GIOVANNI MANASSERO JUNIOR

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA
REDES PRIMÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia

São Paulo

2001

GIOVANNI MANASSERO JUNIOR

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA
REDES PRIMÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Eduardo Cesar Senger

São Paulo

2001

Manassero Junior, Giovanni
Sistema de localização de faltas
para redes primárias de distribuição.
São Paulo, 2001
105p.

Dissertação (Mestrado) - Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de
Energia e Automação Elétricas.

1. Automação da distribuição. 2.
Localização de faltas. I. Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Energia
e Automação Elétricas II.t

Dedico esse trabalho aos meus
pais, pelo incentivo, carinho e
paciência.

Dedico também à Marta, Waldo, Rô e
Nonna.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Eduardo Cesar Senger pelo apoio e estímulo durante a execução do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro que possibilitou a sua conclusão.

A todos os professores do PEA que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento do mesmo.

Aos colegas Geraldo e Eduardo pelo constante incentivo e apoio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
.1.1 Introdução.....	1
.1.2 Objetivos.....	4
.1.3 Apresentação do trabalho.....	5
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
.2.1 Metodologias de localização de faltas.....	8
.2.2 Método baseado nas componentes simétricas.....	10
.2.3 Método baseado em lógica fuzzy.....	12
.2.4 Método baseado no equacionamento trifásico.....	14
.2.5 Precisão da localização de faltas.....	16
3. SISTEMA AUTOMATIZADO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	18
.3.1 Infra-estrutura instalada nas subestações.....	19
.3.1.1 Infra-estrutura de hardware.....	19
.3.1.2 Infra-estrutura de software.....	24
.3.2 Infra-estrutura instalada no COD.....	27
.3.2.1 Infra-estrutura de hardware.....	27
.3.2.2 Infra-estrutura de software.....	28
.3.3 Fluxo de dados do sistema de localização de faltas.....	32
4. O ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	34
.4.1 Descrição do algoritmo.....	35
.4.1.1 Equacionamento para o curto-circuito fase-terra....	36
.4.1.2 Cálculo das tensões e correntes.....	39
.4.2 Equacionamento das cargas.....	40
.4.2.1 Cálculo das correntes de carga.....	42
.4.2.2 Correção das correntes de carga.....	43
.4.3 Modelamento do tipos de curto-circuito.....	46
5. SIMULAÇÃO DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO.....	49
6. RESULTADOS.....	52

.6.1 Casos simulados no ATP.....	52
.6.1.1 Curto-circuito fase-terra na barra 17.....	53
.6.1.2 Curto-circuito dupla-fase na barra 57.....	58
.6.1.3 Curto-circuito trifásico na barra 158.....	63
.6.2 Curto-circuito no alimentador 106 da SE Butantã.....	68
.6.3 Curto-circuito no alimentador 108 da SE Butantã.....	74
.6.4 Análise dos resultados.....	81
7. CONCLUSÃO.....	88
ANEXO A: EQUACIONAMENTO DOS MODELOS DE CURTO-CIRCUITO.....	89
ANEXO B: ARQUIVO DE SIMULAÇÃO DO ATP.....	103
BIBLIOGRAFIA.....	105

