuas são iguais entre si, a matriz das impedâncias de seqüência é diagonal, como mostrado a seguir.

$$V_{ax} = Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ac} I_c + V_{ay} + Z_n I_n \quad \text{Eq. (A.6)}$$

ou seja,

$$\begin{aligned} V_{ax} - V_{ay} &= Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ac} I_c + Z_n (I_a + I_b + I_c) \\ &= (Z_{aa} + Z_n) I_a + (Z_{ab} + Z_n) I_b + (Z_{ac} + Z_n) I_c \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.7)}$$

Para as três fases, pode-se escrever

$$\begin{cases} V_{ax} - V_{ay} = V_a = (Z_{aa} + Z_n) I_a + (Z_{ab} + Z_n) I_b + (Z_{ac} + Z_n) I_c \\ V_{bx} - V_{by} = V_b = (Z_{ba} + Z_n) I_a + (Z_{bb} + Z_n) I_b + (Z_{bc} + Z_n) I_c \\ V_{cx} - V_{cy} = V_c = (Z_{ca} + Z_n) I_a + (Z_{cb} + Z_n) I_b + (Z_{cc} + Z_n) I_c \end{cases} \quad \text{Eq. (A.8)}$$

Utilizando notação matricial fica

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} + Z_n & Z_{ab} + Z_n & Z_{ac} + Z_n \\ Z_{ba} + Z_n & Z_{bb} + Z_n & Z_{bc} + Z_n \\ Z_{ca} + Z_n & Z_{cb} + Z_n & Z_{cc} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.9)}$$

Em notação comprimida, tem-se que

$$\bar{V}_F = \tilde{Z}_F \cdot \bar{I}_F \quad \text{Eq. (A.10)}$$

onde  $\tilde{Z}_F$  é a matriz das impedâncias de fase ou em componentes de fase.

Esta equação possui solução da forma

$$\bar{I}_F = \tilde{Z}_F^{-1} \cdot \bar{V}_F \quad \text{Eq. (A.11)}$$

Aplicando-se a transformação de componentes simétricas tem-se que:

$$\tilde{Q} \cdot \bar{V}_S = \tilde{Z}_F \cdot \tilde{Q} \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.12)}$$

ou seja,

$$\bar{V}_S = \tilde{Z}_S \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.13)}$$

$$\text{onde } \tilde{Z}_S = \tilde{Q}^{-1} \cdot \tilde{Z}_F \cdot \tilde{Q} \quad \text{Eq. (A.14)}$$

Nesta equação,  $\tilde{Z}_S$  é denominada de matriz das impedâncias de seqüência ou em componentes simétricas. A solução, ainda em componentes simétricas, é da forma:

$$\bar{I}_S = \tilde{Z}_S^{-1} \cdot \bar{V}_S \quad \text{Eq. (A.15)}$$

Esta solução será particularmente simples se  $\tilde{Z}_S$  for diagonal. Para que isto aconteça é necessário que o sistema seja equilibrado, ou seja, que se verifique as seguintes relações:

$$\begin{cases} Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_p \\ Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_m \end{cases} \quad \text{Eq. (A.16)}$$

ou seja, que a matriz  $\tilde{Z}_F$  seja da seguinte forma

$$\tilde{Z}_F = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_p + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_p + Z_n \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.17)}$$

Deste modo, a matriz  $\tilde{Z}_S$  vai ser diagonal e terá a seguinte forma

$$\tilde{Z}_S = \begin{bmatrix} Z_P + 2Z_M & & \\ & Z_P - Z_M & \\ & & Z_P - Z_M \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.18)}$$

ou ainda

$$\tilde{Z}_S = \begin{bmatrix} Z_p + 2Z_m + 3Z_n & & \\ & Z_p - Z_m & \\ & & Z_p - Z_m \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.19)}$$

Reescrevendo a equação primitiva do circuito dado em componentes simétricas, de maneira não comprimida, tem-se

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.20)}$$

onde

$$\begin{cases} Z_0 = Z_p + 2Z_m = (Z_p + Z_n) + 2(Z_m + Z_n) = Z_p + 2Z_m + 3Z_n \\ Z_1 = Z_p - Z_m = (Z_p + Z_n) - (Z_m + Z_n) = Z_p - Z_m \\ Z_2 = Z_1 = (Z_p + Z_n) - (Z_m + Z_n) = Z_p - Z_m = Z_p - Z_m \end{cases} \quad \text{Eq. (A.21)}$$

Pode-se ver que a transformação de componentes simétricas desacoplou as seqüências umas das outras, ou seja, a queda de tensão referente a uma das seqüências só depende da corrente daquela seqüência. Isto sugere o conceito de circuitos equivalentes (ou diagramas) de seqüência, vistos na Figura A.2.

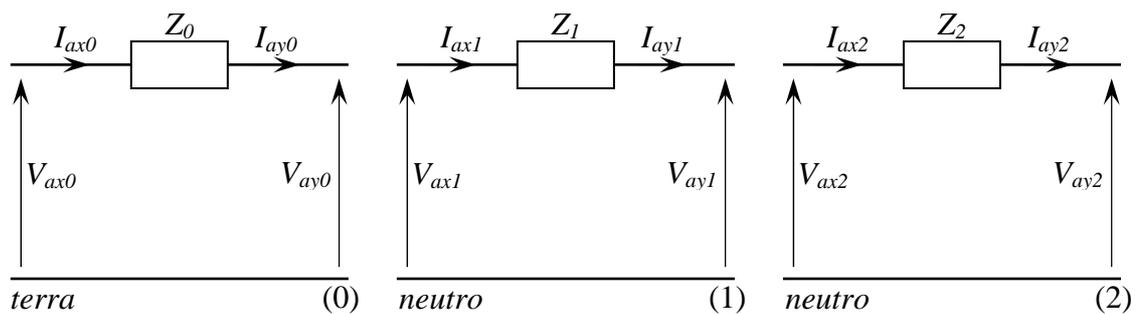


Figura A.2: Diagramas de seqüência desacoplados

Nota-se pela equação (A.21) que nestes diagramas a impedância  $Z_n$  já vem incorporada na impedância  $Z_0$ , aparecendo multiplicada por três, uma vez que a corrente de retorno é igual a  $3 \cdot I_{a0}$ .

## A.2. MÉTODO DE ANÁLISE

1. Eliminar da rede a carga desequilibrada ligada no ponto P.
2. Representar a rede equilibrada resultante por seu circuito equivalente de *Thévenin* em componentes de fase (Figura A.3):

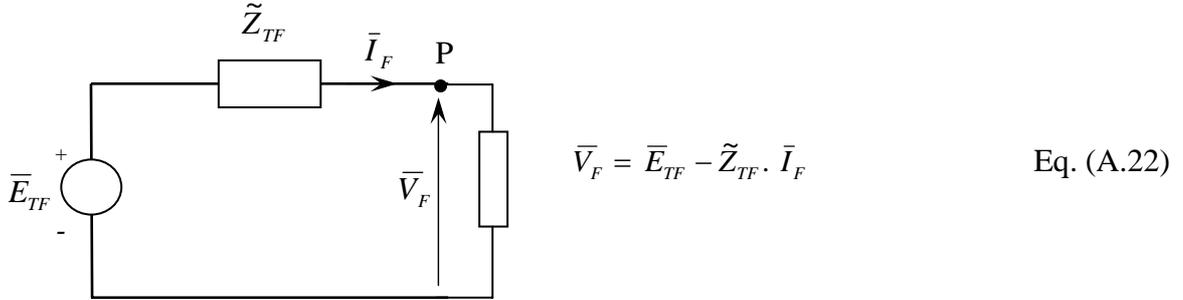


Figura A.3: Circuito Equivalente de *Thévenin*

onde  $\bar{E}_{TF}$  e  $\tilde{Z}_{TF}$  são o vetor das tensões e a matriz das impedâncias equivalentes de *Thévenin* em componentes de fase, respectivamente.

3. Utilizar a transformação de componentes simétricas e passar a equação (A.22) para componentes de seqüência.

$$\bar{V}_S = \bar{E}_{TS} - \tilde{Z}_{TS} \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.23)}$$

onde  $\bar{E}_{TS}$  e  $\tilde{Z}_{TS}$  são, respectivamente, o vetor das tensões e a matriz das impedâncias equivalentes de *Thévenin* em componentes de seqüência.

Como a rede é equilibrada, a matriz  $\tilde{Z}_{TF}$  é da forma

$$\tilde{Z}_{TF} = \begin{bmatrix} Z_P + Z_N & Z_M + Z_N & Z_M + Z_N \\ Z_M + Z_N & Z_P + Z_N & Z_M + Z_N \\ Z_M + Z_N & Z_M + Z_N & Z_P + Z_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.24)}$$

onde

$$Z_P = \sum Z_{pi} ; Z_M = \sum Z_{mi} ; Z_N = \sum Z_n \quad \text{Eq. (A.25)}$$

A matriz das impedâncias equivalentes de *Thévenin* em componentes de seqüência vai ser da forma

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{TS} = \begin{bmatrix} Z_P + 2Z_M + 3Z_N & & \\ & Z_P - Z_M & \\ & & Z_P - Z_M \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.26)}$$

Deste modo, cada uma das seqüências é independente uma da outra, caracterizando três circuitos monofásicos totalmente independentes um do outro.

A equação (A.23) na forma expandida vai ser então

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.27)}$$

ou ainda

$$\begin{cases} V_{a0} = E_{a0} - Z_0 \cdot I_{a0} \\ V_{a1} = E_{a1} - Z_1 \cdot I_{a1} \\ V_{a2} = E_{a2} - Z_2 \cdot I_{a2} \end{cases} \quad \text{Eq. (A.28)}$$

4. Determinar a relação  $\mathbf{V} \times \mathbf{I}$  na carga em componentes simétricas a partir desta relação em componentes de fase.

$$\bar{\mathbf{V}}_F = \tilde{\mathbf{Z}}_F \cdot \bar{\mathbf{I}}_F \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & & \\ & Z_B & \\ & & Z_C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.29)}$$

$$\Downarrow$$

$$\tilde{\mathbf{Q}} \cdot \bar{\mathbf{V}}_S = \tilde{\mathbf{Z}}_F \cdot \tilde{\mathbf{Q}} \cdot \bar{\mathbf{I}}_S$$

$$\Downarrow$$

$$\bar{\mathbf{V}}_S = \tilde{\mathbf{Q}}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{Z}}_F \cdot \tilde{\mathbf{Q}} \cdot \bar{\mathbf{I}}_S$$

$$\Downarrow$$

$$\bar{\mathbf{V}}_S = \tilde{\mathbf{Z}}_S \cdot \bar{\mathbf{I}}_S \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.30)}$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.31)}$$

onde

$$\begin{cases} Z_p = Z_{00} = Z_{11} = Z_{22} = \frac{1}{3}(Z_A + Z_B + Z_C) \\ Z_{m1} = Z_{01} = Z_{12} = Z_{20} = \frac{1}{3}(Z_A + a^2 Z_B + a Z_C) \\ Z_{m2} = Z_{10} = Z_{21} = Z_{02} = \frac{1}{3}(Z_A + a Z_B + a^2 Z_C) \end{cases} \quad \text{Eq. (A.32)}$$

5. Igualar as três tensões de seqüência na carga, ou seja, igualar as equações (A.23) e (A.30) e obter as correntes de seqüência.

$$\begin{aligned} \bar{V}_S &= \bar{E}_{TS} - \tilde{Z}_{TS} \cdot \bar{I}_S = \tilde{Z}_S \cdot \bar{I}_S & \text{Eq. (A.33)} \\ &\Downarrow \\ \bar{E}_{TS} &= (\tilde{Z}_{TS} + \tilde{Z}_S) \cdot \bar{I}_S \\ &\Downarrow \\ \bar{I}_S &= (\tilde{Z}_{TS} + \tilde{Z}_S)^{-1} \cdot \bar{E}_{TS} \end{aligned}$$

$$\text{ou} \quad \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + Z_0 & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.34)}$$

e desta forma

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + Z_0 & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.35)}$$

6. Obter as tensões de seqüência na carga.

$$\bar{V}_S = \bar{E}_{TS} - \tilde{Z}_{TS} \cdot \bar{I}_S = \tilde{Z}_S \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.36)}$$

7. Obter as tensões e correntes de fase na carga.

$$\begin{cases} \bar{V}_F = \tilde{Q} \cdot \bar{V}_S \\ \bar{I}_F = \tilde{Q} \cdot \bar{I}_S \end{cases} \quad \text{Eq. (A.37)}$$

**A.3. CARGA DESEQUILIBRADA EM ESTRELA ATERRADA POR IMPEDÂNCIA DE NEUTRO (SEM MÚTUAS) ONDE DUAS DAS IMPEDÂNCIAS DE FASE SÃO IGUAIS ENTRE SI**

O circuito da Figura A.4 mostra a situação a ser analisada, onde as impedâncias das fases “b” e “c” são iguais entre si e diferentes da impedância da fase a. Para este circuito tem-se que

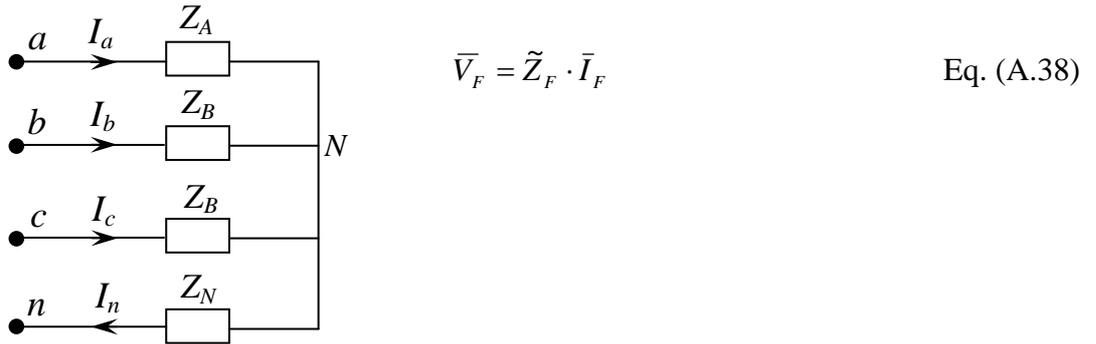


Figura A.4: Circuito Trifásico Desequilibrado em Estrela Aterrada

onde

$$\tilde{Z}_F = \begin{bmatrix} Z_A + Z_N & Z_N & Z_N \\ Z_N & Z_B + Z_N & Z_N \\ Z_N & Z_N & Z_B + Z_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.39)}$$

Desta forma, a matriz das impedâncias de seqüência para esta carga vai ser dada por

$$\tilde{Z}_S = Q^{-1} \cdot \tilde{Z}_F \cdot Q = \begin{bmatrix} Z_p + 3Z_N & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.40)}$$

Os termos mútuos desta matriz vão ser da forma

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{m1} = \frac{1}{3}(Z_A + a^2 Z_B + a Z_B) = \\ \quad = \frac{1}{3} [Z_A + (a^2 + a)Z_B] = \frac{1}{3} [Z_A - Z_B] = Z_m \\ Z_{m2} = \frac{1}{3}(Z_A + a Z_B + a^2 Z_B) = \\ \quad = \frac{1}{3} [Z_A + (a + a^2)Z_B] = \frac{1}{3} [Z_A - Z_B] = Z_m \end{array} \right. \quad \text{Eq. (A.41)}$$

ou seja, eles vão ser idênticos.

