



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
COORDENAÇÃO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
**FILIFE PINHEIRO VIANÊS**

## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **ESTUDO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Campina Grande

2009

# Trabalho de Conclusão de Curso

## ESTUDO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

*Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado no curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande, como parte dos  
requisitos necessários à obtenção do  
grau de Engenheiro Eletricista.*

ALUNO: Filipe Pinheiro Vianês

PROFESSOR ORIENTADOR: Talvanes Meneses Oliveira

Campina Grande

2009

# TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

## ESTUDO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2009

Banca Examinadora

---

Talvanes Meneses Oliveira

(Professor Orientador)

---

(Professor Convidado)

Campina Grande

2009

Dedico este trabalho as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais, Sr. João Vianês da Silva e Sra. Norleida Maria Pinheiro Vianês. E a todos aqueles que me deram forças e coragem para alcançar este objetivo, em especial meus irmãos Luciana Pinheiro Vianês e Levi Pinheiro Vianês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Campina Grande pela oferta do conhecimento científico por meio dos docentes do curso de Engenharia Elétrica e ao Professor Talvanes Meneses Oliveira, pela orientação, pelo conhecimento passado e pela confiança depositada na aceitação de ser meu orientador neste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus pais João Vianês da Silva e Norleida Maria Pinheiro Vianês, irmãos Luciana Pinheiro Vianês e Levi Pinheiro Vianês, meus tios, em especial a Noguerto Braga Pinheiro, e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

À minha namorada Karolina Celi, pelo carinho, compreensão e companheirismo.

Aos meus amigos da turma de Engenharia pelo acolhimento e companheirismo na vida acadêmica.

## RESUMO

A localização de faltas em Sistema de Distribuição tem sido um tema muito estudado, não só pelo carácter financeiro, devido a perdas, como também devido a acidentes que vitimam seres vivos, muitos conduzindo pessoas a óbito.

Este trabalho explicita então os diversos tipos de faltas encontradas em Sistemas de Distribuição de Energia, como também, alguns métodos de localização já estudados. No que se trata de faltas sólidas pode-se ver os métodos Takagi e Lee *et al*, já para faltas de alta impedância ilustra-se diversas variáveis que estão sendo estudados como parâmetro de detecção de falta.

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVO .....	1
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	2
2.	FALTAS SÓLIDAS .....	123
2.1	TIPOS DE FALTAS SÓLIDAS.....	123
2.1.1	FALTAS FASE-TERRA.....	12
2.1.2	FALTA FASE-FASE .....	15
2.1.3	FALTA FASE-FASE-TERRA.....	16
2.1.4	FALTA TRIFÁSICA.....	17
2.2	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	18
2.2.1	RELÉS DIGITAIS .....	19
2.2.2	MÉTODO TAKAGI .....	19
2.2.3	MÉTODO LEE <i>et al</i> .....	21
3.	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	24
3.1	MÉTODOS DE DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE CORRENTE.....	24
3.1.1	DETECÇÃO POR MONITORES DE AMPLITUDE E ÂNGULO DE FASE DA TERCEIRA HARMÔNICA DE CORRENTE.....	2414
3.1.2	DETECÇÃO DE COMPONENTES DE SEQUÊNCIA NÃO CARACTERÍSTICAS NAS HARMÔNICAS DE CORRENTE .....	25
3.1.3	DETECÇÃO DO FASOR DA CORRENTE DE 3° HARMÔNICO .....	255
3.1.4	DETECÇÃO POR ALGORITMO DE ENERGIA .....	26

3.1.5	DETECÇÃO POR ALGORITMO DE ALEATORIEDADE .....	26
3.1.6	DETECÇÃO POR ANÁLISE ESPECTRAL DE ARCO.....	266
3.1.7	TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE CORRENTE DE FALTA .....	27
3.1.8	DETECÇÃO POR ANÁLISE DO PADRÃO DE CENTELHAMENTO .....	27
3.2	MÉTODOS DE DETECÇÃO POR RESPOSTA AO IMPULSO .....	28
3.3	MÉTODOS DE DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE TENSÃO .....	28
4	CONCLUSÕES .....	31
5	BIBLIOGRAFIA.....	32

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama ilustrativo de uma falta entre uma linha e a terra. ....	3
Figura 2 - Rede de seqüência para falta fase-terra.....	5
Figura 3 - Diagrama ilustrativo de uma falta entre duas linhas (fase b e c) .....	15
Figura 4 - Rede de seqüência para falta fase-fase.....	15
Figura 5 - Diagrama para uma falta entre duas linhas e a terra.....	16
Figura 6 - Rede de seqüência para falta fase-fase-terra.....	17
Figura 7 - Diagrama para uma falta trifásica. ....	17
Figura 8 - Rede de seqüência para falta trifásica.....	18
Figura 9 - Relé de distancia (21), conectados ao sistema através de um TP e um TC....	19
Figura 10 – Princípio da superposição aplicado na análise de uma linha de transmissão sob falta.....	20
Figura 11 - Modelo simplificado de um alimentador de distribuição. ....	21
Figura 12 - Espectro de frequência da corrente de falta de alta impedância.....	27

# 1. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão leva a energia elétrica às subestações abaixadoras, em níveis de dezenas de quilovolts, que por sua vez reduz aos níveis usuais dos sistemas de uso doméstico, cuja denominação usual é Sistema de Distribuição de Energia.