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1.1: BENEFÍCIOS DO SISTEMA.....	3
FIG. 2.2: SISTEMA PROPOSTO NA REFERÊNCIA [4].....	10
FIG. 2.3: SISTEMA PROPOSTO NA REFERÊNCIA [5].....	12
FIG. 2.4: SISTEMA PROPOSTO NA REFERÊNCIA [6].....	14
FIG. 3.5: SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	19
FIG. 3.6: INFRA-ESTRUTURA DO SISTEMA NAS SUBESTAÇÕES.....	20
FIG. 3.7: CICLO DE ABERTURA/RELIGAMENTO.....	22
FIG. 3.8: INFRA-ESTRUTURA DO SISTEMA NO COD.....	28
FIG. 3.9: TELA INICIAL DA INTERFACE HOMEM-MÁQUINA.....	31
FIG. 3.10: TELA DE RESULTADOS DA INTERFACE HOMEM-MÁQUINA.....	31
FIG. 3.11: FLUXO DE DADOS.....	33
FIG. 4.12: ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO.....	35
FIG. 4.13: CURTO-CIRCUITO FASE A - TERRA.....	37
FIG. 4.14: ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO.....	39
FIG. 4.15: MODELAMENTO DOS TIPOS DE CURTO-CIRCUITO.....	48
FIG. 5.16: REDE UTILIZADA PARA SIMULAÇÃO DO ALGORITMO.....	49
FIG. 6.17: CORRENTES DE LINHA PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 17....	55
FIG. 6.18: TENSÕES DE FASE PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 17....	56
FIG. 6.19: PONTOS LOCALIZADOS PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 17....	57
FIG. 6.20: CORRENTES DE LINHA PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 57....	60
FIG. 6.21: TENSÕES DE FASE PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 57....	61
FIG. 6.22: PONTOS LOCALIZADOS PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 57....	62
FIG. 6.23: CORRENTES DE LINHA PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 158...	65
FIG. 6.24: TENSÃO DE FASE PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 158....	66
FIG. 6.25: PONTOS LOCALIZADOS PARA A SIMULAÇÃO NA BARRA 158...	67
FIG. 6.26: WAVEFORM DAS CORRENTES - BUTANTÃ 106.....	69
FIG. 6.27: HIGH-SPEED DAS CORRENTES - BUTANTÃ 106.....	70
FIG. 6.28: HIGH-SPEED DAS CORRENTES (REGIÃO I) - BUTANTÃ 106..	71
FIG. 6.29: WAVEFORM DAS TENSÕES - BUTANTÃ 106.....	72
FIG. 6.30: PONTOS LOCALIZADOS NO ALIMENTADOR 106 - BUTANTÃ....	73
FIG. 6.31: WAVEFORM DAS CORRENTES - BUTANTÃ 108.....	75
FIG. 6.32: HIGH-SPEED DAS CORRENTES - BUTANTÃ 108.....	76
FIG. 6.33: HIGH-SPEED DAS CORRENTES (REGIÃO I) - BUTANTÃ 108..	77
FIG. 6.34: HIGH-SPEED DAS CORRENTES (REGIÃO II) - BUTANTÃ 108.	78

FIG. 6.35: WAVEFORM DAS TENSÕES - BUTANTÃ 108.....	79
FIG. 6.36: PONTOS LOCALIZADOS NO ALIMENTADOR 108 - BUTANTÃ....	80
FIG. 6.37: ERRO NA DCALCULADA [M] PARA O CURTO-CIRCUITO AN....	82
FIG. 6.38: ERRO NA DCALCULADA [M] PARA O CURTO-CIRCUITO BC....	82
FIG. 6.39: ERRO NA DCALCULADA [M] PARA O CURTO-CIRCUITO BCN....	83
FIG. 6.40: ERRO NA DCALCULADA [M] PARA O CURTO-CIRCUITO ABC....	83
FIG. 6.41: ERRO NA DCALCULADA [M] PARA O CURTO-CIRCUITO ABCN....	84
FIG. 6.42: ERRO NA DCALCULADA [M] X VARIAÇÃO DE RF - BARRA 57.	85
FIG. 6.43: ERRO NA DCALCULADA [%] X VARIAÇÃO DE RF - BARRA 57.	86
FIG. 6.44: ERRO NA DCALCULADA [M] X VARIAÇÃO DE RF - BARRA 106	86
FIG. 6.45: ERRO NA DCALCULADA [%] X VARIAÇÃO DE RF - BARRA 106	87
FIG. A.46: CURTO-CIRCUITO DUPLA-FASE BC.....	89
FIG. A.47: CURTO-CIRCUITO DUPLA-FASE-TERRA (BCN).....	92
FIG. A.48: CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.....	94
FIG. A.49: CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA.....	99