Por outro lado, o termo  $Z_p$  vai ser dado por

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{3}(Z_A + Z_B + Z_B) = \frac{1}{3}(Z_A + 2Z_B) = \frac{1}{3}(Z_A + 3Z_B - Z_B) = \\ &= \frac{1}{3}[(Z_A - Z_B) + 3Z_B] = \frac{1}{3}(Z_A - Z_B) + \frac{1}{3}(3Z_B) = Z_m + Z_B \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.42)}$$

Deste modo, a matriz das impedâncias de seqüência vai ser dada por

$$\tilde{Z}_S = \begin{bmatrix} Z_B + Z_m + 3Z_N & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_B + Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_B + Z_m \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.43)}$$

Do ponto P para a rede tem-se então que

$$\bar{V}_F = \bar{E}_{TF} - \tilde{Z}_{TF} \cdot \bar{I}_F \quad \text{Eq. (A.44)}$$

ou seja,

$$\bar{V}_S = \bar{E}_{TS} - \tilde{Z}_{TS} \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.45)}$$

que de forma expandida é

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.46)}$$

Por outro lado, do ponto P para a carga tem-se que

$$\bar{V}_S = \tilde{Z}_S \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.47)}$$

ou na forma expandida

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B + Z_m + 3Z_N & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_B + Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_B + Z_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.48)}$$

Igualando-se as equações (A.46) e (A.48) vem que

$$\begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 + Z_B + Z_m + 3Z_N & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_1 + Z_B + Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_2 + Z_B + Z_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.49)}$$

A Figura A.5 mostra o circuito equivalente que descreve a equação (A.49) acima

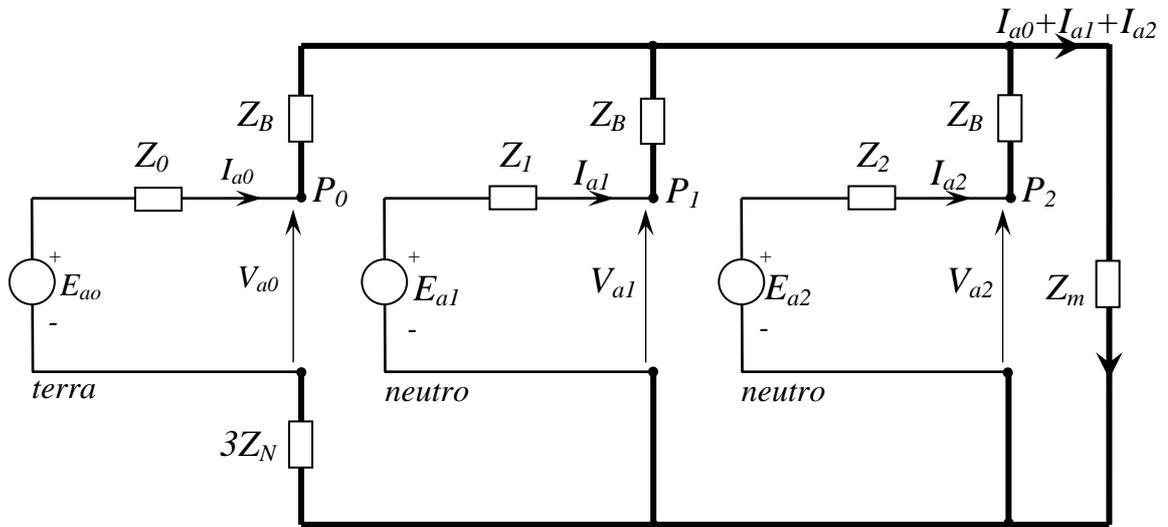


Figura A.5: Diagrama de seqüência para um sistema trifásico com carga desequilibrada ligada estrela aterrada

#### A.4. CARGA MONOFÁSICA ENTRE DUAS FASES (BC)

O circuito da Figura A.6 ilustra a situação a ser analisada. Para este circuito tem-se que

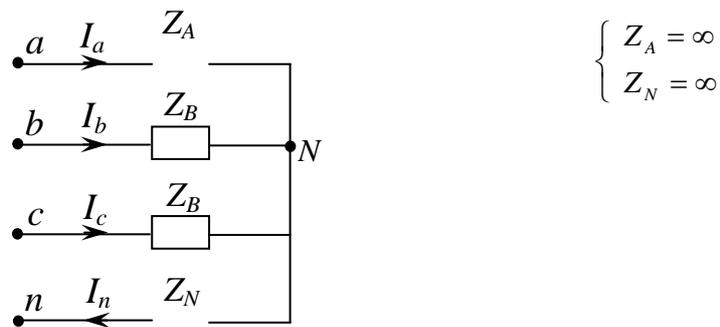


Figura A.6: Circuito com carga monofásica ligada entre duas fases

Desta forma

$$Z_m = \frac{1}{3} [Z_A - Z_B] = \infty \quad \text{Eq. (A.50)}$$

O circuito equivalente vai ser o circuito anterior abrindo as impedâncias  $Z_m$  e  $Z_N$ , conforme Figura A.7.

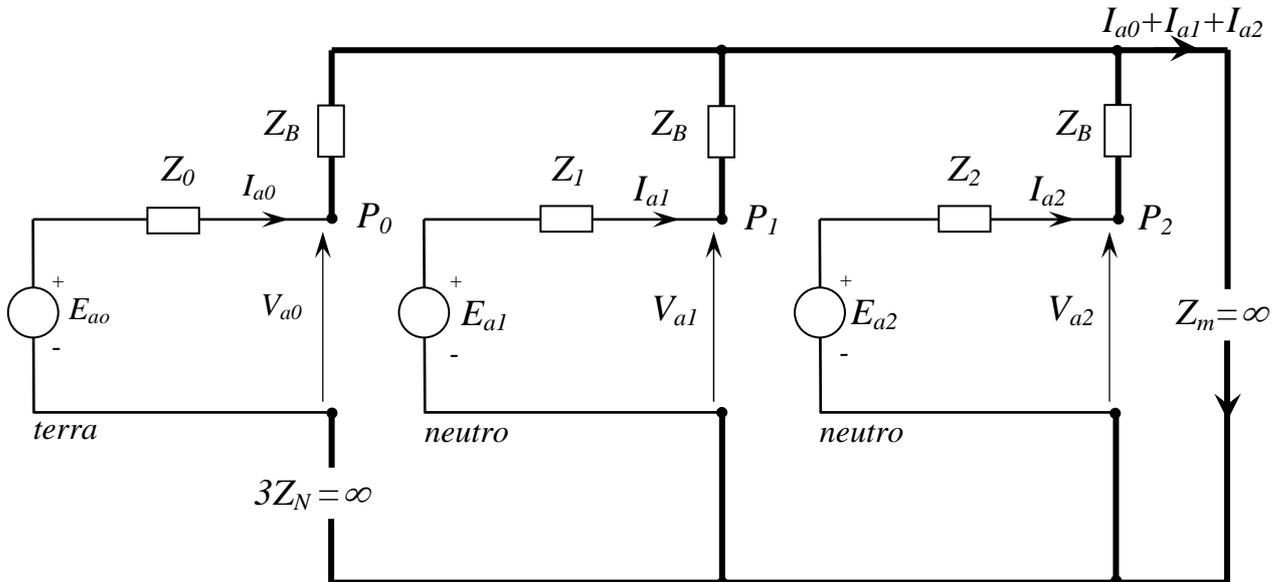


Figura A.7: Diagrama de seqüência para uma carga monofásica ligada entre duas fases

Como não circula corrente no diagrama de seqüência zero, este circuito pode ser simplificado através do circuito ilustrado na Figura A.8.

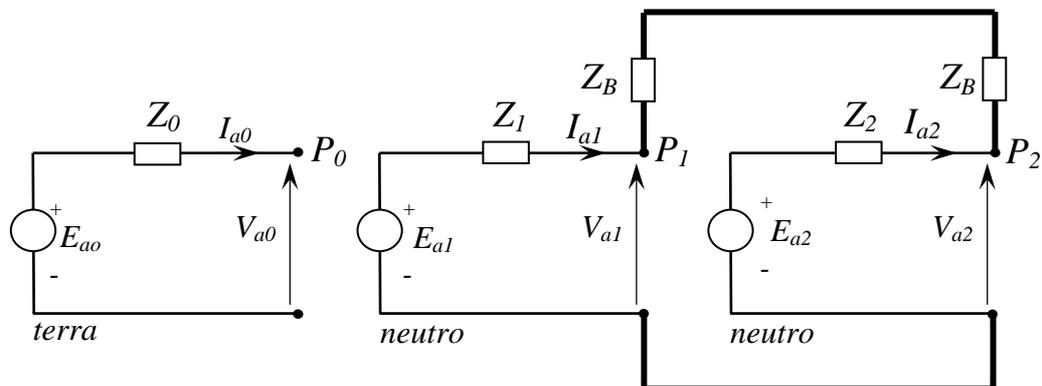


Figura A.8: Diagrama de seqüência para uma carga monofásica ligada entre duas fases

As correntes de seqüência na carga vão ser dadas por

$$\begin{cases} I_{a0} = 0 \\ I_{a1} = \frac{E_{a1} - E_{a2}}{Z_1 + Z_2 + 2Z_B} \\ I_{a2} = -I_{a1} \end{cases} \quad \text{Eq. (A.51)}$$

As tensões de seqüência nos terminais da carga vão ser

$$\begin{cases} V_{a0} = E_{a0} \\ V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \\ V_{a2} = E_{a2} - Z_2 I_{a2} \end{cases} \quad \text{Eq. (A.52)}$$

Utilizando-se a transformação inversa das componentes simétricas obtêm-se as correntes na carga e as tensões nos terminais da carga em componentes de fase.

**A.5. CARGA MONOFÁSICA ENTRE DUAS FASES E TERRA (BCT)**

O circuito da Figura A.9 ilustra a situação a ser analisada. Para este circuito tem-se que:

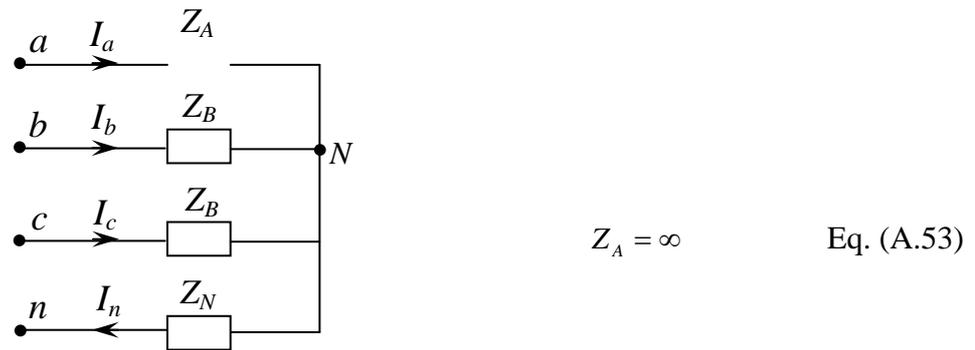


Figura A.9: Circuito com carga monofásica ligada entre duas fases e neutro

Desta forma

$$Z_m = \frac{1}{3} [Z_A - Z_B] = \infty \quad \text{Eq. (A.54)}$$

O circuito equivalente vai ser igual ao circuito original abrindo-se apenas a impedância  $Z_m$ , conforme Figura A.10.

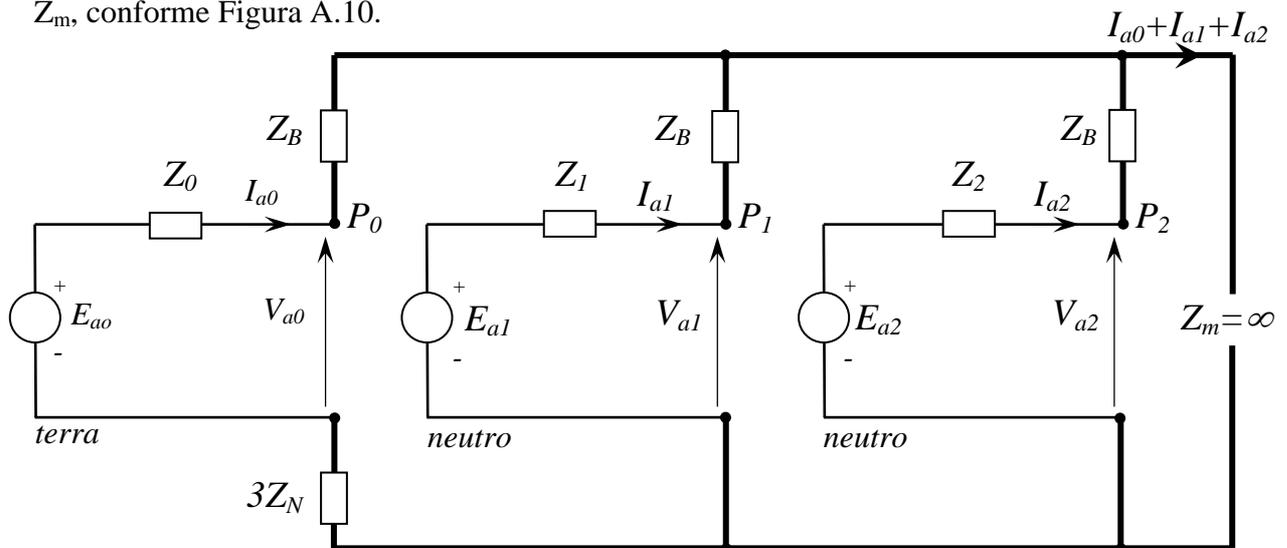


Figura A.10: Diagrama de seqüência para uma carga monofásica ligada entre duas fases e neutro

Neste caso já existe circulação de corrente de seqüência zero, pois existe um caminho de retorno através da impedância de neutro. O circuito anterior é simplificado muitas vezes eliminando-se o ramo da direita resultando no circuito representado na Figura A.11.

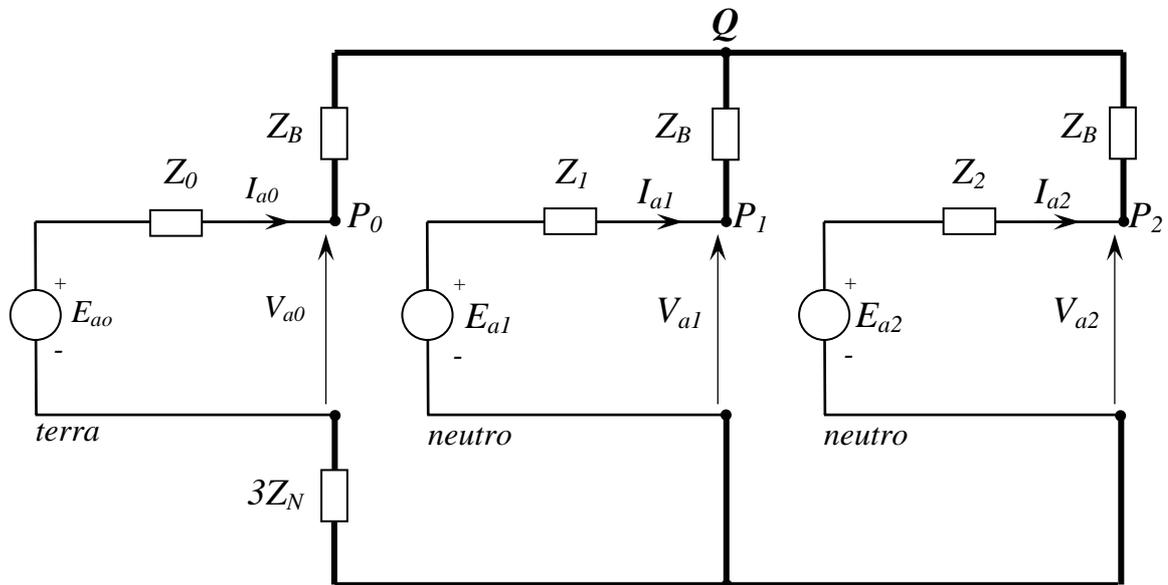


Figura A.11: Diagrama de seqüência para uma carga monofásica ligada entre duas fases e neutro

As correntes de seqüência na carga podem ser calculadas aplicando-se a Lei de *Kirchhoff* das correntes para o nó Q, ou seja:

$$\frac{V_Q - E_{a0}}{Z_0 + Z_B + 3Z_N} + \frac{V_Q - E_{a1}}{Z_1 + Z_B} + \frac{V_Q - E_{a2}}{Z_2 + Z_B} = 0 \quad \text{Eq. (A.55)}$$

ou seja,

$$V_Q = \frac{\frac{E_{a0}}{Z_0 + Z_B + 3Z_N} + \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_B} + \frac{E_{a2}}{Z_2 + Z_B}}{\frac{1}{Z_0 + Z_B + 3Z_N} + \frac{1}{Z_1 + Z_B} + \frac{1}{Z_2 + Z_B}} \quad \text{Eq. (A.56)}$$

e então

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{a0} = \frac{E_{a0} - V_Q}{Z_0 + Z_B + 3Z_N} \\ I_{a1} = \frac{E_{a1} - V_Q}{Z_1 + Z_B} \\ I_{a2} = \frac{E_{a2} - V_Q}{Z_2 + Z_B} \end{array} \right. \quad \text{Eq. (A.57)}$$

As tensões de seqüência podem ser calculadas pelas equações (A.52), com exceção de  $V_{a0} = E_{a0} - I_{a0}Z_0$ .