A partir da subestação de distribuição a energia é fornecida por linhas elétricas comumente chamadas de alimentadores. Os alimentadores, em geral, possuem diversas ramificações para melhor atender aos consumidores, sejam eles próximos ou distantes fisicamente da subestação. As ramificações no interior de um sistema de distribuição podem ser trifásicas, bifásicas ou monofásicas, a depender da carga a ser suprida. Todavia, no ponto extremo do ramo, já quando se aproxima do consumidor, existem os transformadores abaixadores que reduzem os níveis de tensão dos ramos para valores usuais: 110 ou 220 V.

Em Sistemas de Distribuição de Energia, os alimentadores são constituídos, normalmente, de cabos de alumínio não isolados, o que aumenta a probabilidade de falha e acidentes. Em caso de falha, o equipamento de proteção pode ou não atuar. Quando a corrente de falta é significativamente intensa, chamada de sobrecorrente, o sistema de proteção atua retirando o alimentador, ou parte dele, do sistema. Neste caso a falta pode ser franca ou através de uma impedância. Porém, há casos em que as falhas não são percebidas pelos aparelhos de proteção, estas chamadas de Falhas de Alta Impedância.

## 1.1 OBJETIVO

O trabalho proposto tem como objetivo o detalhamento dos tipos de falta existentes num Sistema de Distribuição de Energia. Por conseqüência, alguns métodos de localização de falta estudados recentemente, tanto de alta como de baixa impedância, serão apresentados.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na seqüência desta introdução, será apresentada no *Capítulo 2* uma revisão das Faltas Sólidas e alguns métodos de localização já propostos. No *Capítulo 3* dar-se-á ênfase as Faltas de Alta Impedância, apresentando, também, a metodologia de localização. Finalmente, as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros serão realizadas no *Capítulo 4*.

## 2. FALTAS SÓLIDAS

Quando ocorre uma falta em uma linha de distribuição de energia, é necessário que sua localização seja realizada no mais curto período de tempo possível. Uma estimativa de localização facilita a reparação da falha pela equipe de manutenção das concessionárias de energia, evitando assim multas e outros prejuízos. Sendo assim, foram desenvolvidos métodos de localização de faltas, utilizando como parâmetros tensão e corrente medidas a jusante do ponto de falta.

### 2.1 TIPOS DE FALTAS SÓLIDAS

#### 2.1.1 FALTAS FASE-TERRA

Considere uma falta sólida entre uma fase e a terra como ilustrado na Figura 1:

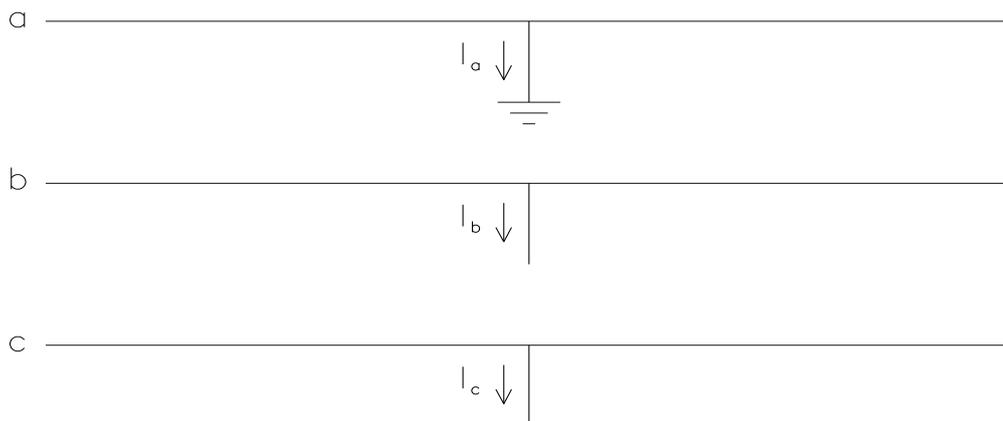


Figura 1 - Diagrama ilustrativo de uma falta entre uma linha e a terra.

Em que:

$I_a, I_b$  e  $I_c \rightarrow$  são as correntes por fase;

$V_a, V_b$  e  $V_c \rightarrow$  são as tensões de fase;

As relações a serem desenvolvidas para esse tipo de falta serão aplicáveis a qualquer outra fase, uma vez que as fases recebem uma designação arbitrária e qualquer uma pode ser a *fase a*. Assim, as condições de corrente e tensão são:

$$I_b = 0 \qquad I_c = 0 \qquad V_a = 0$$

O teorema de Fortescue pode ser usado para decompor os fasores assimétricos das faltas em componentes simétricos. Estes componentes são:

- 1) Componentes de sequência positiva, consistindo de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo a mesma sequência de fases que os fasores originais.
- 2) Componentes de sequência negativa, consistindo de três fasores iguais em módulo defasados de 120° entre si e tendo a sequência de fases oposta à dos fasores originais.
- 3) Componentes de sequência zero, consistindo de três fasores iguais em módulo e com defasagem zero entre si.

Os três conjuntos de componentes simétricos recebem os seguintes índices: 1 para componentes de sequência positiva; 2 para componentes de sequência negativa e 0 para componentes de sequência 0. Assim, cada um dos fasores do conjunto desequilibrado original é igual a soma de seus componentes. Os componentes para tensão e corrente em um circuito trifásico são:

#### Tensões

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \qquad (2.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \qquad (2.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \qquad (2.3)$$

#### Correntes

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \qquad (2.4)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \qquad (2.5)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (2.6)$$

Os circuitos de seqüência para este tipo de falta podem ser visto na Figura 2.