LISTA DE TABELAS

TAB. 4.1: CORRENTES NOMINAIS DOS TRANSFORMADORES.....	43
TAB. 5.2: CASOS DE SIMULAÇÃO DO ATP.....	51
TAB. 6.3: FASORES DE PRÉ-FALTA.....	54
TAB. 6.4: FASORES DE FALTA.....	54
TAB. 6.5: RESISTÊNCIA DE FALTA.....	55
TAB. 6.6: FASORES DE PRÉ-FALTA.....	58
TAB. 6.7: FASORES DE FALTA.....	59
TAB. 6.8: RESISTÊNCIA DE FALTA.....	59
TAB. 6.9: FASORES DE PRÉ-FALTA.....	63
TAB. 6.10: FASORES DE FALTA.....	64
TAB. 6.11: RESISTÊNCIA DE FALTA.....	64
TAB. 6.12: FASORES CALCULADOS.....	68
TAB. 6.13: RESISTÊNCIA DE FALTA CALCULADA.....	68
TAB. 6.14: FASORES CALCULADOS.....	74
TAB. 6.15: RESISTÊNCIA DE FALTA CALCULADA.....	74
TAB. 6.16: CASOS DE SIMULAÇÃO DO ATP.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$V_{AN}^K, V_{BN}^K, V_{CN}^K$	Fasores das tensões de fase na barra k do alimentador.	[V]
$V_{AN}', V_{BN}', V_{CN}'$	Fasores das tensões de fase no ponto de defeito.	[V]
z_{AB}, z_{AC} z_{BA}, z_{BC} z_{CA}, z_{CB}	Mútuas entre trechos.	[Ω /km]
z_{AA}, z_{BB}, z_{CC}	Impedâncias próprias dos trechos.	[Ω /km]
I_A^k, I_B^k, I_C^k	Fasores das correntes na barra k do alimentador.	[A]
$I_A^{k+1}, I_B^{k+1}, I_C^{k+1}$	Fasores das correntes na barra k+1 do alimentador.	[A]
R_F	Resistência de falta.	[Ω]
R_{FA}, R_{FB}, R_{FC}	Resistência de falta nas fases A, B e C respectivamente.	[Ω]
L	Comprimento total do trecho analisado.	[km]
D	Distância da falta no trecho analisado.	[km]
I_A', I_B', I_C'	Fasores das correntes de falta nas fases A, B e C respectivamente.	[A]
$D_{CALCULADA}$	Distância calculada pelo algoritmo de localização de faltas (do ponto localizado até a subestação).	[m]
$D_{SIMULADA}$	Distância utilizada na simulação do ATP, do ponto de curto-circuito até a subestação.	[m]
$V_{AN}^{NOMINAL}$	Fasor da tensão nominal do alimentador (fase A).	[V]

Símbolo	Descrição	Unidade
$V_{BN}^{NOMINAL}$	Fasor da tensão nominal do alimentador (fase B).	[V]
$V_{CN}^{NOMINAL}$	Fasor da tensão nominal do alimentador (fase C).	[V]
V_{AN}^{FALTA}	Fasor da tensão de falta no alimentador (fase A).	[V]
V_{BN}^{FALTA}	Fasor da tensão de falta no alimentador (fase B).	[V]
V_{CN}^{FALTA}	Fasor da tensão de falta no alimentador (fase C).	[V]

RESUMO

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento e a implementação, em uma rotina computacional, de um algoritmo para a localização de faltas em redes primárias de distribuição. Este algoritmo de localização faz parte de um sistema automatizado de localização de faltas, em redes primárias radiais de distribuição, que foi desenvolvido para uma concessionária paulista.

O método descrito é capaz de identificar de forma rápida os prováveis pontos de ocorrência do defeito, baseado em medições de tensões e correntes feitas somente na subestação, nos parâmetros elétricos do alimentador de distribuição e na sua topologia.

ABSTRACT

This research presents the development and implementation in a computational routine of an algorithm for fault location in primary distribution feeders. This algorithm is part of a complete automated fault location system developed to Brazilian electricity utility.

The described method is capable of identifying the most probable fault locations upon its occurrence, based on local measurements of currents and voltages only at the substation, on the electrical parameters of the distribution feeder and its topology.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

.1.1 Introdução

Os alimentadores primários estão sujeitos a faltas provocadas por uma variedade de situações, tais como, condições atmosféricas adversas, falhas em equipamentos, acidentes, etc. Os defeitos nestes alimentadores resultam em um grande número de problemas relacionados à confiabilidade do serviço e à qualidade da energia entregue aos consumidores.