Interessa muitas vezes o caso onde as tensões de *Thévenin* são simétricas. Desta forma as tensões de *Thévenin* de seqüência zero e negativa serão nulas e então as correntes de seqüência podem ser calculadas diretamente por

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{E_{a1}}{(Z_1 + Z_B) + [(Z_0 + Z_B + 3Z_N) // (Z_2 + Z_B)]} \\ I_{a2} &= -\frac{Z_0 + Z_B + 3Z_N}{(Z_2 + Z_B) + (Z_0 + Z_B + 3Z_N)} I_{a1} \\ I_{a0} &= -\frac{Z_2 + Z_B}{(Z_2 + Z_B) + (Z_0 + Z_B + 3Z_N)} I_{a1} = -(I_{a1} + I_{a2}) \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.58)}$$

## A.6. CARGA MONOFÁSICA ENTRE FASE E TERRA (AT)

O circuito da Figura A.12 ilustra a situação a ser analisada. Para este circuito tem-se

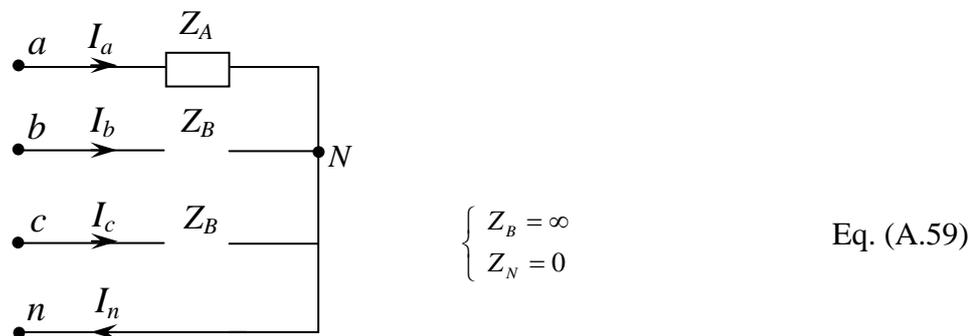


Figura A.12: Circuito com carga monofásica ligada entre uma fase e neutro

As condições estabelecidas pelas equações (A.59) levam a uma condição de indeterminação deste circuito, uma vez que agora a impedância que tende para infinito é

$Z_B$ . Desta forma deve ser utilizada uma outra abordagem. Inicialmente, devem ser estabelecidas as condições de contorno em componentes de fase para a carga, dadas por

$$\begin{cases} I_b = I_c = 0 \\ V_a = Z_A \cdot I_a \end{cases} \quad \text{Eq. (A.60)}$$

As correntes de seqüência podem ser calculadas aplicando-se a transformada inversa das componentes simétricas, ou seja,

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{I_a}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.61)}$$

ou seja, a primeira das equações (A.60), em componentes simétricas, pode ser expressa por

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{I_a}{3} \quad \text{Eq. (A.62)}$$

ou ainda

$$I_a = 3I_{a0} = 3I_{a1} = 3I_{a2} \quad \text{Eq. (A.63)}$$

Substituindo a equação (A.62) na segunda das equações (A.60) vem que

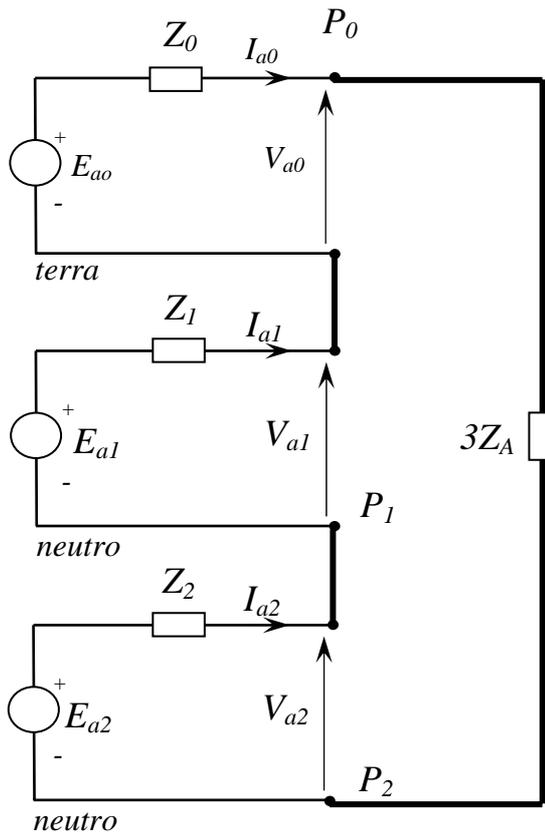
$$V_a = Z_A \cdot I_a = 3Z_A \cdot I_{a0} = 3Z_A \cdot I_{a1} = 3Z_A \cdot I_{a2} \quad \text{Eq. (A.64)}$$

Expressando a tensão de fase da fase “a” também em componentes simétricas tem-se finalmente que

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 3Z_A \cdot I_{a0} = 3Z_A \cdot I_{a1} = 3Z_A \cdot I_{a2} \quad \text{Eq. (A.65)}$$

As equações (A.62) e (A.65) expressam as equações (A.60) em componentes simétricas. Desta forma, os circuitos de seqüência devem ser ligados de forma a obedecê-las. A Figura A.13 mostra como devem ser ligados os circuitos de seqüência.

As correntes de seqüência podem ser calculadas por:



$$I_{a0} = \frac{E_{a0} + E_{a1} + E_{a2}}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_A} \quad \text{Eq. (A.66)}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$$

Passando para componentes de fase fica

$$\begin{cases} I_a = 3I_{a0} \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (A.67)}$$

Figura A.13: Diagrama de seqüência para uma carga monofásica ligada entre uma fase e neutro

As tensões de seqüência podem ser calculadas pelas equações (A.52), com exceção de  $V_{a0} = E_{a0} - I_{a0} \cdot Z_0$  e as tensões de fase podem ser calculadas utilizando-se a matriz de transformação de *Fortescue*.

### A.7. CARGA DESEQUILIBRADA EM ESTRELA NÃO ATERRADA (SEM MÚTUAS)

Nesse item, é analisada a situação de uma carga desequilibrada sem impedâncias mútuas ligada em estrela não aterrada, conforme representação da Figura A.14.

Para a rede da Figura A.14 vale:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ V_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.68)}$$

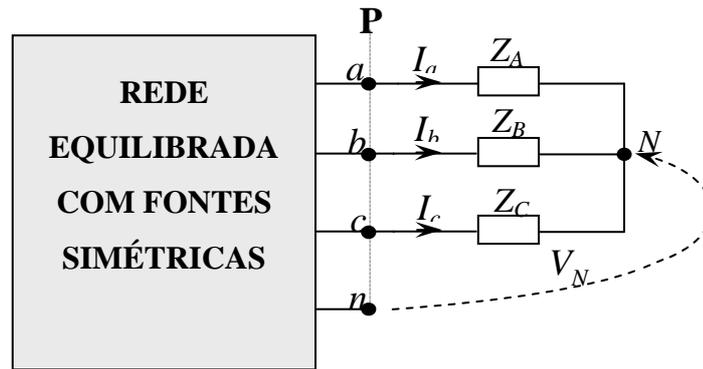


Figura A.14: Rede com carga desequilibrada sem impedâncias mútuas ligada em estrela não aterrada

ou seja,

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & & \\ & Z_B & \\ & & Z_C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ V_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.69)}$$

Na forma condensada tem-se, então, que

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V}_F = \tilde{Z}_F \cdot \bar{I}_F + \bar{V}_N \\ \Downarrow \\ \tilde{Q} \cdot \bar{V}_S = \tilde{Z}_F \cdot \tilde{Q} \cdot \bar{I}_S + \bar{V}_N \\ \Downarrow \\ \bar{V}_S = \tilde{Q}^{-1} \cdot \tilde{Z}_F \cdot \tilde{Q} \cdot \bar{I}_S + \tilde{Q}^{-1} \cdot \bar{V}_N \end{array} \right. \quad \text{Eq. (A.70)}$$

É adequado neste momento analisar o último termo da equação (A.70) anterior.

$$\tilde{Q}^{-1} \cdot \bar{V}_N = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot V_N = \begin{bmatrix} V_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{V}_{NS} \quad \text{Eq. (A.71)}$$

Logo

$$\bar{V}_S = \tilde{Z}_S \cdot \bar{I}_S + \bar{V}_{NS} \quad \text{Eq. (A.72)}$$

ou seja, na carga

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.73)}$$

Do ponto P para dentro do sistema tem-se que

$$\bar{V}_S = \bar{E}_{TS} - \tilde{Z}_{TS} \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.74)}$$

ou seja,

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.75)}$$

Igualando-se as equações (A.74) e (A.72) vem que

$$\bar{E}_{TS} - \tilde{Z}_{TS} \cdot \bar{I}_S = \tilde{Z}_S \cdot \bar{I}_S + \bar{V}_{NS} \quad \text{Eq. (A.76)}$$

ou seja,

$$\bar{E}_{TS} - \bar{V}_{NS} = (\tilde{Z}_S + \tilde{Z}_{TS}) \cdot \bar{I}_S \quad \text{Eq. (A.77)}$$

De forma expandida tem-se

$$\begin{bmatrix} E_{a0} - V_N \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + Z_0 & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.78)}$$

Como não existe retorno, então

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad \text{Eq. (A.79)}$$

ou seja,

$$\begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + \\ &+ (I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}) + \\ &+ (I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}) = 3I_{a0} = 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.80)}$$

Logo

$$I_{a0} = 0 \quad \text{Eq. (A.81)}$$

Substituindo a equação (A.81) na equação (A.78), estas últimas tomam a forma

$$\begin{cases} E_{a0} - V_N = Z_{m1} \cdot I_{a1} + Z_{m2} \cdot I_{a2} \\ E_{a1} = (Z_p + Z_1) \cdot I_{a1} + Z_{m1} \cdot I_{a2} \\ E_{a2} = Z_{m2} \cdot I_{a1} + (Z_p + Z_2) \cdot I_{a2} \end{cases} \quad \text{Eq. (A.82)}$$

ou seja,

$$\begin{bmatrix} E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.83)}$$

Resolvendo a equação (A.83) para  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$ , vem que

$$I_{a1} = \frac{\begin{vmatrix} E_{a1} & Z_{m1} \\ E_{a2} & Z_p + Z_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{vmatrix}} = \frac{E_{a1}(Z_p + Z_2) - E_{a2}Z_{m1}}{(Z_p + Z_1)(Z_p + Z_2) - Z_{m1}Z_{m2}} \quad \text{Eq. (A.84)}$$

$$I_{a2} = \frac{\begin{vmatrix} Z_p + Z_1 & E_{a1} \\ Z_{m2} & E_{a2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{vmatrix}} = \frac{E_{a2}(Z_p + Z_1) - E_{a1}Z_{m2}}{(Z_p + Z_1)(Z_p + Z_2) - Z_{m1}Z_{m2}} \quad \text{Eq. (A.85)}$$

O valor da tensão do neutro da carga em relação ao neutro do sistema,  $V_N$ , pode ser calculado pela primeira das equações (A.82), ou seja,

$$V_N = E_{a0} - Z_{m1} \cdot I_{a1} - Z_{m2} \cdot I_{a2} \quad \text{Eq. (A.86)}$$

Os valores das tensões de seqüência podem ser calculados através da equação (A.75).

## A.8. ASSIMETRIA SÉRIE NA FASE “A” COM CARGA DESEQUILIBRADA LIGADA EM ESTRELA ISOLADA

A assimetria série é uma situação freqüentemente encontrada nos sistemas elétricos de potência, tendo como exemplo o rompimento de um cabo ou da abertura de um equipamento de proteção. O circuito da Figura A.15 ilustra uma assimetria série através da inserção de uma impedância  $Z_A$  em série com uma fase apenas, considerando-se:

Rede 1: Constituída de fontes de tensão monofásicas equilibradas ligadas em estrela aterrada.

Rede 2: Constituída de cargas ligadas em estrela isolada com cargas desequilibradas sem impedâncias mútuas.

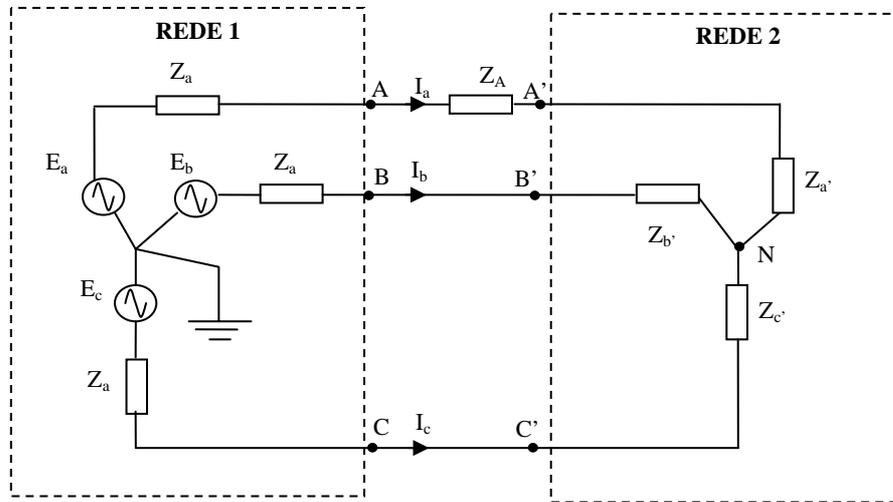


Figura A.15: Circuito com carga desequilibrada sem impedâncias mútuas ligada em estrela não aterrada, com assimetria série na fase A

Analisando o circuito acima, tem-se:

$$\begin{aligned} V_A &= E_a - I_a Z_a \\ V_B &= E_b - I_b Z_a \\ V_C &= E_c - I_c Z_a \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.87)}$$

$$\begin{aligned} V_{A'} - V_N &= I_a Z_{a'} \\ V_{B'} - V_N &= I_b Z_{b'} \\ V_{C'} - V_N &= -I_c Z_{c'} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} V_{A'} &= I_a Z_{a'} + V_N \\ V_{B'} &= I_b Z_{b'} + V_N \\ V_{C'} &= I_c Z_{c'} + V_N \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.88)}$$

Ou em forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_a & 0 \\ 0 & 0 & Z_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.89)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{A'} \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a'} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{b'} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{c'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ V_N \\ V_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.90)}$$

Transformando as equações (A.89) e (A.90) para componentes simétricas tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.91)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0'} \\ V_{a1'} \\ V_{a2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.92)}$$



$$\begin{bmatrix} V_{a0'} \\ V_{a1'} \\ V_{a2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.93)}$$

onde

$$\begin{cases} Z_p = Z_{00} = Z_{11} = Z_{22} = \frac{1}{3}(Z_A + Z_B + Z_C) \\ Z_{m1} = Z_{01} = Z_{12} = Z_{20} = \frac{1}{3}(Z_A + a^2 Z_B + a Z_C) \\ Z_{m2} = Z_{10} = Z_{21} = Z_{02} = \frac{1}{3}(Z_A + a Z_B + a^2 Z_C) \end{cases} \quad \text{Eq. (A.94)}$$

Assim, existirão dois conjuntos de equações da forma

$$\begin{aligned} V_{a0} &= E_{a0} - I_{a0} Z_0 \\ V_{a1} &= E_{a1} - I_{a1} Z_1 \\ V_{a2} &= E_{a2} - I_{a2} Z_2 \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.95)}$$

$$\begin{aligned} V_{a0'} &= Z_p I_{a0} + Z_{m1} I_{a1} + Z_{m2} I_{a2} + V_N \\ V_{a1'} &= Z_{m2} I_{a0} + Z_p I_{a1} + Z_{m1} I_{a2} \\ V_{a2'} &= Z_{m1} I_{a0} + Z_{m2} I_{a1} + Z_p I_{a2} \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.96)}$$

Considerando ainda que:

$$\begin{aligned} \Delta V_A &= V_A - V_{A'} = Z_A I_a \\ \Delta V_B &= V_B - V_{B'} = 0 \\ \Delta V_C &= V_C - V_{C'} = 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.97)}$$

Sendo que em notação matricial tem-se

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.98)}$$

Transformando a equação (A.98) em componentes simétricas, tem-se

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{a0} \\ \Delta V_{a1} \\ \Delta V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & Z_A & 0 \\ 0 & 0 & Z_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{Z_A}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Logo, 
$$\begin{bmatrix} \Delta V_{a0} \\ \Delta V_{a1} \\ \Delta V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{Z_A}{3} \begin{bmatrix} I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.99)}$$

Assim, a equação (A.97) em componentes simétricas é da forma

$$\begin{aligned} \Delta V_{a0} &= V_{a0} - V_{a0'} = \frac{Z_A}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \\ \Delta V_{a1} &= V_{a1} - V_{a1'} = \frac{Z_A}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \\ \Delta V_{a2} &= V_{a2} - V_{a2'} = \frac{Z_A}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.100)}$$

Substituindo as equações (A.95) e (A.96) em (A.100) e considerando que as tensões de fonte são equilibradas e defasadas  $120^\circ$ , com  $E_{a0} = E_{a2} = 0$ , tem-se

$$\begin{aligned} \Delta V_{a0} &= V_{a0} - V_{a0'} = -Z_0 I_{a0} - (Z_p I_{a0} + Z_{m1} I_{a1} + Z_{m2} I_{a2} + V_N) = \frac{Z_A}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \\ \Delta V_{a1} &= V_{a1} - V_{a1'} = E_{a1} - I_{a1} Z_1 - (Z_{m2} I_{a0} + Z_p I_{a1} + Z_{m1} I_{a2}) = \frac{Z_A}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \\ \Delta V_{a2} &= V_{a2} - V_{a2'} = V_{a2} = -Z_2 I_{a2} - (Z_{m1} I_{a0} + Z_{m2} I_{a1} + Z_p I_{a2}) = \frac{Z_A}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \end{aligned} \quad \text{Eq. (101)}$$