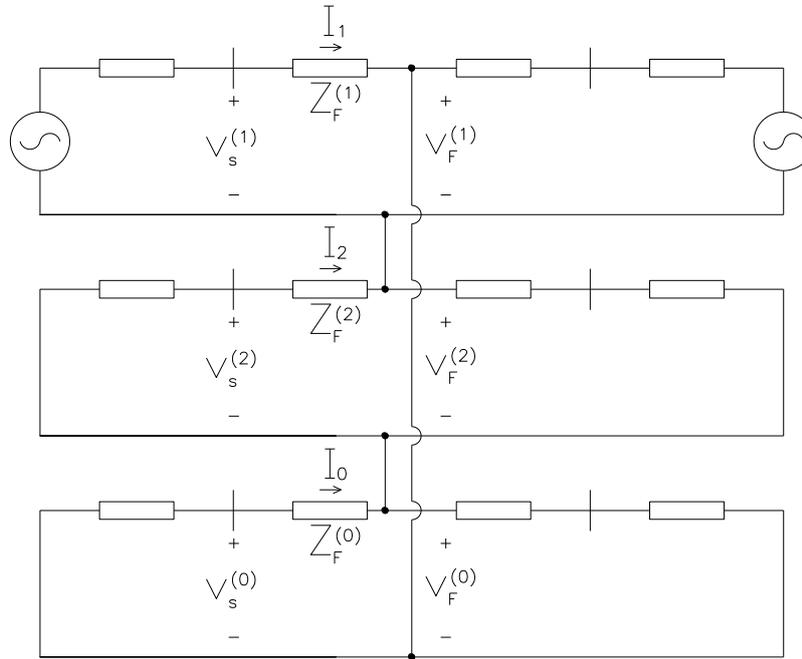


Figura 2-Rede de seqüência para falta fase-terra.

Onde:

$V_s \rightarrow$  é a tensão no local de medição.

$Z_F \rightarrow$  é a impedância da linha até o ponto da falta.

$V_F \rightarrow$  é a tensão no instante da falta.

E as equações em componentes simétricos, segundo STEVENSON[6], são:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (2.7)$$

$$I_{a1} = \frac{V_s}{Z_F^{(1)} + Z_F^{(2)} + Z_F^{(0)}} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 FALTA FASE-FASE

A falta entre duas fases pode ser representada como na Figura 3 abaixo:

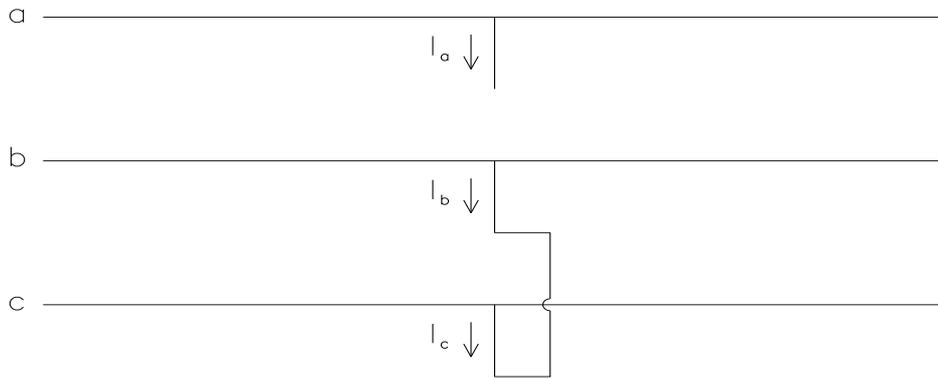


Figura 3 - Diagrama ilustrativo de uma falta entre duas linhas (fase b e c)

A condições na falta são expressas pelas seguintes equações:

$$V_b = V_c \qquad I_a = 0 \qquad I_b = -I_c$$

Os circuitos de seqüência são ilustrados na Figura 4:

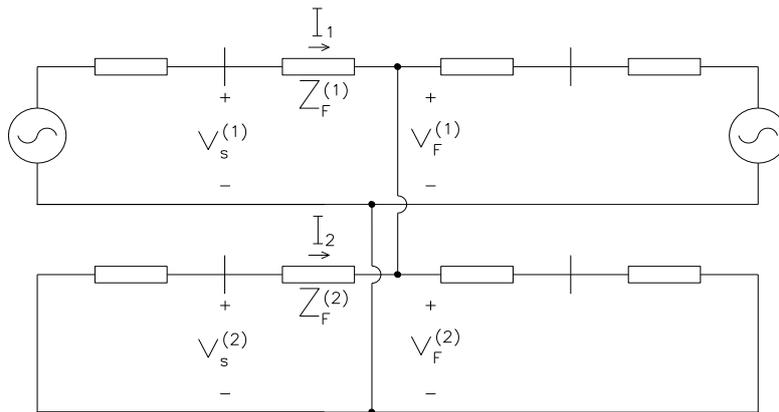


Figura 4 - Rede de seqüência para falta fase-fase.

E as equações em componentes simétricos são:

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (2.9)$$

$$I_{a1} = \frac{V_S}{Z_F^{(1)} + Z_F^{(2)}} \quad (2.10)$$

### 2.1.3 FALTA FASE-FASE-TERRA

A falta fase-fase-terra é ilustrada na Figura 5.