Atualmente, as concessionárias efetuam a localização das faltas através de reclamações dos consumidores afetados. Quando há um defeito permanente, os técnicos do centro de operação da distribuição (COD) identificam o alimentador faltoso e enviam uma equipe de manutenção que o percorre, executando manobras nos dispositivos de proteção na tentativa de isolar e identificar o ponto de ocorrência do defeito. Quando a falta é transitória esta localização se torna mais difícil, visto que esse tipo de defeito normalmente não resulta em algum fusível queimado, e não existem evidências que possam determinar sua causa e localização.

As pesquisas no campo dos sistemas de distribuição têm crescido de forma significativa nos últimos anos. Grande

parte destes estudos visa melhorar os índices de continuidade de serviço da rede, uma vez que a desregulamentação do setor elétrico obrigou as concessionárias a operarem em um ambiente de competição, que exige menores custos, maior confiabilidade e melhor qualidade de serviço para o consumidor.

Além da necessidade de adaptação a esse novo ambiente, o crescimento das pesquisas no campo dos sistemas de distribuição foi impulsionado também pelo aumento da aplicação da tecnologia digital, no que se refere ao monitoramento, supervisão, proteção, medição e controle dos sistemas elétricos. Esta tecnologia tem disponibilizado aos operadores do sistema uma quantidade considerável de informações e uma grande capacidade de intervir no sistema. Desta forma, é importante que todas estas informações sejam exploradas ao máximo, com o objetivo de proporcionar um aumento na confiabilidade do sistema, na eficiência e na qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias.

Este panorama torna interessante para as concessionárias dispor de um sistema automatizado que possibilite localizar com rapidez qualquer falta nos seus alimentadores primários, minimizando desta forma, o tempo de deslocamento da equipe de manutenção e o restabelecimento do fornecimento de energia elétrica. Sendo assim, a imediata localização do ponto de ocorrência do

defeito proporciona uma série de benefícios para os consumidores e para as concessionárias de distribuição de energia elétrica. A figura 1.1 ilustra esses benefícios.

Fig. 1.1: Benefícios do sistema

- *redução da energia não fornecida:* é resultado direto da diminuição no tempo de localização da falta;
- *redução dos custos operativos:* a rápida identificação do ponto de defeito implica na redução dos deslocamentos das equipes de manutenção, permitindo inclusive uma diminuição do número dessas equipes para realizar esse tipo de trabalho;
- *aumento no lucro da empresa:* é consequência imediata da redução dos custos operativos e dos tempos de interrupção do fornecimento de energia

elétrica;

- *aumento da satisfação do consumidor:* com a diminuição dos tempos de interrupção do fornecimento, há uma melhora nos índices de continuidade de serviço da rede e da imagem da empresa perante os consumidores;
- *otimização dos trabalhos de manutenção:* curtos-circuitos transitórios, que não resultam em abertura permanente de disjuntor ou queima de fusível podem ser identificados utilizando-se o sistema descrito neste trabalho. A identificação dos trechos com elevada ocorrência de faltas transitórias permite uma mais precisa programação dos serviços de manutenção, tais como poda de árvores, vistoria da rede com termovisor, etc.

.1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver, implementar e verificar a precisão de um algoritmo para localização de faltas em redes primárias de distribuição.

O algoritmo em questão utiliza os fasores de pré-falta e falta das três tensões e correntes, calculados na saída do alimentador primário que se encontra em falta, além de uma base de dados com a topologia e os parâmetros elétricos

desse alimentador.

O algoritmo descrito neste trabalho faz parte de um sistema automatizado de localização de faltas desenvolvido para uma concessionária paulista.

.1.3 Apresentação do trabalho

Este trabalho está apresentado em capítulos, cujos conteúdos são:

- *1. Considerações Iniciais:*

Apresentação da introdução e dos objetivos do trabalho proposto;

- *2. Revisão da Literatura:*

Apresentação dos principais artigos referentes ao tema, e discussão sobre o problema da localização de faltas em redes de distribuição;

- *3. Sistema Automatizado de Localização de Falhas:*

Descrição do sistema de localização de faltas desenvolvido para a concessionária paulista;

- *4. O Algoritmo de Localização de Falhas:*

Desenvolvimento do algoritmo de localização de faltas descrito neste trabalho e apresentação dos modelos utilizados no equacionamento desse algoritmo;

- *5. Simulação do Algoritmo de Localização:*

Descrição das simulações efetuadas;

- *6. Resultados:*

Apresentação dos resultados obtidos para as simulações descritas no capítulo 5, além de dois resultados reais obtidos através da instalação piloto do sistema em uma subestação da concessionária paulista.