Como a impedância de neutro na rede 2 é infinita,  $I_{a0} = 0$

Logo rearranjando a equação (A.101) tem-se

$$\begin{aligned} 0 &= I_{a1} \left( \frac{Z_A}{3} + Z_{m1} \right) + I_{a2} \left( \frac{Z_A}{3} + Z_{m2} \right) + V_N \\ E_{a1} &= I_{a1} \left( \frac{Z_A}{3} + Z_1 + Z_p \right) + I_{a2} \left( \frac{Z_A}{3} + Z_{m1} \right) \\ 0 &= I_{a1} \left( \frac{Z_A}{3} + Z_{m2} \right) + I_{a2} \left( \frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.102)}$$

Colocando (A.102) em notação matricial tem-se

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) & 1 \\ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_1 + Z_p\right) & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) & 0 \\ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ V_N \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(A.103)}$$

Utilizando o conceito de determinantes pode-se determinar  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  e  $V_N$ , sendo que

$$I_{a1} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) & 1 \\ E_{a1} & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right) & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{E_{a1} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right)}{\Delta} \quad \text{Eq.(A.104)}$$

$$I_{a2} = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) & 0 & 1 \\ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_1 + Z_p\right) & E_{a1} & 0 \\ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) & 0 & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} = \frac{-E_{a1} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right)}{\Delta} \quad \text{Eq.(A.105)}$$

$$V_N = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) & 0 \\ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_1 + Z_p\right) & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) & E_{a1} \\ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) & \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right) & 0 \end{vmatrix}}{\Delta} \therefore$$

$$V_N = \frac{E_{a1} \left[ \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right)^2 - \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right) \right]}{\Delta} \quad \text{Eq. (A.106)}$$

sendo

$$\Delta = \left(\frac{Z_A}{3} + Z_1 + Z_p\right) \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right) - \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right) \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right) \quad \text{Eq.(A.107)}$$

Colocando  $I_{a2}$  em função de  $I_{a1}$  obtém-se

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{\left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right)}{\left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right)} \quad \text{Eq.(A.108)}$$

Expandindo  $I_{a1}$  da equação (A.104), tem-se

$$I_{a1} = \frac{E_{a1} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right)}{\left(\frac{Z_A}{3} + Z_1 + Z_p\right)\left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right) - \left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m1}\right)\left(\frac{Z_A}{3} + Z_{m2}\right)} \quad \text{Eq.(A.109)}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1} \left(\frac{Z_A}{3} + Z_2 + Z_p\right)}{(b+c)} \quad \text{Eq.(A.110)}$$

onde

$$b = (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_p + Z_1 \frac{Z_A}{3} + Z_p Z_2 + Z_p Z_p + Z_p \frac{Z_A}{3})$$

$$c = (Z_2 \frac{Z_A}{3} + Z_p \frac{Z_A}{3} + \frac{Z_A^2}{9} - Z_{m1} Z_{m2} - Z_{m1} \frac{Z_A}{3} + Z_{m2} \frac{Z_A}{3} - \frac{Z_A^2}{9})$$

Considerando a fase “a” aberta,  $Z_A$  tende para o infinito. Logo, dividindo-se o numerador e o denominador da equação (A.110) por  $Z_A/3$  e fazendo  $Z_A$  tender para o infinito tem-se que

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + 2Z_p - Z_{m1} - Z_{m2}} \quad \text{Eq.(A.111)}$$

Determinada  $I_{a1}$ , faz-se o mesmo procedimento anterior com  $I_{a2}$  na equação (A.108), e para  $V_N$  em (A.106) resultando em

$$I_{a2} = -I_{a1} \quad \text{Eq.(A.112)}$$

$$V_N = \frac{-E_{a1} (Z_2 + Z_p + Z_{m1} - 2Z_{m2})}{Z_1 + Z_2 + 2Z_p - Z_{m1} - Z_{m2}} = -I_{a1} (Z_2 + Z_p + Z_{m1} - 2Z_{m2}) \quad \text{Eq.(A.113)}$$

Logo, pode-se calcular as tensões de seqüência em A, B, C e em A', B' e C', através das equações (A.95) e (A.96).

Para cargas desequilibradas ligadas em delta, basta apenas fazer o equivalente para a ligação em estrela isolada e calcular os parâmetros de seqüência através das equações (A.111), (A.112), (A.113), (A.95) e (A.96), com  $I_{a0} = 0$ .

### A.9. ABERTURA BIPOLAR COM CARGA DESEQUILIBRADA EM ESTRELA ISOLADA

Considerando ainda o circuito da Figura A.15, porém agora com abertura bipolar nas fases A e B, pode-se calcular as tensões de seqüência da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_A &= E_a - I_a Z_a \\ V_B &= E_b - I_b Z_a \\ V_C &= E_c - I_c Z_a \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.114)}$$

Como as fases A e B estão abertas

$$I_a = I_b = 0 \quad \text{Eq. (A.115)}$$

$$\begin{aligned} V_A &= E_a \\ V_B &= E_b \\ V_C &= E_c - I_c Z_a \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.116)}$$

Como a carga ligada em estrela não aterrada está com duas fases abertas

$$I_c = 0 \quad \text{Eq. (A.117)}$$

$$\begin{aligned} V_A &= E_a \\ V_B &= E_b \\ V_C &= E_c \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.118)}$$

$$\begin{aligned} V_C &= V_{C'} = E_c \\ V_{A'} &= V_{C'} = E_c \\ V_{B'} &= V_{C'} = E_c \end{aligned} \quad \text{Eq. (A.119)}$$

Considerando as tensões da fonte simétricas, tem-se em notação matricial

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.120)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{A'} \\ V_{B'} \\ V_{C'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_c \\ E_c \\ E_c \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} V_{a0'} \\ V_{a1'} \\ V_{a2'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_c \\ E_c \\ E_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (A.121)}$$

Logo,

$$V_{a0'} = \frac{1}{3} 3E_c = E_c$$

$$V_{a1'} = \frac{1}{3} (1 + a + a^2) E_c = 0$$

$$V_{a2'} = \frac{1}{3} (1 + a + a^2) E_c = 0$$

Eq. (A.122)

## APÊNDICE B

# CÁLCULOS DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Neste apêndice são apresentados os cálculos e considerações do grau de desequilíbrio de tensão para situações de desequilíbrio acentuado de carga e faltas com assimetria série no alimentador representado na Figura 4.1.

O desenvolvimento de todas as equações para cada situação a ser analisada está descrito no Apêndice A.

As impedâncias dos cabos utilizados nos cálculos estão apresentadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Valores de impedâncias de seqüência de cabos

Impedância de seqüência positiva (ohms/km)		Impedância de seqüência zero (ohms/km)		Descrição do cabo
R	X <sub>L</sub>	R	X <sub>L</sub>	
0,2006	0,3809	0,6018	1,1427	Cabo de alumínio simples 336,4 MCM - 170,50 mm <sup>2</sup>
0,3184	0,4025	0,9552	1,2075	Cabo de alumínio simples 4/0 AWG - 107,20 mm <sup>2</sup>
0,6375	0,4282	1,9125	1,2846	Cabo de alumínio simples 1/0 AWG - 53,43 mm <sup>2</sup>
1,0145	0,4462	3,0435	1,3386	Cabo de alumínio simples 2 AWG - 33,63 mm <sup>2</sup>
1,6118	0,4637	4,8354	1,3911	Cabo de alumínio simples 4 AWG - 21,15 mm <sup>2</sup>

Nota: Todas as tensões são referidas a terra.

Os parâmetros utilizados nesse apêndice para determinar o grau de desequilíbrio de tensão são  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , como descrito no Capítulo 4.

### B.1. DESEQUILÍBRIO ACENTUADO DE CARGA

#### B.1.1. Carga ligada entre duas fases do alimentador

A Figura B.1 apresenta o circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada entre duas fases, sendo a impedância  $Z_B = (179,27 + j86,82) \Omega$ , calculada para uma corrente de 40 A com fator de potência de 0,9 atrasado, quando aplicada uma tensão nominal de 1 pu ou, no caso, de 7.967 V.

Como exemplo, serão calculadas as correntes e tensões de seqüência através das equações (A.51) e (A.52) para um alimentador trifásico com cabo 4 AWG CA, extensão de 15 km, com

a carga instalada em seu final, e assumindo as tensões da fonte simétricas. Dessa forma, tem-se:

$$Z_1 = Z_2 = 15(1,6118 + j0,4637) = (24,1770 + j6,9555) \Omega$$

$$E_{a0} = E_{a2} = 0 V$$

$$E_{a1} = 7.967,4 \angle 0^\circ V$$

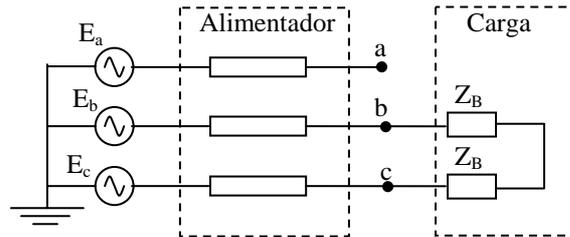


Figura B.1: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada entre duas fases

Como não existe caminho de retorno pela terra,  $I_{a0} = 0$ . Logo  $V_{a0} = 0$  e  $\alpha_0 = 0$ .

Logo

$$\begin{cases} I_{a0} = 0 \text{ A} \\ I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + 2Z_B} = 17,78 \angle -24,75^\circ \text{ A} \\ I_{a2} = -I_{a1} = 17,78 \angle 155,25^\circ \text{ A} \end{cases}$$

As tensões de seqüência nos terminais da carga vão ser

$$\begin{cases} V_{a0} = E_{a0} = 0 \text{ V} \\ V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} = 7.525,2 + j67,6 = 7.525,5 \angle 0,5^\circ \text{ V} \\ V_{a2} = E_{a2} - Z_2 I_{a2} = 442,2 - j67,6 = 447,3 \angle -8,7^\circ \text{ V} \end{cases}$$

Calculando as tensões de fase em a, b e c, tem-se:

$$\begin{aligned} \bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 7.525,5 \angle 0,5^\circ \\ 447,3 \angle -8,7,3^\circ \end{bmatrix} \\ \bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 7.967,4 \angle 0^\circ \\ 7.250,6 \angle -122,2^\circ \\ 7.378,3 \angle 123,8^\circ \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 0,91 \angle -122,2^\circ \\ 0,93 \angle 123,8^\circ \end{bmatrix} pu \end{aligned}$$

Calculando  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , obtém-se:

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2}|}{|V_{NF}|} = \frac{447,3}{7967,4} = 0,056 \text{ pu}$$

$$\Delta V_d = \frac{|V_d - V_{d0}|}{|V_{d0}|} = \frac{|(7.525,2 + j67,6,30) - 7967,4|}{7967,4} = 0,056 \text{ pu}$$

Utilizando as mesmas equações anteriores, foram realizados cálculos para todos os cinco cabos descritos na Tabela B.1, variando a extensão do alimentador de 0 a 20 km, sendo a única carga colocada no final do mesmo. Dessa forma, foram calculados  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  para cada km, chegando-se nos gráficos (a) e (b) da Figura B.3.

Pode-se verificar que, para o pior caso, cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20 km da fonte, o valor máximo de  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  é próximo a 0,07 pu, apesar dos valores de tensão  $V_b$  e  $V_c$  atingirem 88,5% e 90,5%, respectivamente. Porém, o defasamento entre  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  continua próximo a  $120^\circ$ , como verificado através dos gráficos plotados na simulação realizada no ATP® (Figura B.2) e da estimação de fasores realizada no MatLab®. Ou seja, as tensões estão desequilibradas apenas em módulo (tendo como referência a tensão  $V_a$  que é 1 pu), o que não ocorre com relação ao defasamento de  $120^\circ$  entre as mesmas.

Ressalta-se que, apesar do valor  $V_b$  estar abaixo dos valores permitidos pela ANEEL, essa situação pode representar uma condição anormal para o sistema. Além disso, o objetivo é avaliar o nível de desequilíbrio de tensão para um desequilíbrio de carga acentuado, seja ele uma condição normal ou anormal para o sistema.

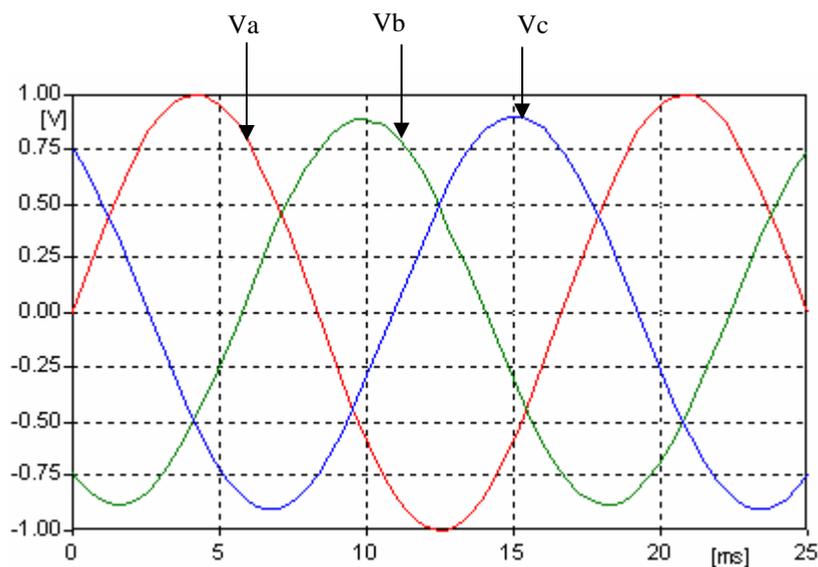


Figura B.2: Gráfico das tensões de fase para carga ligada entre duas fases (valores em pu - base na tensão fase-neutro de pico)

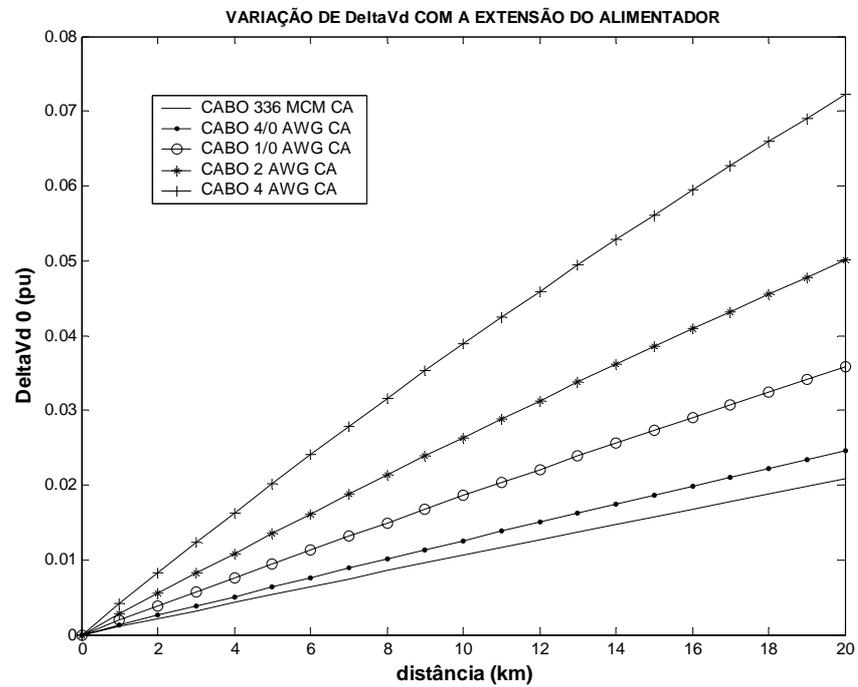
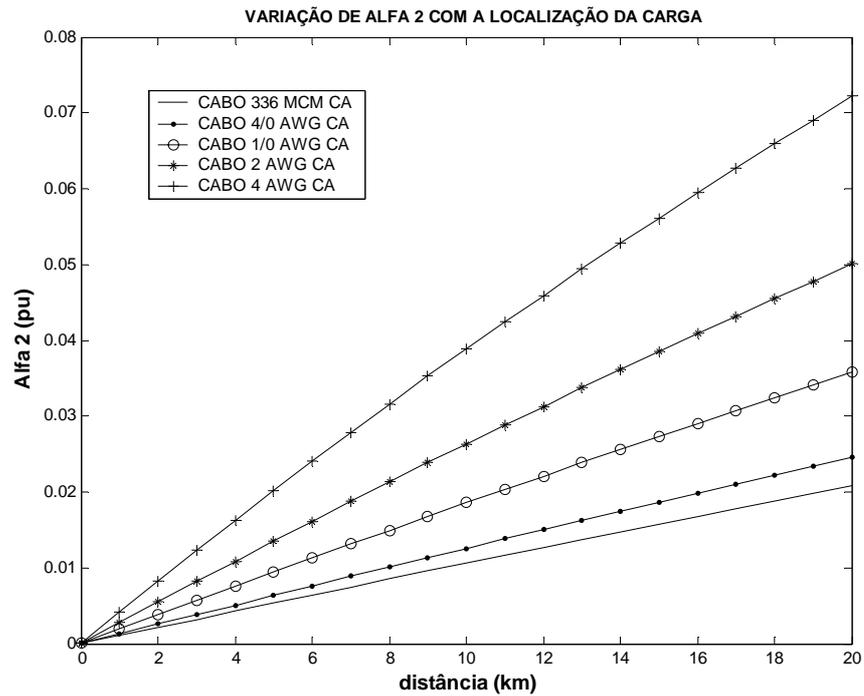


Figura B.3: Gráficos (a) Alfa 2 (b) DeltaVd  
- Carga ligada entre duas fases -

### B.1.2. Carga ligada entre uma fase e neutro do alimentador

A Figura B.4 apresenta o circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada entre uma fase e neutro, sendo a impedância  $Z_B = (179,27 + j86,82) \Omega$ , calculada para uma corrente de 40 A com fator de potência de 0,9 atrasado, quando aplicada uma tensão nominal de 1 pu, ou no caso, de 7.967 V.