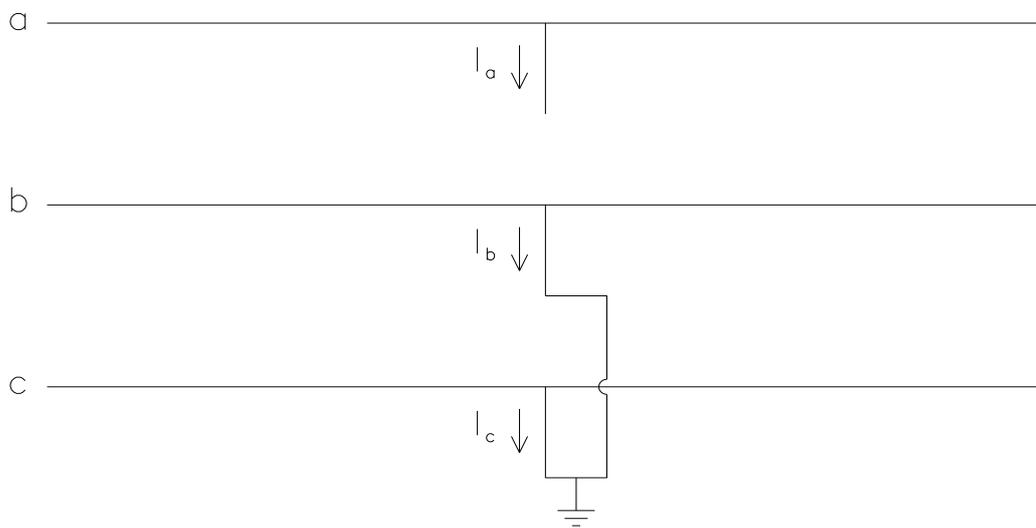


Figura 5 - Diagrama para uma falta entre duas linhas e a terra.

Pode-se, portanto, se escrever as seguintes relações:

$$V_b = V_c = 0 \quad I_a = 0$$

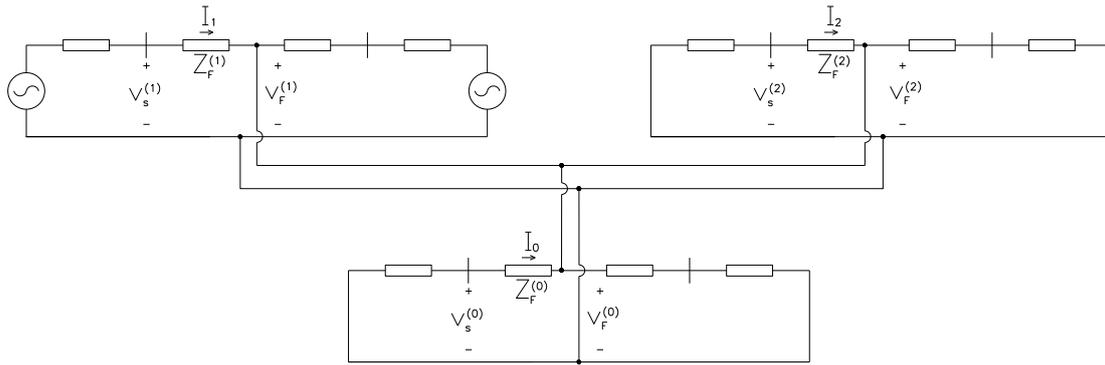


Figura 6 - Rede de seqüência para falta fase-fase-terra.

Tendo como equações em componentes simétricos:

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (2.11)$$

$$I_{a1} = \frac{V_S}{Z_F^{(1)} + \frac{Z_F^{(2)} \cdot Z_F^{(0)}}{Z_F^{(2)} + Z_F^{(0)}}} \quad (2.12)$$

#### 2.1.4 FALTA TRIFÁSICA

A falta trifásica é ilustrada na Figura7.

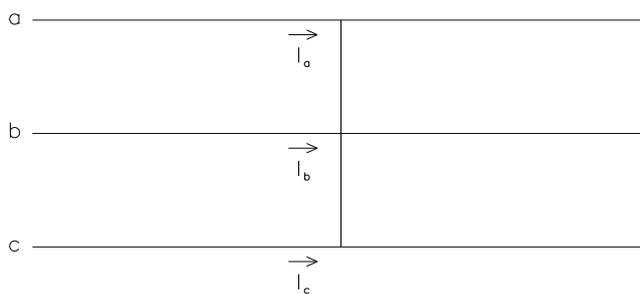


Figura 7 - Diagrama para uma falta trifásica.

E tem-se as seguintes relações:

$$V_a = V_b = V_c$$

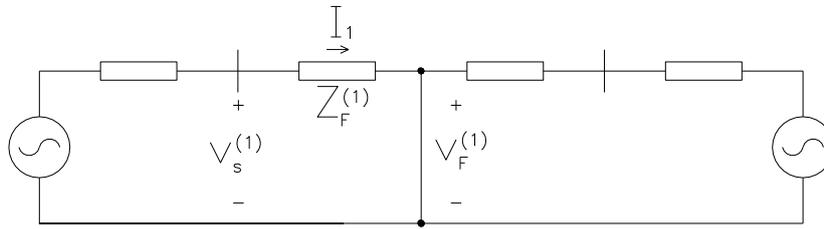


Figura 8 - Rede de seqüência para falta trifásica.