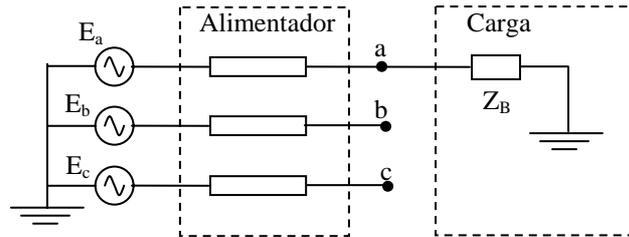


Figura B.4: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga entre uma fase e neutro

Como exemplo, serão calculadas as correntes e tensões de seqüência através das equações (A.66) e (A.52) sendo que  $V_{a0} = E_{a0} - I_{a0} \cdot Z_0$  e  $Z_N = 0$ , para um alimentador trifásico com cabo 4 AWG CA extensão de 15 km com a carga instalada em seu final, e assumindo as tensões da fonte simétricas. Dessa forma, tem-se:

$$Z_1 = 24,1770 + j6,9555 \Omega$$

$$Z_0 = 72,5310 + j20,8665 \Omega$$

$$E_{a0} = E_{a2} = 0V$$

$$E_{a1} = 7.967,4 \angle 0V$$

$$I_{a0} = \frac{E_{a0} + E_{a1} + E_{a2}}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_B} = 11,61 \angle -22,8^\circ A$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$$

As tensões de seqüência nos terminais da carga vão ser

$$\begin{cases} V_{a0} = E_{a0} - I_{a0} Z_0 = 833,05 \angle 171,9V \\ V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} = 7.692,6 \angle 0,3^\circ V \\ V_{a2} = E_{a2} - Z_2 I_{a2} = 277,7 \angle 177,9^\circ V \end{cases}$$

Calculando as tensões de fase em a, b e c, tem-se:

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 833,5 \angle 171,9^\circ \\ 7.692,6 \angle 0,3^\circ \\ 277,7 \angle 177,9^\circ \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.595,7 \angle 1,7^\circ \\ 8.190,5 \angle -123,6^\circ \\ 8.321,4 \angle 123,0^\circ \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} 0,828 \angle 0^\circ \\ 1,028 \angle -123,07^\circ \\ 1,045 \angle 122,4^\circ \end{bmatrix} pu$$

Calculando  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , obtém-se:

$$\alpha_0 = \frac{|V_{a0}|}{|V_{NF}|} = \frac{833,05}{7967,4} = 0,105 pu$$

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2}|}{|V_{NF}|} = \frac{277,7}{7967,4} = 0,035 pu$$

$$\Delta V_d = \frac{|V_d - V_{d0}|}{|V_{d0}|} = \frac{|(7.692,5 + j39,09) - 7967,4|}{7967,4} = 0,035 pu$$

Utilizando as mesmas equações anteriores, foram realizados cálculos para todos os cinco cabos descritos na Tabela B.1, variando a extensão do alimentador de 0 a 20 km, sendo a única carga colocada no final do mesmo. Dessa forma, foram calculados  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  para cada km, chegando-se nos gráficos plotados nas Figuras B.5 e B.6.

No pior caso, cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20 km da fonte, o valor máximo de  $\alpha_0$  atinge 0,13 pu. Já  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  não passam de 0,044 pu, apesar dos valores de  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  atingirem 78,2%, 103,6% e 105,6%, respectivamente. Porém, o defasamento entre  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  continua próximo a  $120^\circ$ , como verificado através dos gráficos plotados na simulação realizada no ATP® (Figura B.7) e da estimação de fasores realizada no MatLab®. Ou seja, as tensões estão desequilibradas apenas em módulo (tendo como referência a tensão  $V_a$  que é 1 pu), o que não ocorre com relação ao defasamento de  $120^\circ$  entre as mesmas.

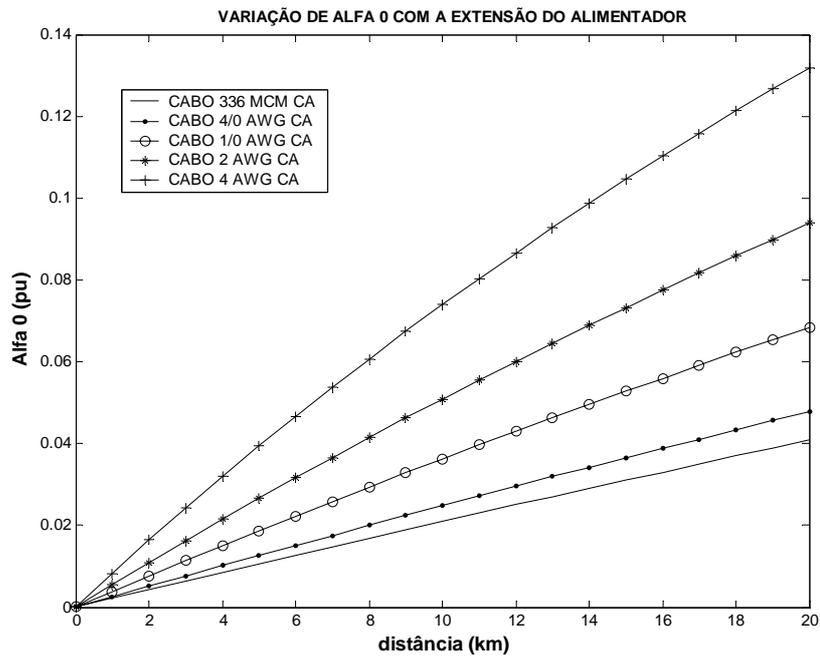
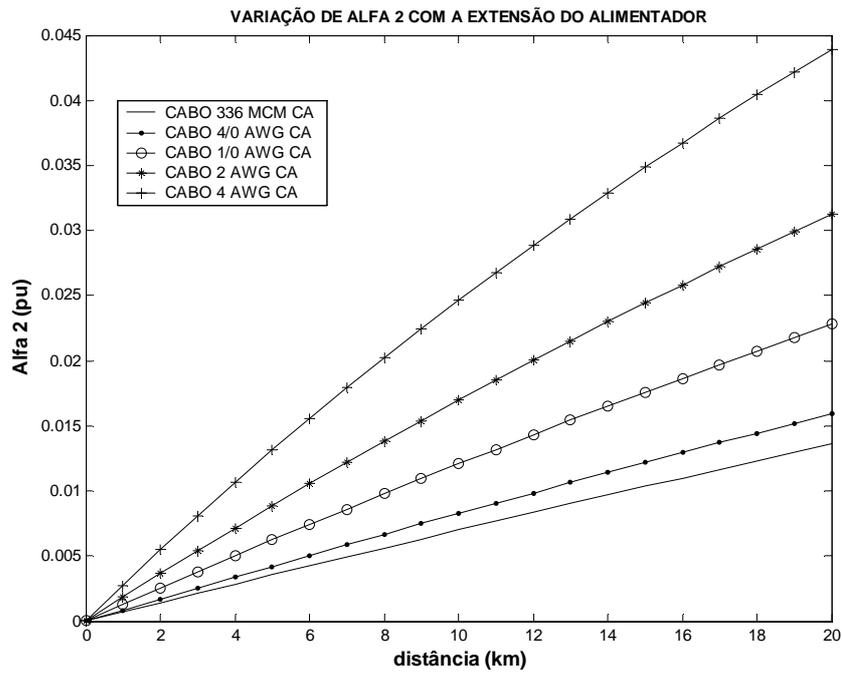


Figura B.5: Gráficos (a) Alfa 2 (b) Alfa 0  
- Carga ligada entre uma fase e neutro -

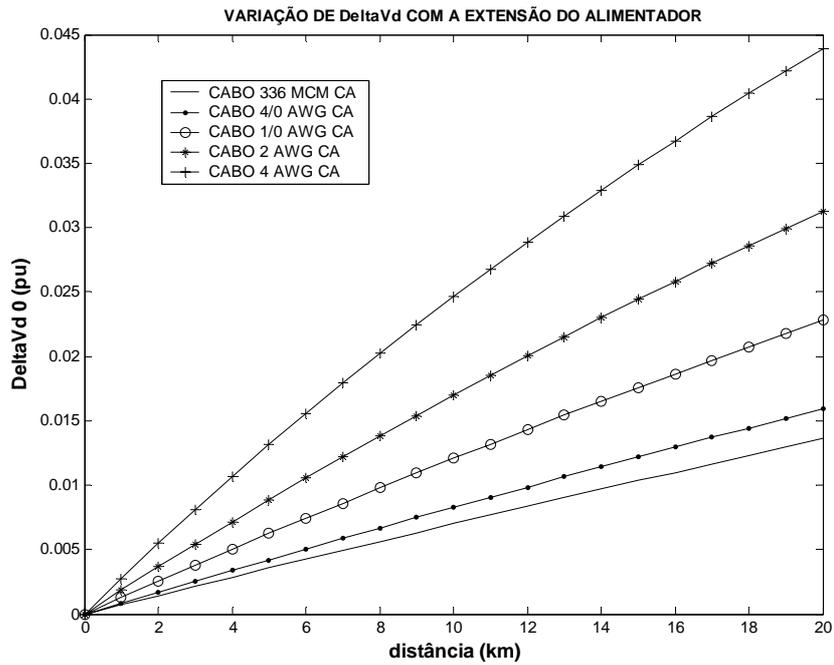


Figura B.6: Gráfico de DeltaVd  
- Carga ligada entre uma fase e neutro -

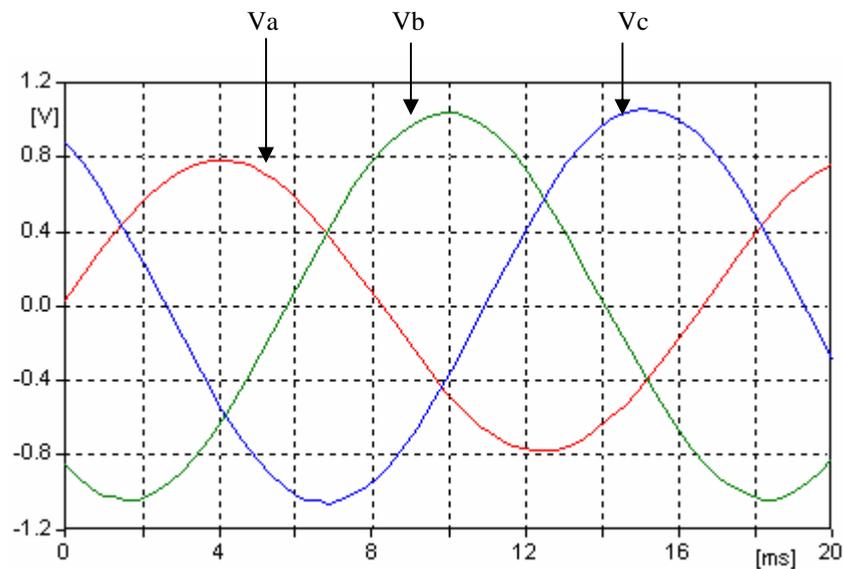


Figura B.7: Gráfico das tensões de fase para carga ligada entre uma fase e neutro  
(valores em pu - base na tensão fase-neutro de pico)

### B.1.3. Carga ligada entre duas fases e neutro

A Figura B.8 apresenta o circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada entre duas fases e neutro, sendo a impedância  $Z_B = (179,27 + j86,82) \Omega$ , calculada para uma corrente de 40 A com fator de potência de 0,9 atrasado, quando aplicada uma tensão nominal de 1 pu ou no caso, de 7.967 V.

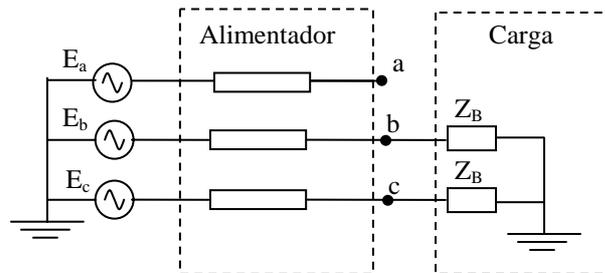


Figura B.8: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada entre duas fase e neutro

Como exemplo, serão calculadas as correntes e tensões de seqüência através das equações (A.57) e (A.51) sendo que  $V_{a0} = E_{a0} - I_{a0} \cdot Z_0$  e  $Z_N = 0$ , para um alimentador trifásico com cabo 4 AWG CA extensão de 15 km com a carga instalada em seu final, e assumindo as tensões da fonte simétricas. Dessa forma, tem-se:

$$Z_1 = Z_2 = 24,1770 + j6,9555 \Omega$$

$$Z_0 = 72,5310 + j20,8665 \Omega$$

$$E_{a0} = E_{a2} = 0V$$

$$E_{a1} = 7.967,4 \angle 0V$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{(Z_1 + Z_B) + [(Z_0 + Z_B + 3Z_N) // (Z_2 + Z_B)]} = 22,94 \angle -24,49^\circ A$$

$$I_{a2} = -\frac{Z_0 + Z_B + 3Z_N}{(Z_2 + Z_B) + (Z_0 + Z_B + 3Z_N)} I_{a1} = 12,62 \angle -25,22^\circ A$$

$$I_{a0} = -\frac{Z_2 + Z_B}{(Z_2 + Z_B) + (Z_0 + Z_B + 3Z_N)} I_{a1} = -(I_{a1} + I_{a2}) = 35,57 \angle 155,25^\circ A$$

As tensões de seqüência nos terminais da carga vão ser

$$\begin{cases} V_{a0} = E_{a0} - I_{a0} Z_0 = 779,3 \angle -7,6^\circ V \\ V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} = 7.397,0 \angle 0,7^\circ V \\ V_{a2} = E_{a2} - Z_2 I_{a2} = 317,5 \angle -9,15^\circ V \end{cases}$$

Calculando as tensões de fase em a, b e c, obtém-se:

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 779,3 \angle -7,6^\circ \\ 7.397,0 \angle 0,7^\circ \\ 317,5 \angle -9,15^\circ \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.484,7 \angle -0,5^\circ \\ 6920,9 \angle -115,4^\circ \\ 6812,3 \angle 118,0^\circ \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} 1,064 \angle -0,5^\circ \\ 0,869 \angle -115,4^\circ \\ 0,855 \angle 118,0^\circ \end{bmatrix} pu$$

Calculando  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , tem-se:

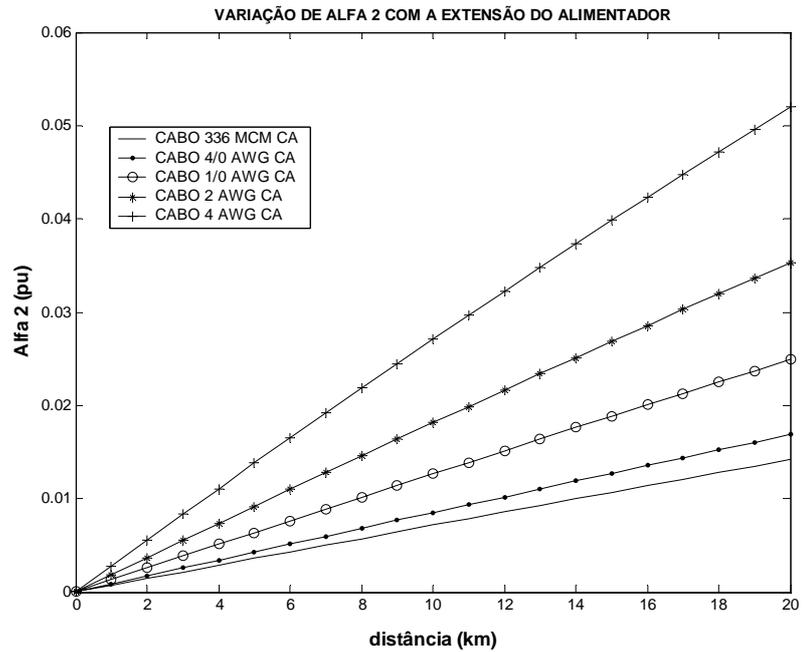
$$\alpha_0 = \frac{|V_{a0}|}{|V_N|} = \frac{779,3}{7967,4} = 0,098 pu$$

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2}|}{|V_{NF}|} = \frac{317,5}{7967,4} = 0,04 pu$$

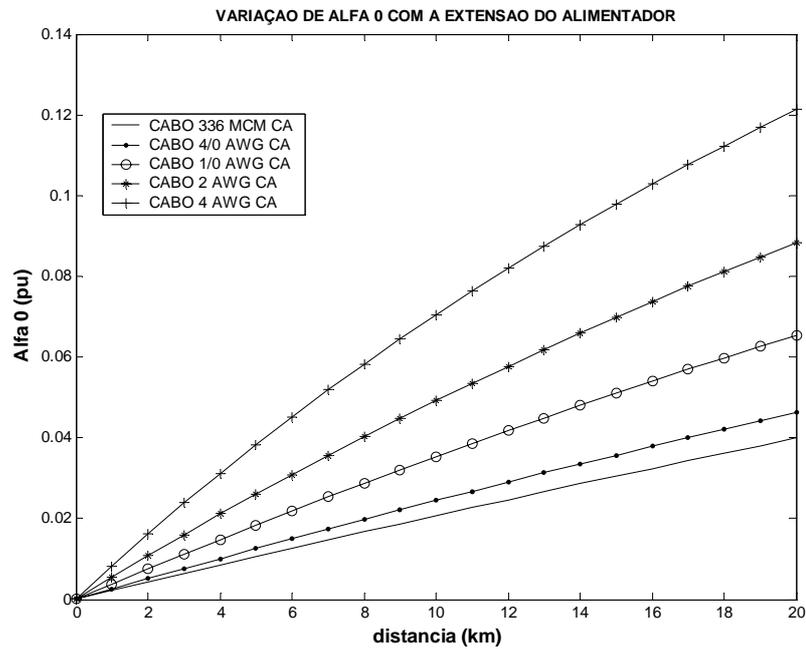
$$\Delta V_d = \frac{|V_d - V_{d0}|}{|V_{d0}|} = \frac{|(7.396,5 + j84,8) - 7967,4|}{7967,4} = 0,072 pu$$

Utilizando as mesmas equações anteriores, foram realizados cálculos para todos os cinco cabos descritos na Tabela B.1, variando a extensão do alimentador de 0 a 20 km, sendo a única carga colocada no final do mesmo. Dessa forma, foram calculados  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  para cada km, chegando-se nos gráficos das Figura B.9 e B.10.

No pior caso, cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20 km da fonte, o valor máximo de  $\alpha_0$  atinge 0,12 pu. Já  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  não passam de 0,051 pu e 0,093 pu, respectivamente, apesar dos valores de  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  atingirem 108,0%, 83,2% e 81,8%, respectivamente. Porém, o defasamento entre  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  continua próximo a 120°, como verificado através dos gráficos plotados na simulação realizada no ATP® (Figura B.11) e da estimação de fasores realizada no MatLab®. Ou seja, as tensões estão desequilibradas apenas em módulo (tendo como referência a tensão  $V_a$  que é 1 pu), o que não ocorre com relação ao defasamento de 120° entre as mesmas.

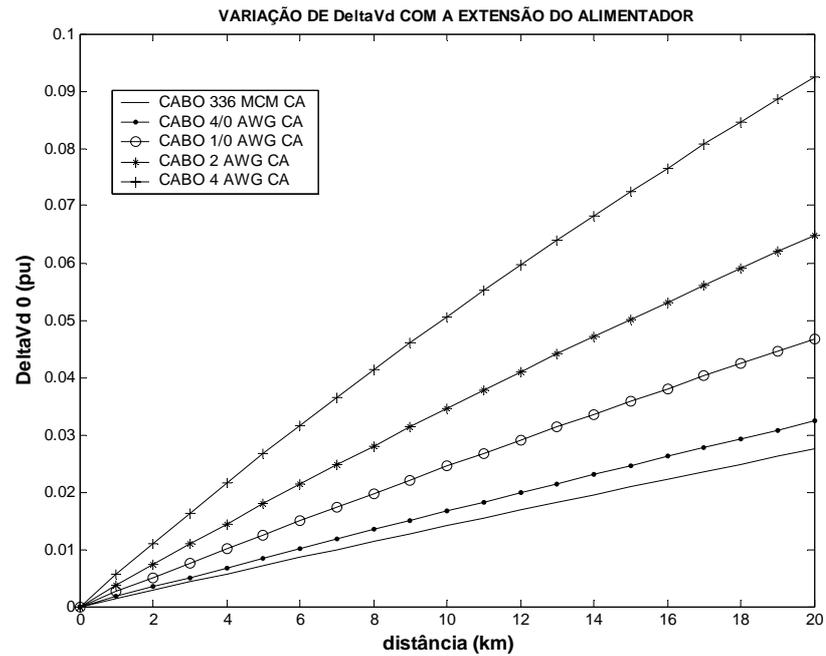


(a)



(b)

Figura B.9: Gráficos (a) Alfa 2 (b) Alfa 0  
 - Carga ligada entre duas fases e neutro -



Figura

B.10: Gráficos de DeltaVd  
- Carga ligada entre duas fases e neutro -

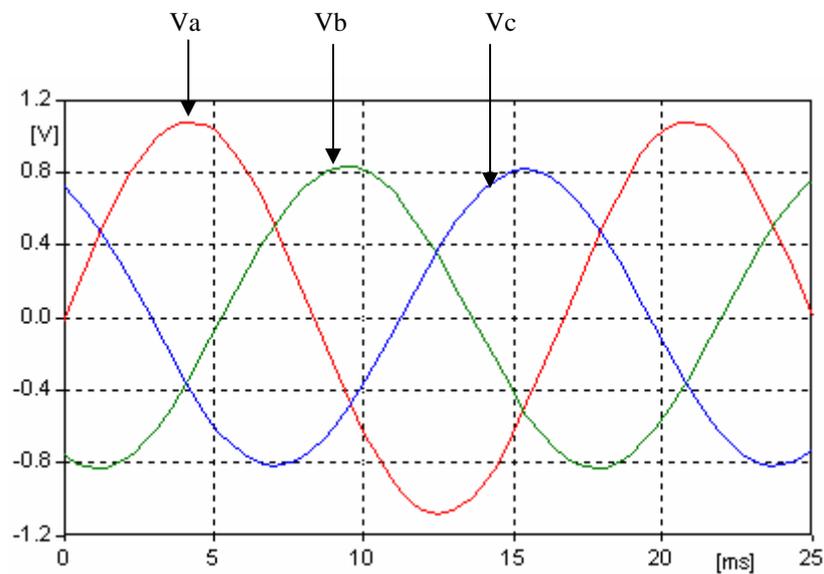


Figura B.11: Gráfico das tensões de fase para carga ligada entre duas fases e neutro (valores em pu - base na tensão fase-neutro de pico)

### B.1.4. Carga desequilibrada ligada em triângulo

A Figura B.12 apresenta o circuito representativo de um alimentador trifásico com carga desequilibrada sem impedâncias mútuas, ligada em triângulo. Esse tipo de desequilíbrio é típico em alimentadores de distribuição uma vez que, na maioria das concessionárias, são utilizados transformadores onde o primário é ligado em triângulo e o secundário em estrela aterrada.

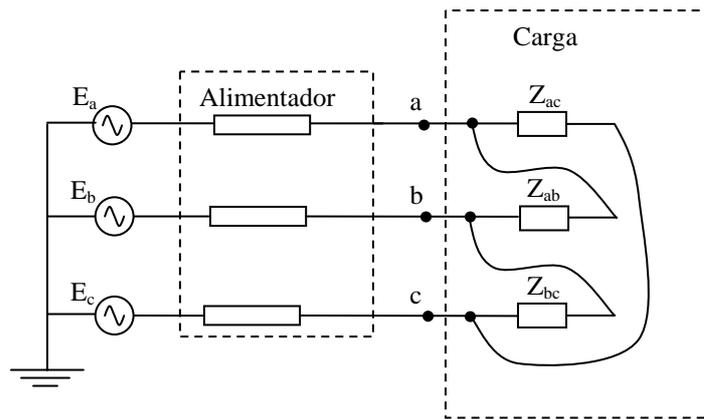
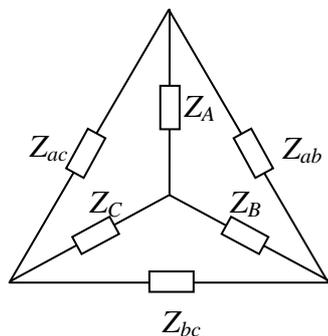


Figura B.12: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada em triângulo

Como interessa as tensões de seqüência em pontos dos condutores primários do alimentador e não na parte interna dos transformadores, pode-se calcular uma carga equivalente em estrela não aterrada partindo-se de uma carga ligada em triângulo, através da equação B.1.



$$\left\{ \begin{array}{l} Z_A = \frac{Z_{ab} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \\ Z_B = \frac{Z_{bc} \cdot Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \\ Z_C = \frac{Z_{ca} \cdot Z_{bc}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \end{array} \right. \quad \text{Eq. (B.1)}$$

Figura B.13: Circuito equivalente triângulo/estrela não aterrada

Consideram-se os seguintes valores de corrente e fator de potência para cada fase da carga,

$$\begin{array}{lll} I_a = 20 \text{ A} & I_b = 50 \text{ A} & I_c = 80 \text{ A} \\ FP_a = 0,9 \text{ (atrasado)} & FP_b = 0,8 \text{ (atrasado)} & FP_c = 0,5 \text{ (atrasado)} \end{array}$$

onde,  $FP_a$ ,  $FP_b$  e  $FP_c$  são os fatores de potência nas fases a, b e c, respectivamente.

Calculando-se as impedâncias da carga ligada em delta para os valores de corrente e fator de potência acima, para uma tensão nominal fase-neutro de 7.967,4V, chega-se a:

$$Z_{ab} = (1.075,6 + j52,09)\Omega$$

$$Z_{ac} = (503,21 + j217,89)\Omega$$

$$Z_{bc} = (382,44 + j286,83)\Omega$$

As impedâncias para uma carga ligada em estrela não aterrada equivalente à carga acima podem então ser calculadas através da equação B.1:

$$Z_A = (275,22 + j109,23)\Omega$$

$$Z_B = (211,18 + j148,44)\Omega$$

$$Z_C = (99,70 + j63,94)\Omega$$

ou em notação matricial, tem-se:

$$\tilde{Z}_F = \begin{bmatrix} 275,22 + j109,23 & 0 & 0 \\ 0 & 211,18 + j148,44 & 0 \\ 0 & 0 & 99,70 + j63,94 \end{bmatrix} \Omega$$

Dessa forma, será analisado diretamente o circuito representado pela Figura B.14, onde é representada a carga ligada em estrela não aterrada descrita acima.

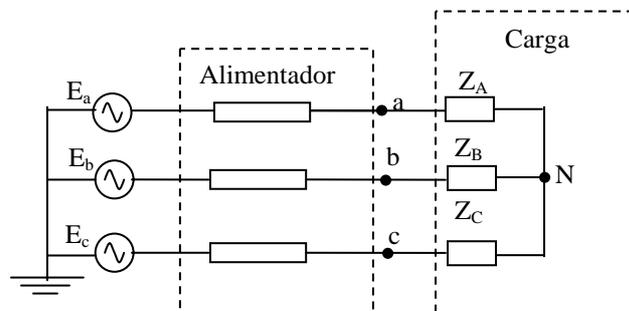


Figura B.14: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga desequilibrada ligada em triângulo

Como exemplo, calcula-se as correntes e tensões de seqüência através das equações (A.84), (A.85) e (A.75), para um alimentador trifásico com cabo 4 AWG CA extensão de 15 km com a carga instalada em seu final, e assume-se as tensões da fonte simétricas. Dessa forma, tem-se:

$$Z_1 = Z_2 = 24,1770 + j6,9555 \Omega$$

$$Z_0 = 72,5310 + j20,8665 \Omega$$

$$\begin{aligned} E_{a0} &= E_{a2} = 0V \\ E_{a1} &= 7.967,4 \angle 0V \end{aligned}$$

Considerando ainda que:

$$\tilde{Z}_F = \tilde{Q} \cdot \tilde{Z}_S \cdot \tilde{Q}^{-1} \quad \text{Eq. (B.2)}$$

$$\tilde{Z}_S = \tilde{Q}^{-1} \cdot \tilde{Z}_F \cdot \tilde{Q} \quad \text{Eq. (B.3)}$$

Transformando as impedâncias de fase da carga para impedâncias de seqüência tem-se através da equação (B.3)

$$\tilde{Z}_S = \tilde{Q}^{-1} \cdot \tilde{Z}_F \cdot \tilde{Q} = \begin{bmatrix} 195,37 + j107,21 & 64,32 - j31,17 & 15,53 + j33,19 \\ 15,53 + j33,19 & 195,37 + j107,21 & 64,32 - j31,17 \\ 64,32 - j31,17 & 15,53 + j33,19 & 195,37 + j107,21 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p \end{bmatrix}$$

Como não há caminho de retorno para a terra,  $I_{a0} = 0$ .

Das equações (A.84) e (A.85) pode-se calcular  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$ :

$$I_{a1} = \frac{\begin{vmatrix} E_{a1} & Z_{m1} \\ E_{a2} & Z_p + Z_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{vmatrix}} = \frac{E_{a1}(Z_p + Z_2) - E_{a2}Z_{m1}}{(Z_p + Z_1)(Z_p + Z_2) - Z_{m1}Z_{m2}} = 33,57 \angle -28,67^\circ \text{ A}$$

$$I_{a2} = \frac{\begin{vmatrix} Z_p + Z_1 & E_{a1} \\ Z_{m2} & E_{a2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_p + Z_1 & Z_{m1} \\ Z_{m2} & Z_p + Z_2 \end{vmatrix}} = \frac{E_{a2}(Z_p + Z_1) - E_{a1}Z_{m2}}{(Z_p + Z_1)(Z_p + Z_2) - Z_{m1}Z_{m2}} = 4,97 \angle -170,74^\circ \text{ A}$$

As tensões de seqüência nos terminais da carga vão ser, através da utilização da equação (A.75):

$$\begin{cases} V_{a0} = E_{a0} - I_{a0}Z_0 = 0V \\ V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} = 7.143,8 \angle 1,42^\circ V \\ V_{a2} = E_{a2} - Z_2 I_{a2} = 125,1 \angle 25,3^\circ V \end{cases}$$

Calculando as tensões de fase em a, b e c, tem-se:

$$\begin{aligned} \bar{V}_F &= \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 7.141,6 \angle 1,42^\circ \\ 125,1 \angle 25,3^\circ \end{bmatrix} \\ \bar{V}_F &= \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.257,6 \angle 1,7^\circ \\ 7.131,2 \angle -119,6^\circ \\ 7.042,9 \angle 122,0^\circ \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} 0,911 \angle 1,7^\circ \\ 0,895 \angle -119,6^\circ \\ 0,884 \angle 122^\circ \end{bmatrix} pu \end{aligned}$$

Como  $V_{a0} = 0$ , logo  $\alpha_0 = 0$ .

Calculando  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ , tem-se:

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2}|}{|V_{NF}|} = \frac{125,1}{7967,4} = 0,016 \text{ pu}$$

$$\Delta V_d = \frac{|V_d - V_{d0}|}{|V_{d0}|} = \frac{|(7.141,6 + j177,41) - 7967,4|}{7967,4} = 0,106 \text{ pu}$$

Utilizando as mesmas equações anteriores, foram realizados cálculos para todos os cinco cabos descritos na Tabela B.1, variando a extensão do alimentador de 0 a 20 km, sendo a única carga colocada no final do mesmo. Dessa forma, foram calculados  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  para cada km, chegando-se nos gráficos da Figura B.16.

No pior caso, cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20 km da fonte, os valores máximos de  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  atingem 0,019 pu e 0,136 pu, respectivamente, apesar dos valores de  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  atingirem 88,5%, 86,5% e 85,0%, respectivamente. Porém, o defasamento entre  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  continua próximo a  $120^\circ$ , como verificado através dos gráficos plotados na simulação realizada no ATP® (Figura B.15) e da estimação de fasores realizada no MatLab®. Ou seja, as tensões estão desequilibradas apenas em módulo (tendo como referência a tensão  $V_a$  que é 1 pu), o que não ocorre com relação ao defasamento de  $120^\circ$  entre as mesmas.