Então temos a seguinte equação em componentes simétricos:

$$I_{a1} = \frac{V_S}{Z_F^{(1)}} \quad (2.13)$$

## 2.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A interrupção no fornecimento de energia devido a ocorrência de uma falta no sistema de distribuição causa prejuízo na arrecadação assim como nos gastos para a concessionária de energia, além de desconforto da falta para o usuário e o risco de morte se ele é parte envolvida na falta. A rápida localização do ponto de falta é vantajosa para ambas as partes. Para isso, é necessário se ter uma estimativa de onde ocorreu a interrupção, evitando que a equipe de manutenção verifique toda a linha de distribuição.

Uma solução proposta seria a medição de tensão e corrente no momento da falta e o processamento com relés digitais. Sabendo-se a impedância por unidade de comprimento da linha se torna simples determinar a impedância até a falta. Todavia, nos sistemas de distribuição, o número de ramais e os distúrbios transitórios causados pela entrada em operação de equipamentos no sistema, impossibilita de alguma forma o uso confiável desta proposta.

### 2.2.1 RELÉS DIGITAIS

Os relés de distribuição microprocessados melhoram significativamente a proteção da distribuição e reduzem os custos de capital operacional e de manutenção. Estes relés possibilitam também que a aquisição de informações e ajustes sejam feitos remotamente, através de canais de comunicação. O relé digital de distribuição é alimentado por duas grandezas de entrada, tensão (V) e corrente (I), amostradas por TPs e TCs conectados ao sistema elétrico.

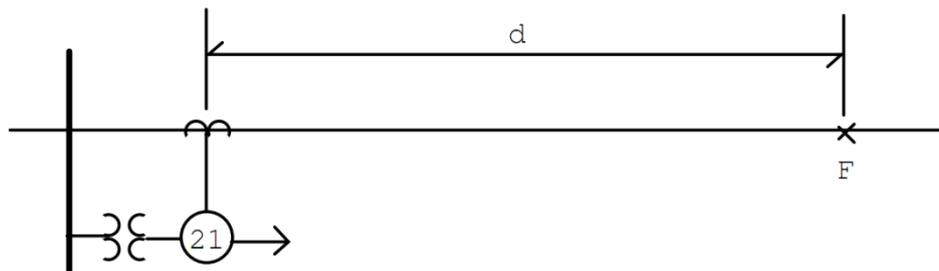


Figura 9 - Relé de distância (21), conectados ao sistema através de um TP e um TC.

### 2.2.2 MÉTODO TAKAGI

Considere uma linha com falta trifásica modelada através do princípio da superposição conforme a Figura 10.

Em que:

$V_s$  é a tensão no local de medição.

$V_F$  é a tensão no instante da falta.

$I_F$  é a corrente de falta.

$I_{FS}$  é a contribuição de corrente da fonte para a falta.

$I_{FR}$  é a contribuição de corrente da carga para a falta.

$R_F$  é a resistência da falta.

$Z_{SF}$  é a impedância da linha a jusante da falta.

$Z_{RF}$  é a impedância da linha entre a falta e a carga.

$\gamma$  é a constante de propagação da linha.

$Z_C$  é a impedância característica da linha.

A tensão de pós falta no ponto F é dada por

$$V_F = R_F I_F. \quad (2.14)$$

Como

$$I_F = 0 + I_F'' = -(I_{FS}'' + I_{FR}''), \quad (2.15)$$

e assim

$$V_F = -R_F (I_{FS}'' + I_{FR}''), \quad (2.16)$$

é possível definir a razão

$$K(d) = \frac{I_{FR}''}{I_{FS}''}. \quad (2.17)$$

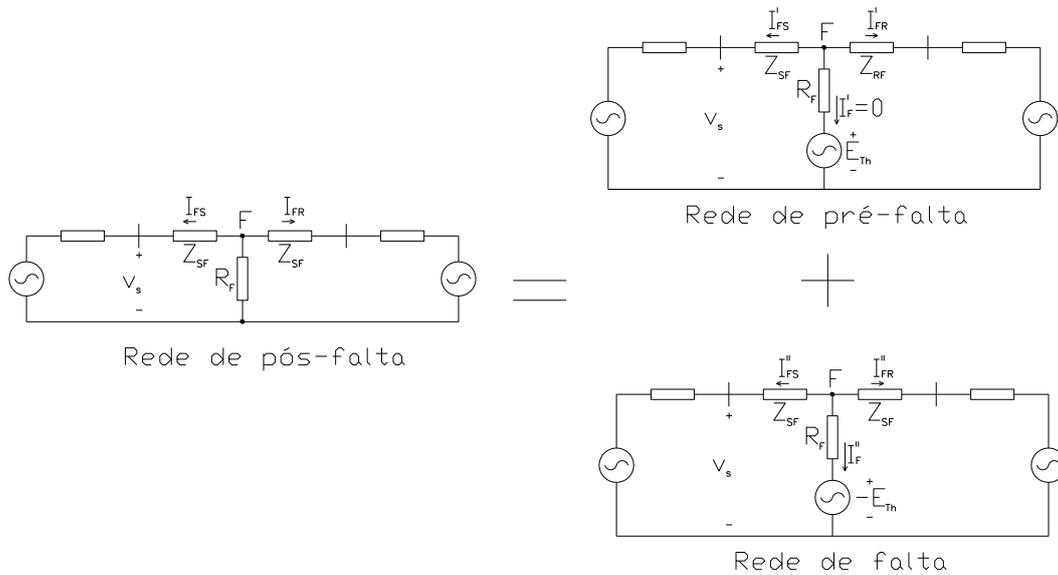


Figura 10 – Princípio da superposição aplicado na análise de uma linha de transmissão sob falta.