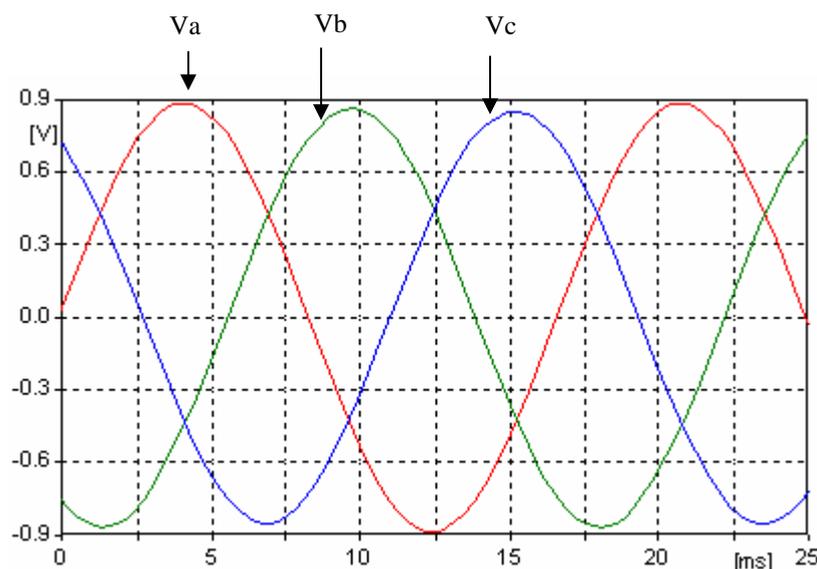
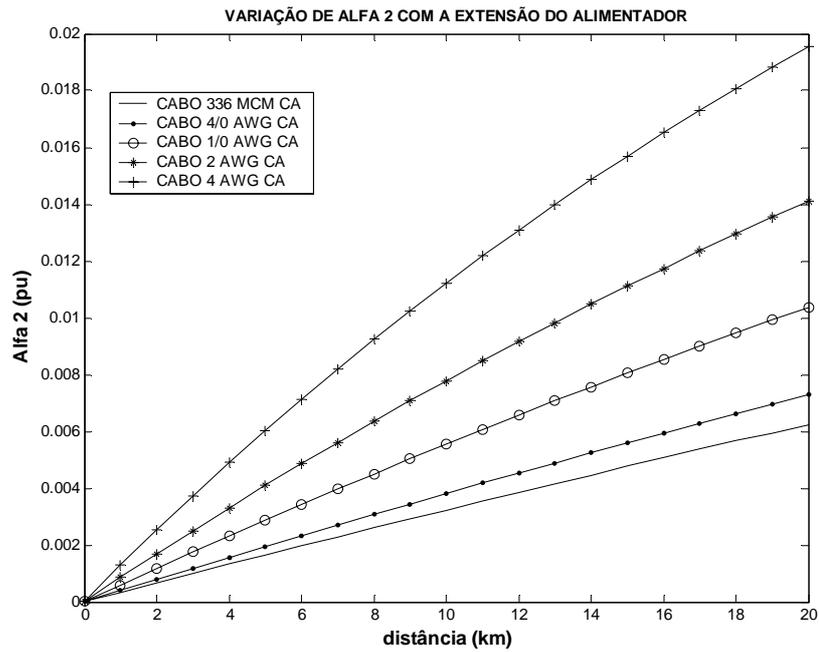
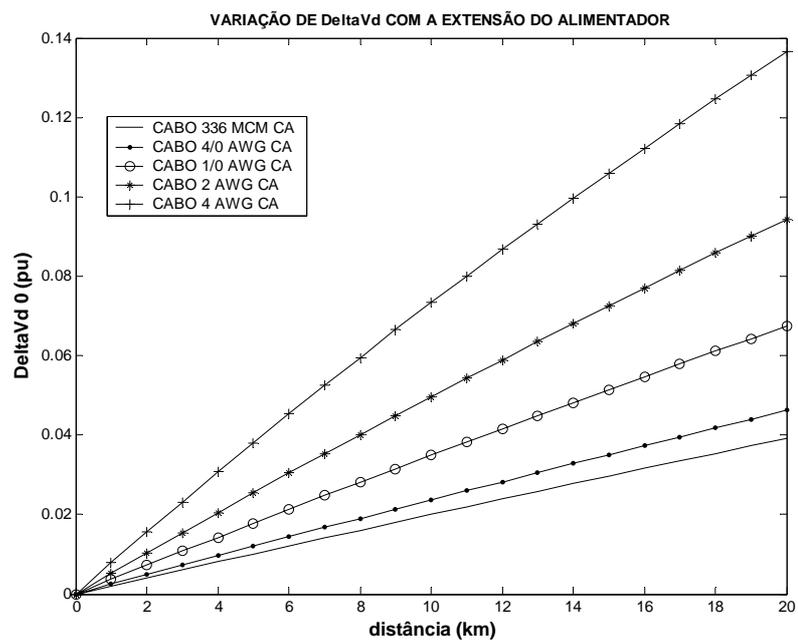


Figura B.15: Gráfico das tensões de fase para carga desequilibrada ligada em triângulo (valores em pu - base na tensão fase-neutro de pico)



(a)



(b)

Figura B.16: Gráficos (a) Alfa 2 (b) DeltaVd  
 - Carga desequilibrada ligada em triângulo -

## B.2. ABERTURA MONOPOLAR NO CIRCUITO PRIMÁRIO DE RDA

Para a abertura monopolar de circuito primário de RDA num alimentador são analisadas as seguintes situações:

- a) Modo analítico: representação de carga desequilibrada ligada em triângulo conectada no final de um alimentador trifásico com extensão de 2 km, sem condutor tocando o solo e sem banco de capacitores, para cinco tipos de cabos descritos anteriormente.
- b) Através de simulações no ATP® e cálculo de fasores no MatLab® através da representação do alimentador da Figura 4.1 com as seguintes situações:
  - 1) Abertura da fase “a” sem cabo tocando o solo, com e sem banco de capacitores.
  - 2) Abertura da fase “a” com cabo tocando o solo no lado fonte com resistência de contato com a terra de 80 e 8000  $\Omega$ , com e sem banco de capacitores.
  - 3) Abertura da fase “a” com cabo tocando o solo no lado carga com resistência de contato com a terra de 80 e 8000  $\Omega$ , com e sem banco de capacitores.

### B.2.1. Carga desequilibrada ligada em triângulo

Nesse item será analisado o mesmo caso do exemplo B.1.4, porém com a abertura da fase “a” antes da carga, ou seja, será analisado um circuito com uma assimetria série (abertura de uma fase) e uma assimetria *shunt* (carga desequilibrada), como mostrado na Figura B.17.

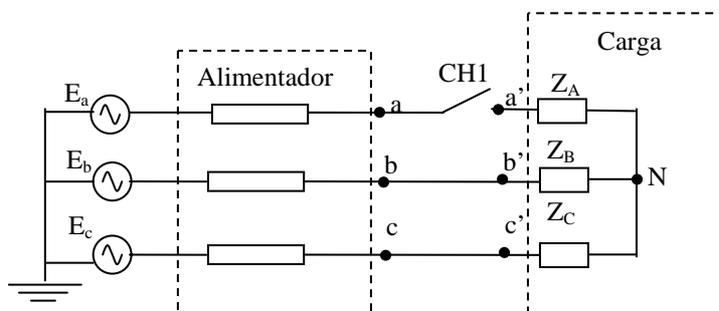


Figura B.17: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada em estrela não aterrada (equivalente de delta) com abertura monopolar

Dessa forma, já são conhecidos:

$$Z_1 = Z_2 = 24,1770 + j6,9555 \Omega$$

$$Z_0 = 72,5310 + j20,8665 \Omega$$

$$E_{a0} = E_{a2} = 0V$$

$$E_{a1} = 7.967,4 \angle 0V$$

$$\tilde{Z}_S = \begin{bmatrix} Z_p & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_p & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 195,37 + j107,21 & 64,32 - j31,17 & 15,53 + j33,19 \\ 15,53 + j33,19 & 195,37 + j107,21 & 64,32 - j31,17 \\ 64,32 - j31,17 & 15,53 + j33,19 & 195,37 + j107,21 \end{bmatrix} \Omega$$

Como não há caminho de retorno para a terra,  $I_{a0} = 0$ . Através da equação (A.111) pode-se calcular  $I_{a1}$ :

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + 2Z_p - Z_{m1} - Z_{m2}} = 18,77 \angle -32,20A$$

E através da equação (A.112) pode-se calcular  $I_{a2}$ :

$$I_{a2} = -I_{a1} = -18,77 \angle 147,80A$$

Pode-se ainda calcular  $V_N$  através de (A.113)

$$V_N = \frac{-E_{a1}(Z_2 + Z_p + Z_{m1} - 2Z_{m2})}{Z_1 + Z_2 + 2Z_p - Z_{m1} - Z_{m2}} = -I_{a1}(Z_2 + Z_p + Z_{m1} - 2Z_{m2}) = 4.699,80 \angle 151,19^\circ V$$

Logo, são calculadas as tensões de seqüência em a, b, c e em a', b' e c', através das equações (A.95) e (A.96).

$$V_{a0} = E_{a0} - I_{a0}Z_0 = 0V$$

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1}Z_1 = 7.515,1 \angle 1,0^\circ V$$

$$V_{a2} = E_{a2} - I_{a2}Z_2 = 454,9 \angle -16,8^\circ V$$

$$V_{a0'} = Z_p I_{a0} + Z_{m1} I_{a1} + Z_{m2} I_{a2} + V_N = 4.118,9 \angle 169,4^\circ V$$

$$V_{a1'} = Z_{m2} I_{a0} + Z_p I_{a1} + Z_{m1} I_{a2} = 3.576,4 \angle 14,3^\circ V$$

$$V_{a2'} = Z_{m1} I_{a0} + Z_{m2} I_{a1} + Z_p I_{a2} = 3.649,4 \angle 170,2^\circ V$$

Pela equação (A.96), pode-se observar que existem impedâncias mútuas entre seqüências na carga devido às duas assimetrias presentes no circuito, série e *shunt*. Assim, com relação ao lado carga (a', b' e c'), isso faz gerar uma queda de tensão em todas as impedâncias de seqüências, inclusive na seqüência zero. Logo, apesar da carga ligada em estrela não aterrada

(ou equivalente de delta), a tensão de seqüência zero será diferente de zero, e portanto,  $\alpha_0$  no lado carga também não será zero, como mostrado a seguir.

Transformando as tensões acima para componentes de fase, tem-se:

$$V_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.967,4 \angle 0^\circ \\ 7.178,1 \angle -121,6^\circ \\ 7.424,3 \angle 124,6^\circ \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} 1,0 \angle 0^\circ \\ 0,901 \angle -121,6^\circ \\ 0,932 \angle 124,6^\circ \end{bmatrix} pu$$

$$V_{F'} = \begin{bmatrix} V_{a'} \\ V_{b'} \\ V_{c'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.754,2 \angle 151,5^\circ \\ 7.178,1 \angle -121,6^\circ \\ 7.424,3 \angle 124,6^\circ \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} 0,597 \angle 151,5^\circ \\ 0,901 \angle -121,6^\circ \\ 0,932 \angle 124,6^\circ \end{bmatrix} pu$$

Pode-se verificar ainda que nesse caso  $V_{a'}$  sofre uma grande defasagem (da ordem de  $150^\circ$ ) e seu módulo uma grande redução com relação à  $V_a$ , devido à assimetria série do circuito em conjunto com a ligação da carga em estrela não aterrada (equivalente de delta).

Calculando  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_{d'}$ , tem-se:

$$\alpha_0 = \frac{|V_{a0'}|}{|V_N|} = \frac{4.118,9}{7967,4} = 0,517 pu$$

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2'}|}{|V_N|} = \frac{3.576,4}{7967,4} = 0,450 pu$$

$$\Delta V_{d'} = \frac{|V_{d'} - V_{d0'}|}{|V_{d0'}|} = \frac{|(3.464,8 + j886,4) - 7967,4|}{7967,4} = 0,576 pu$$

Utilizando as mesmas equações acima, foram realizados cálculos para todos os cinco cabos descritos anteriormente, variando a extensão do alimentador de 0 a 20 km, sendo a única carga colocada no final do mesmo, com a abertura de CH1 na carga. Dessa forma, foram calculados  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_{d'}$  para cada km, chegando-se nas Figuras B.18 e B.19.

No caso do cabo 4 AWG CA com a carga localizada a 20 km da fonte, os valores máximos de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_{d'}$  atingem 0,517 pu, 0,441 pu e 0,592 pu, respectivamente. Porém, verifica-se que o  $V_{a'}$  sofre grande defasamento, da ordem de  $150^\circ$  como mostrado na Figura B.20, devido à abertura da fase “a” e devido à tensão residual da carga ligada em triângulo.

Pode-se verificar ainda que no caso do cabo 336 MCM CA com alimentador com 1 km de extensão, os valores de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_{d'}$  atingem 0,516 pu, 0,515 pu e 0,517 pu, respectivamente.

Analisando ainda uma situação de carga equilibrada ligada em triângulo, com todas as impedâncias calculadas para uma corrente de linha de 40 A e fator de potência de 0,9, conectada num alimentador com 2 km de extensão com cabo 336 MCM CA, os valores de  $\alpha_{0'}$ ,  $\alpha_{2'}$  e  $\Delta V_{d'}$  atingem 0,498 pu, 0,500 pu e 0,501 pu, respectivamente. Ou seja, o que causou o grande desequilíbrio de tensão em todos os casos analisados nesse item foi a assimetria série de abertura de uma fase, e não a assimetria *shunt* de desequilíbrio de carga, apesar dessa última também contribuir para tal.

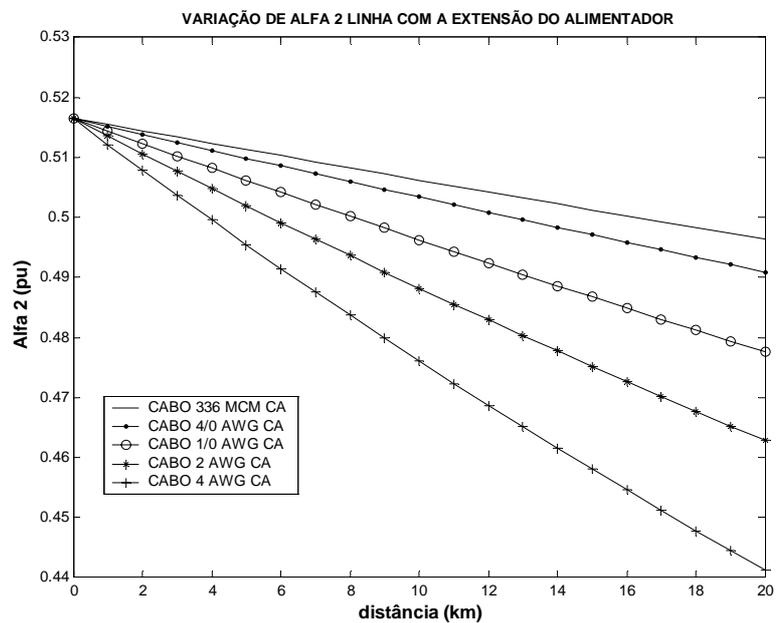
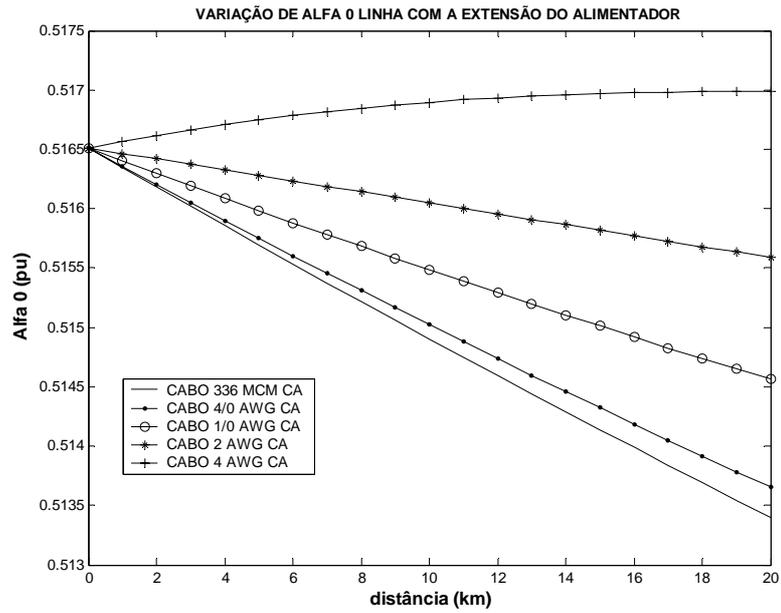
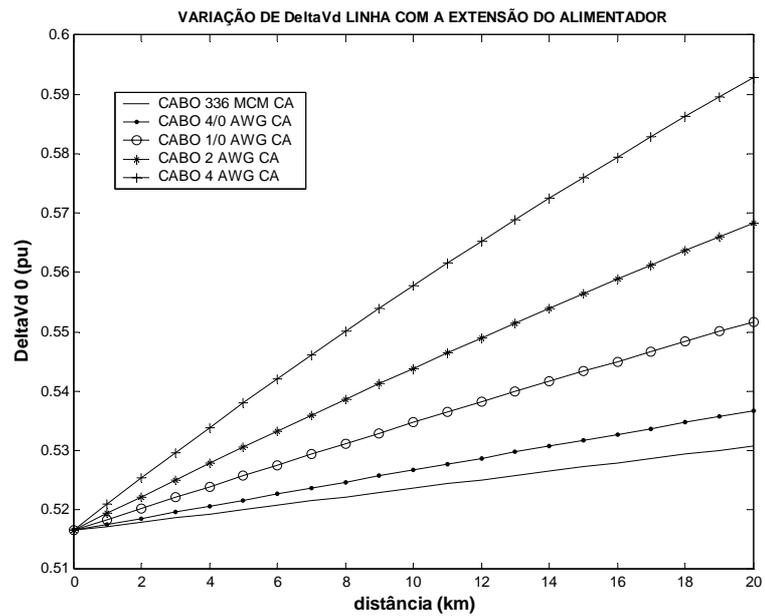