Fazendo as devidas manipulações matemáticas obtém-se:

$$R_F [1 + K(d)] = -\frac{V_F}{I_{FS}''} \quad (2.18)$$

Considerando que a linha não tem perdas e que a impedância da fonte é puramente indutiva, o que torna  $K(d)$  puramente real. Logo,

$$\text{Im}\left\{\frac{V_F}{I_{FS}''}\right\} = \text{Im}\left\{\frac{AV_S + BI_S}{CV_S'' - DI_S''}\right\} = 0 \quad (2.19)$$

em que  $A = D = \cosh\gamma d$ ,  $B = Z_c \sinh\gamma d$ ,  $C = \sinh\gamma d / Z_c$  (quadripolo).

Nota-se que a equação 2.17 é não linear, então temos que a solução  $d$  é obtida via método numérico. O Método Takagi é bastante utilizado em Linhas de Transmissão, porém, não se mostra muito eficiente para o Sistema de Distribuição de Energia (SDE), pois, quanto mais próximo do local de medição for a falta, maior é o erro no algoritmo devido as considerações sobre a linha e a impedância da fonte.

### 2.2.3 MÉTODO LEE *et al*

O método descrito anteriormente, como foi dito, considera que as linhas são homogêneas, ou seja, é constituída de apenas um condutor. Além disso, também não considera que o alimentador possui ramificações ao longo de sua extensão. Estas simplificações fazem com que o método não apresente bons resultados para os SDEs. Proposto recentemente, o Método Lee *et al*, pode ser usado para SDEs, posto que leva em conta as características de tais sistemas.

Considere uma falta fase-terra conforme ilustrado na Figura 11:

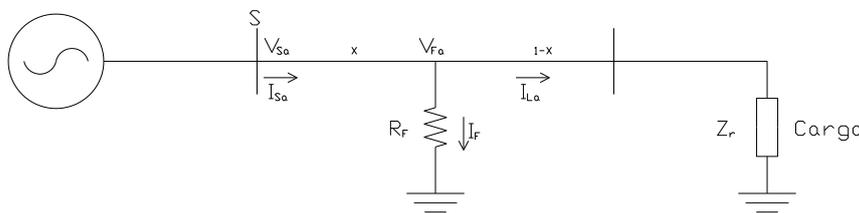


Figura 11 - Modelo simplificado de um alimentador de distribuição.

Em que:

$V_{Sa}$  é o fasor de tensão da fase  $a$  no terminal local S;

$I_{Sa}$  é o fasor de corrente da fase  $a$  no terminal local S;

$V_{Fa}$  é o fasor de tensão da fase  $a$  no ponto da falta;

$I_{La}$  é o fasor de corrente na carga na fase  $a$ ;

$Z_r$  é a matriz de impedância equivalente da carga;

$Z_{La}$  é a impedância da linha na fase  $a$ ;

$I_F$  é a corrente de falta;

$R_F$  é a resistência de falta;

$x$  é a distância da falta em relação ao terminal local;

A tensão no ponto S é dada por:

$$V_{Sa} = x \cdot (Z_{La} \cdot I_{Sa}) + I_F \cdot R_F \quad (2.20)$$

A manipulação algébrica da equação 2.18 permite chegar a

$$I_F \cdot I_F^* \cdot R_F = (-x \cdot Z_{La} \cdot I_{Sa} + V_{Sa}) \cdot I_F^* \quad (2.21)$$

Como o resultado do produto  $(I_F, I_F^*, R_F)$  é um número real, a utilização da parte imaginária de ambos os lados da igualdade permite eliminar  $R_F$  e chegar a uma expressão para  $x$ :

$$x = \frac{\text{Im} \{ I_{Sa} \cdot I_F^* \}}{\text{Im} \{ Z_{La} \cdot I_{Sa} \cdot I_F^* \}}, \quad (2.22)$$

em que,

$$I_F = I_{Sa} - I_{La} \quad (2.23)$$

Então Lee *et al* propuseram uma técnica iterativa para estimar o local da falta composta pelas etapas descritas a seguir:

1. Assume-se  $I_{La}$  como sendo o valor da corrente de carga pré-falta;
2. Calcula-se a corrente de falta  $I_F$  utilizando (2.21);
3. Determina-se a primeira estimativa de localização da falta utilizando (2.20);
4. Calcula-se a tensão no ponto da falta utilizando

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{La} \cdot I_{Sa} \\ Z_{Lb} \cdot I_{Sb} \\ Z_{Lc} \cdot I_{Sc} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

5. Utiliza-se a tensão de falta para obter um valor de  $I_{La}$  atualizado;
6. Volta-se ao passo 2 com um novo valor de  $I_F$  e o processo é repetido até que  $x$  convirja para um certo valor.

### **3. FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA**

Pode-se definir uma Falta de Alta Impedância (FAI) como aquela que não pode ser detectada pelos sistemas de proteção convencionais de sobrecorrente [MORETO, 2005]. O risco físico e material deste tipo de falta é muito elevado, pois, na maioria dos casos, ocorrem devido ao contato com árvores ou quando ocorre o rompimento do cabo.

As características que contribuem para a dificuldade na detecção são:

- 1) A contribuição das FAI's para a corrente e tensão é muito pequena.
- 2) O desequilíbrio natural do sistema não possibilita a detecção por corrente de neutro.
- 3) Em geral a corrente de falta diminui com o tempo para uma FAI.
- 4) Não há parâmetro que possa ser utilizado com segurança para detecção de uma FAI.