Figura B.18: Gráficos de Alfa 2'  
- Carga desequilibrada ligada em triângulo com abertura monofásica -



(a)



(b)

Figura (B.19): Gráficos (a) Alfa 0' (b) DeltaVd'  
 - Carga desequilibrada ligada em triângulo com abertura monofásica -

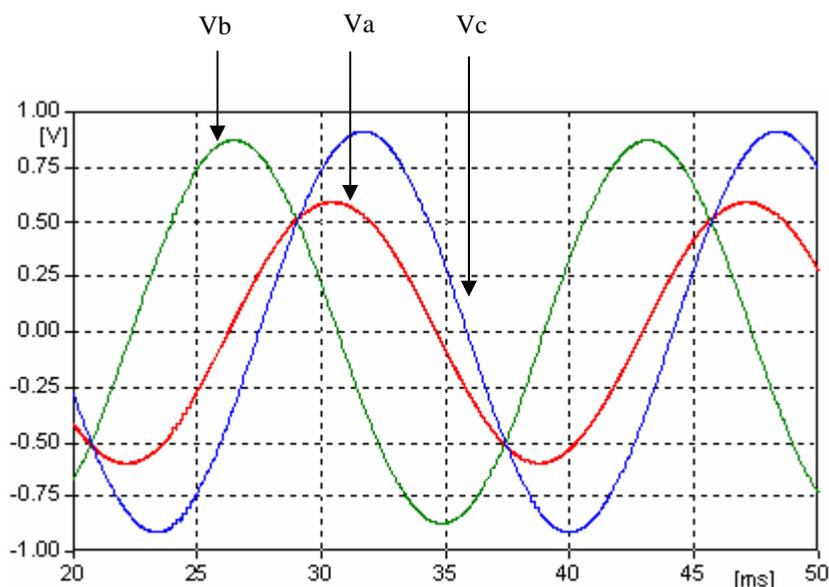


Figura (B.20): Gráfico das tensões de fase para carga desequilibrada ligada em triângulo com abertura monofásica (valores em pu - base na tensão fase-neutro de pico)

### B.2.2. Alimentador fictício

Neste item, são analisadas situações de abertura monopolar com o alimentador de 13,8 kV fase-fase, representado na Figura 4.1, através de simulações no ATP® e com o cálculo de fasores através do MatLab®, de modo a calcular  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$ . Todos os trechos são representados através de um circuito primário trifásico com cabo 336 MCM CA com 1 km de extensão cada. Os equipamentos de proteção são representados através de chaves trifásicas normalmente fechadas. Foram inseridos 45 transformadores ligados em triângulo representados através de circuitos monofásicos RL série ligados em triângulo, com impedâncias diferentes umas das outras, representando apenas as cargas desequilibradas ligadas no secundário de cada transformador. As impedâncias das bobinas do transformador, sejam elas próprias ou mútuas, não foram representadas uma vez que se tornam desprezíveis com relação às impedâncias representativas de suas respectivas cargas para o objetivo em questão, que é a verificação do nível de desequilíbrio de tensão no circuito primário do alimentador lado carga.

A abertura da fase “a” foi realizada no trecho 3-4 (Figura 4.1), sendo verificadas as tensões de fase no ponto 19, escolhido aleatoriamente, e dessa forma, através do cálculo de fasores, foram calculados  $\alpha_{0'}$ ,  $\alpha_{2'}$  e  $\Delta V_{d'}$  no ponto 19.

#### **B.2.2.1. Abertura da fase “a” sem cabo tocando o solo, com e sem banco de capacitores**

Nesse caso  $\alpha_{0'}$ ,  $\alpha_{2'}$  e  $\Delta V_{d'}$ , atingem respectivamente 0,507, 0,496 e 0,521 pu para a situação sem banco de capacitores e 0,519, 0,507 e 0,531pu para com um banco de capacitores de 300 kVAr instalado no ponto 10, respectivamente. Aumentando a potência desse banco de capacitores para 600 kVAr, os valores atingiram 0,530, 0,516 e 0,538 pu, respectivamente. Com dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada, instalados no ponto 10 e 19, os valores atingem 0,552, 0,531 e 0,549 pu, respectivamente. Dessa forma, verifica-se muito pouca influência dos bancos de capacitores no nível de desequilíbrio de tensão nessa situação, ressaltando-se que os valores dos parâmetros aumentaram com a inserção dos mesmos.

#### **B.2.2.2. Abertura da fase “a” com cabo tocando o solo, no lado fonte, com e sem banco de capacitores**

Com o cabo tocando o solo no lado fonte com a resistência de contato com a terra de  $80 \Omega$  e sem banco de capacitores  $\alpha_{0'}$ ,  $\alpha_{2'}$  e  $\Delta V_{d'}$  atingem, respectivamente, 0,513, 0,496 e 0,521 pu. Inserindo dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada instalados nos pontos 10 e 19, os valores atingem 0,558, 0,533 e 0,550 pu, respectivamente.

Aumentando a resistência de contato do cabo com a terra para  $8000 \Omega$  sem os bancos de capacitores, os valores são praticamente os mesmos que no caso de  $80 \Omega$  sem os bancos. Inserindo dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada, instalados nos pontos 10 e 19, os valores atingem 0,552, 0,532 e 0,549 pu, respectivamente. Dessa forma, pode-se verificar que o valor da resistência de contato do cabo caído lado fonte com a terra tem muito pouca influência no nível de desequilíbrio de tensão provocado por uma abertura monopolar, partindo-se de um valor o qual caracterize uma falta de alta impedância. Pouca influência também ocorre devido à presença de bancos de capacitores.

### B.2.2.3. Abertura da fase “a” com cabo tocando o solo no lado carga, com e sem banco de capacitores

Com o cabo tocando o solo lado carga com a resistência de contato com a terra de  $80 \Omega$  e sem banco de capacitores  $\alpha_{0'}$ ,  $\alpha_{2'}$  e  $\Delta V_{d'}$  atingem, respectivamente, 0,403, 0,395 e 0,420 pu. Inserindo dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada, instalados nos pontos 10 e 19, os valores atingem 0,413, 0,399 e 0,417 pu, respectivamente. Aumentando a resistência de contato do cabo com a terra para  $8000 \Omega$  os valores atingem 0,504, 0,494 e 0,519 pu, respectivamente, sem bancos de capacitores. Inserindo dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada, instalados nos pontos 10 e 19, os valores atingem 0,552, 0,532 e 0,549 pu, respectivamente. Dessa forma, pode-se verificar que o valor da resistência de contato do cabo caído no lado carga com a terra influencia muito pouco no nível de desequilíbrio de tensão provocado por uma abertura monopolar, partindo-se de um valor o qual caracterize uma falta de alta impedância. Pouca influência também ocorre devido à presença de bancos de capacitores.

## B.3. ABERTURA BIPOLAR NO CIRCUITO PRIMÁRIO DE RDA

Para a abertura bipolar de circuito primário de RDA num alimentador são analisadas as mesmas situações do item B.2, porém com abertura bipolar nas fases a e b.

### B.3.1. Carga desequilibrada ligada em triângulo

Nesse item será analisado o mesmo caso do exemplo B.1.4, porém com a abertura das fases a e b antes da carga, ou seja, será analisado um circuito com uma assimetria série (abertura bipolar) e uma assimetria *shunt* (carga desequilibrada), conforme mostrado na Figura B.21.

Dessa forma, através da equação (A.121) pode-se calcular as tensões de seqüência em a', b' e c':

$$V_{a0'} = \frac{1}{3} 3E_c = E_c = 7.967,4 V$$

$$V_{a1'} = \frac{1}{3} (1 + a + a^2) E_c = 0 V$$

$$V_{a2'} = \frac{1}{3} (1 + a + a^2) E_c = 0 V$$

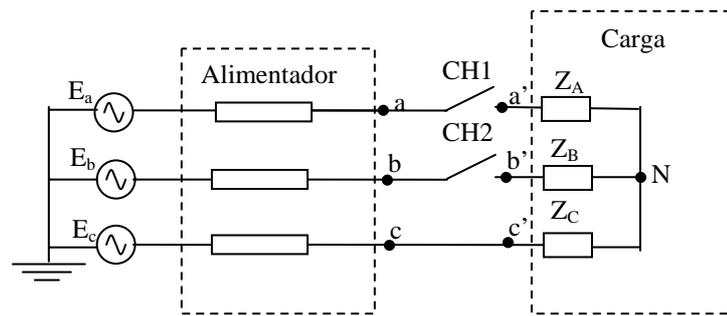


Figura B.21: Circuito representativo de um alimentador trifásico com carga ligada em estrela não aterrada (equivalente de delta) com abertura bipolar

Dessa forma, pode-se calcular  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_{d'}$ :

$$\alpha_0 = \frac{|V_{a0'}|}{|V_{NF}|} = \frac{7.967,4}{7967,4} = 1,0 pu$$

$$\alpha_2 = \frac{|V_{a2'}|}{|V_N|} = \frac{0}{7967,4} = 0 pu$$

$$\Delta V_{d'} = \frac{|V_{d'} - V_{d0'}|}{|V_{d0'}|} = \frac{|(0 - 7967,4)|}{7967,4} = 1,0 pu$$

Pode-se verificar que  $\alpha_2$  é igual a 0. Logo, esse parâmetro não servirá para distinguir um desequilíbrio de tensão entre uma falta de fases e um desequilíbrio acentuado de carga. Já  $\alpha_0$  e  $\Delta V_{d'}$  são iguais a 1.

### B.3.2. Alimentador fictício

Da mesma forma como no item B.2.2, é analisado o nível de desequilíbrio de tensão no alimentador representado na Figura 4.1, porém com abertura bipolar nas fases “a” e “b” no trecho 3-4, sendo verificadas as tensões de fase no ponto 10, escolhido aleatoriamente.

#### B.3.2.1. Abertura das fases “a” e “b” sem cabo tocando o solo, com e sem banco de capacitores

Nesse caso  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_{d'}$ , atingem respectivamente 0,993, 0 e 0,998 pu para a situação sem banco de capacitores e os mesmos valores com um banco de capacitores de 1200 kVAr instalado nos pontos 10 e 19. Verifica-se que a presença dos bancos de capacitores não tem influência nos níveis de desequilíbrio de tensão nesse caso.

### B.3.2.2. Abertura das fases “a” e “b” com cabo tocando o solo, no lado fonte, com e sem banco de capacitores

Com ambos os cabos tocando o solo no lado fonte com a resistência de contato com a terra de  $80\ \Omega$  e sem banco de capacitores,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  atingem, respectivamente, 0,999, 0 e 0,998 pu. Com a inserção de dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada, os valores atingem 0,909, 0,305 e 0,892 pu, respectivamente. Verifica-se, dessa forma, que a presença dos bancos de capacitores ligados em estrela aterrada influenciam significativamente em  $\alpha_2$ , uma vez que os mesmos causam um defasamento nas tensões nas fases “a” e “b” (ver Figura B.22) no lado carga quando comparado ao caso sem os capacitores onde  $V_a$  e  $V_b$  eram iguais a  $V_c$ , alterando dessa forma  $\alpha_2$ . Por outro lado, os bancos de capacitores influenciam muito pouco em  $\alpha_0$  e  $\Delta V_d$ .

Aumentando-se o valor da resistência de contato dos cabos com a terra para  $8000\ \Omega$ , os valores são praticamente os mesmos encontrados com a resistência de contato de  $80\ \Omega$ , tanto com e sem os bancos de capacitores. Dessa forma, verifica-se que o valor da resistência de contato no lado fonte praticamente não influencia nos níveis de desequilíbrio de tensão nesse caso, partindo-se de um valor o qual caracterize uma falta de alta impedância.

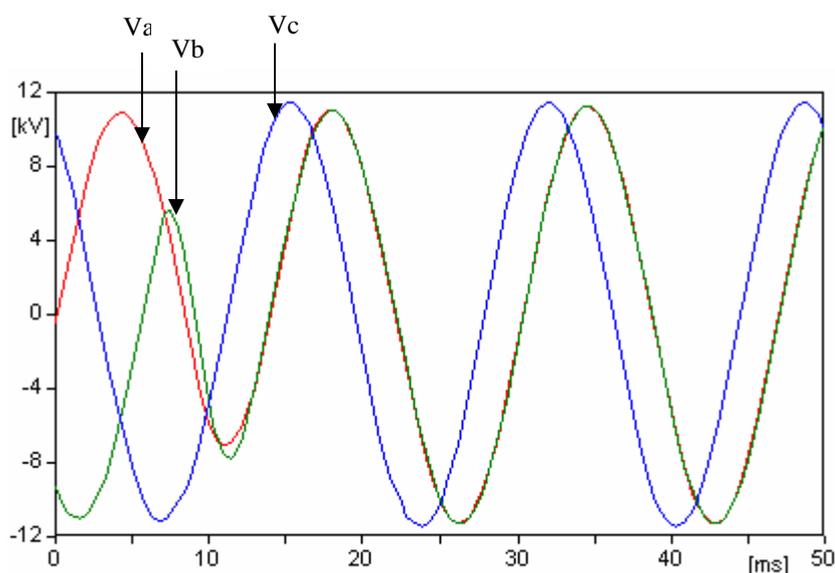


Figura B.22: Gráfico das tensões de fase para abertura bipolar com bancos capacitores (valores em pu - base na tensão fase-neutro de pico)

### B.3.2.3. Abertura das fases “a” e “b” com cabo tocando o solo no lado carga, com e sem banco de capacitores

Com ambos os cabos tocando o solo no lado carga com a resistência de contato com a terra de  $80 \Omega$  e sem banco de capacitores,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  atingem, respectivamente, 0,444, 0,272 e 0,728 pu. Dessa forma, verifica-se que, com corrente circulando nas fases “a” e “b” no lado carga para a terra no ponto de contato dos cabos com o solo, haverá uma alteração das tensões nas fases “a” e “b” no lado carga, com relação a um caso onde não há contato dos cabos com a terra onde  $V_a$  e  $V_b$  eram iguais a  $V_c$ , alterando dessa forma o valor de  $\alpha_2$ .

Com a inserção de dois bancos de capacitores de 600 kVAr cada, os valores de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_2$  e  $\Delta V_d$  atingem 0,909, 0,305 e 0,892 pu, respectivamente. Verifica-se dessa forma, que a presença dos bancos de capacitores ligados em estrela aterrada influenciam significativamente em  $\alpha_2$ , uma vez que os mesmos causam um defasamento nas tensões nas fases “a” e “b” no lado carga quando comparado ao caso sem os capacitores. Os bancos de capacitores criam um caminho para a terra para a corrente de seqüência zero, alterando o valor da tensão de seqüência zero e por conseqüência indireta, na tensão de seqüência negativa. Por outro lado, os bancos de capacitores influenciam muito pouco em  $\Delta V_d$ .

Aumentando-se o valor da resistência de contato dos cabos com a terra para  $8000 \Omega$ , os valores são praticamente os mesmos encontrados com a resistência de contato de  $80 \Omega$ , tanto com e sem os bancos de capacitores. Dessa forma, verifica-se que o valor da resistência de contato no lado fonte praticamente não influencia nos níveis de desequilíbrio de tensão nesse caso, partindo-se de um valor o qual caracterize uma falta de alta impedância.