O interesse das concessionárias tem motivado os estudos recentes sobre o tema. Alguns métodos já apresentam soluções com boa confiabilidade de detecção, estes podem ser divididos conforme a grandeza monitorada: corrente, tensão ou tempo de propagação de pulsos aplicados ao alimentador.

#### **3.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE CORRENTE**

Os métodos de detecção por monitoramento de corrente são baseados desde na análise de componente de sequência e harmônicos até na análise do espectro de alta frequência. A seguir serão apresentados os diversos métodos de detecção e suas características.

##### **3.1.1 DETECÇÃO POR MONITORES DE AMPLITUDE E ÂNGULO DE FASE DA TERCEIRA HARMÔNICA DE CORRENTE**

O elevado valor de 3º harmônico na corrente sob uma FAI é devido ao comportamento não-linear da corrente de arco elétrico, geralmente presente neste tipo de fal-

ta. O súbito deslocamento de fase da componente de 3° harmônico da corrente de uma das fases em relação às outras duas é um dos indicadores da ocorrência de uma FAI. Os critérios para utilização destes parâmetros são:

- Deslocamento mínimo de 15° da componente de 3° harmônico da corrente de uma fase com relação às correntes de 3° 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 por, no mínimo, 5 segundos.

### 3.1.2 DETECÇÃO DE COMPONENTES DE SEQUÊNCIA NÃO CARACTERÍSTICAS NAS HARMÔNICAS DE CORRENTE

Quando um sistema está equilibrado cada componente de sequência das frequências harmônicas, com valores diferente de zero, são chamados de componentes característicos. Temos então que os componentes característicos para o 1°, 3° e 5° são os componentes de sequência positiva, zero e negativa respectivamente. A tabela 1 apresenta um resumo desta denominação.

Tabela 1 – Componentes Característicos e Não característicos

Harmônico	Componentes de Sequência		
	Positiva	Negativa	Zero
1	Característico	Não característico	Não característico
3	Não característico	Não característico	Característico
5	Não característico	Característico	Não característico

Alguns pesquisadores passaram a considerar como indicador de uma FAI as componentes de sequência não características das harmônicas de 1°, 3° e 5° ordens.

### 3.1.3 DETECÇÃO DO FASOR DA CORRENTE DE 3° HARMÔNICO

O ângulo de fase da corrente de falta de 3° harmônico com relação à tensão fundamental pode ser considerado como indicador de condutor caído ao solo. Como existe neste tipo de falta a ocorrência de um arco e este está relacionado com a tensão do

sistema, verificou-se que o ângulo da componente de 3° harmônico da corrente de falta é o mesmo que o ângulo de tensão de fase. Então define-se os critérios para este indicador como:

- O ângulo do fasor resultante da corrente de 3° 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.

#### **3.1.4 DETECÇÃO POR ALGORITMO DE ENERGIA**

A detecção de uma FAI também pode ser feita analisando os componentes de alta frequência das correntes de falta. Pesquisadores observaram que havia um aumento significativo de correntes de alta frequência, devido à característica não linear da falta na presença de arco. Naturalmente existe uma variação natural nos componentes de alta frequência do sistema, porém com tempo limitado a poucos ciclos. Dessa forma, o tempo é um fator importante para este método de detecção.

#### **3.1.5 DETECÇÃO POR ALGORITMO DE ALEATORIEDADE**

Durante a existência de um arco, a magnitude de corrente varia muito de um ciclo para outro, este fenômeno tem dificultado a boa exatidão de alguns algoritmos. Porém, este comportamento aleatório foi estudado e pode ser usado como indicador de um condutor caído ao solo com arco.

#### **3.1.6 DETECÇÃO POR ANÁLISE ESPECTRAL DE ARCO**

O espectro no domínio da frequência de um arco pode ser ilustrado como na figura 12. Enquanto o ruído apresentado neste tipo de falta apresenta um amortecimento da característica de uma distribuição de frequência, certas cargas do sistema podem apresentar vasta banda de ruído, porém o ruído é repetitivo a cada ciclo, o que causa certas frequências discretas.

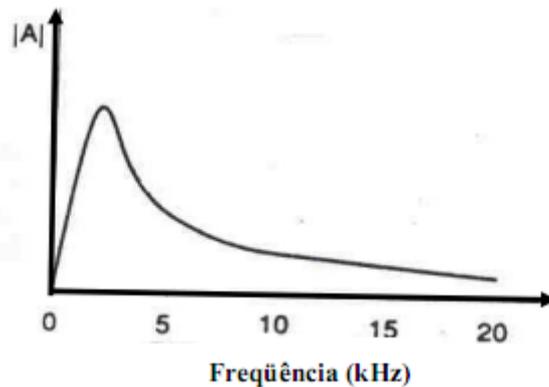


Figura 12 - Espectro de frequência da corrente de falta de alta impedância.

### 3.1.7 TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE CORRENTE DE FALTA

Existem duas técnicas para extração da corrente de falta da corrente total da linha, baseadas em amostras ponto a ponto.

- 1) Subtrair ponto-a-ponto amostra de um ciclo de seu anterior. Caso esta diferença seja grande e se continua a variar até certo limite de tempo a falta é detectada.
- 2) De modo similar ao primeiro, verifica-se o espectro de frequência do sinal de corrente a cada momento. Calcula-se então a diferença do espectro de um ciclo para outro, caso haja uma grande discrepância entre estes sinais, a falta é indicada.

### 3.1.8 DETECÇÃO POR ANÁLISE DO PADRÃO DE CENTELHAMENTO

Quando ocorre uma FAI com um condutor caído ao solo, a corrente se estabelece quando a tensão do *gap* de ar entre o condutor e a terra atinge um valor que proporciona a ruptura, e se mantém até que a tensão no ponto de falta não consiga manter o fluxo de portadores de cargas através do *gap*, valor esse próximo à passagem por zero. Se esse fenômeno é repetido nos próximos semiciclos de onda de tensão, então este também pode ser usado como indicador de uma FAI.

### 3.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO POR RESPOSTA AO IMPULSO

A partir do princípio de reflexão e refração contidas na teoria de ondas viajantes foi desenvolvido um método de detecção de FAI. Uma excitação de uma fonte impulsiva é aplicada a um alimentador e a resposta analisada no domínio do tempo e da frequência. A partir da resposta no domínio da frequência detecta-se a falta e no domínio do tempo obtém-se a informação à respeito do tipo de falta e da distância até o ponto de inserção da onda.

O método consiste em encontrar a função transferência do sistema do alimentador e as respectivas alterações que ocorrem nesta função quando ocorre uma mudança natural no sistema. Por exemplo, quando ocorre a abertura ou fechamento de uma chave que é um evento previsível, pois a localização da chave é conhecida. Então, pode-se criar um banco de dados com as respostas esperadas e comparar a resposta encontrada com as armazenadas neste banco.

Para isolar o sistema a ser estudado deve-se obedecer as seguintes etapas:

- Instalar filtros passa-baixa nos bancos de capacitores para permitir a detecção de faltas à jusante deste equipamento, e entre o ponto de injeção e a barra da subestação.
- Inserir um filtro passa-alta entre a fonte impulsiva e o ponto de injeção.

### 3.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO POR MONITORAMENTO DE TENSÃO

É possível detectar condutores rompidos através do monitoramento de desequilíbrio de tensão visto do lado da fonte. Um fator motivador deste método é que percentualmente os valores de tensão variam mais que os valores de corrente quando ocorre uma FAI. Quando um condutor se rompe ocorre um desequilíbrio, e este pode ser detectado através do monitoramento de seus componentes de sequência negativa ou zero.

Uma pesquisa desse método foi realizada por MALAGODI[4] e um levantamento estatístico foi feito sobre FAI's com rompimento de condutores junto a duas concessio-

nárias brasileiras de energia elétrica: Eletricidade de São Paulo S.A (ELETROPAULO) e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

Foram definidas as seguintes grandezas para quantificar o desequilíbrio:

$$G2 = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (3.1)$$

e

$$G0 = \frac{|V_0|}{|V_1|} \quad (3.2)$$

em que,

$V_2$  é a componente de sequência negativa de tensão.

$V_1$  é a componente de sequência positiva de tensão.

$V_0$  é a componente de sequência zero de tensão.

Os resultados obtidos foram:

- O percentual de sequência negativa, bem como de sequência zero, nas tensões de fase estão na faixa de 50 a 100% para um rompimento de uma das fases do alimentador.
- Com o rompimento de 2 condutores apenas os componentes de sequência negativa e zero compõem as tensões de fase e estes são iguais.
- Quando ocorre a rompimento e a queda ao solo do lado da fonte, somente a componente de sequência zero existirá.
- Em casos normais de operação, os componentes de sequência negativa e zero, representam 5% do sinal, o que ocorre quando existem cargas muito desequilibradas no sistema.

Então MALAGODI[4] teve como conclusão em seu trabalho que o monitoramento de sequência zero permite uma precisa e confiável forma de detectar condutores par-

tidos das redes primárias de distribuição. O grande desafio desse método é a confiabilidade ou distinção entre um rompimento de cabo com impedância e uma abertura monopolar de um equipamento de proteção.

## 4 CONCLUSÕES

No estudo realizado identificou-se que devido aos fatores econômicos e sociais, as referidas faltas no Sistema de Distribuição serão continuamente abordadas como um tema de grande interesse para as concessionárias de energia. As perdas no alimentador quando este sai de operação ou quando ocorre uma FAI, são consideradas como fatores econômicos que motivam a maior eficiência do sistema de proteção. Bem como, as perdas fatais de seres vivos geram uma imagem degradada da concessionária.

Para faltas sólidas as alterações na configuração do sistema de distribuição representam as maiores dificuldades de estabelecer um método de detecção confiável. O grande acréscimo de cargas não lineares dificulta a escolha dos parâmetros para estabelecer um método confiável para uma detecção segura de uma FAI.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- [1] **MORETO, Miguel.** Localização de Falta de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia: Uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais.. Porto Alegre, 2005.
- [2] **OLIVEIRA, Dilzair Alvimar de.** 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, Maio de 2006.
- [3] **PENTEADO, Renato de Arruda.** Sistemas para Detecção de Falta de Alta Impedância e de Rompimento de Condutores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Curitiba, 2005.
- [4] **MALAGODI, C. V. S.** Sistema de Proteção para detecção de Faltas de Alta Impância. Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1997.
- [5] **MAMEDE FILHO J.** *Instalações Elétricas Industriais.* LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 7ª Edição.
- [6] **STEVENSON JR. W. D. AND GRAINGER, J. J.** Elementos de Análise de Sistemas de Potência, 5ª edição, Ed. McGraw-Hill Inc. NY, USA, 1994.