Análise da resposta do algoritmo frente as simulações efetuadas;

- *7. Conclusão:*

Apresentação das considerações finais sobre o trabalho;

- *Bibliografia:*

Apresentação da bibliografia consultada durante a elaboração deste trabalho;

- *Anexos:*

Complementação das informações apresentadas no texto principal.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A grande maioria dos métodos propostos para a localização de faltas foi desenvolvida para linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão. Entretanto, devido à complexidade das redes de distribuição, poucos métodos comercialmente viáveis foram propostos e, mesmo em termos de pesquisa, este assunto tem recebido pouca atenção.

A razão pela qual os métodos de localização de faltas em linhas de transmissão não se aplicam às redes de distribuição, está relacionada com os seguintes fatores [2,3]:

- *Variedade de condutores/estruturas:* ao longo de um alimentador existem diversos tipos de condutores e estruturas de redes. Isto significa que não há relação linear entre a impedância "vista" na subestação e a distância ao ponto de defeito;
- *Existência de ramais laterais:* ao contrário das linhas de transmissão, as redes de distribuição possuem diversos ramais laterais. Isto significa que curtos-circuitos em pontos geograficamente diferentes podem resultar nas mesmas tensões e correntes medidas na subestação. Desta forma, para um evento de sobrecorrente pode haver mais de um ponto como solução do processo de localização de

faltas;

- *Modelamento das cargas:* a corrente medida na subestação durante um evento de sobrecorrente, possui uma parcela que corresponde às correntes de carga em cada nó. Além da impossibilidade de se determinar corretamente essas correntes, não há indicações sobre o seu comportamento durante o curto-circuito.

.2.1 Metodologias de localização de faltas

Existem duas concepções diferentes para se realizar a localização de faltas em redes de distribuição. Uma delas baseia-se na instalação de equipamentos ao longo dos alimentadores de distribuição [1], enquanto a outra baseia-se em metodologias de cálculo a partir de medições de tensões e correntes feitas somente na subestação [2,3,4,5 e 6].

O trabalho apresentado na referência [1] descreve um sistema de localização de faltas baseado em um equipamento de detecção de sinais de alta frequência, que é capaz de identificar se a falta ocorreu antes ou depois do trecho monitorado e enviar um sinal ao COD. Vários desses equipamentos são instalados em pontos estratégicos ao longo dos alimentadores primários. Desta forma, quando ocorre uma

falta é possível determinar a sua região de ocorrência utilizando os dados enviados por esses sensores.

O trabalho apresentado na referência [2] descreve metodologias de localização de falhas a partir das medições disponíveis na subestação (corrente e tensão, ou somente corrente), e sua integração a outros sistemas de controle e operação das redes de distribuição. O trabalho também discute as fontes de erro que podem interferir na localização de falhas.

O trabalho proposto na referência [3] descreve um sistema de localização de falhas que utiliza medições de impedância fornecidas por um relé de distância instalado na saída de cada alimentador primário. Quando ocorre uma falta o relé de distância envia ao COD a impedância medida. Para a localização de falhas, somente a parte reativa é utilizada (com o objetivo de se minimizar o efeito da resistência de falta). O valor da reatância é comparado ao valor máximo e mínimo da reatância de cada trecho "vista" pela subestação. Se o valor da reatância estiver entre os valores máximo e mínimo do trecho analisado, esse será um possível candidato. O autor ainda sugere que se utilizem sinalizadores de sobrecorrente instalados ao longo dos alimentadores, para complementar o sistema proposto.

Os trabalhos apresentados nas referências [4,5 e 6] estão detalhados nos itens 2.2 a 2.4, respectivamente.

.2.2 Método baseado nas componentes simétricas

A solução proposta na referência [4] descreve um sistema automatizado de localização de faltas em redes primárias de distribuição, que consiste na utilização de oscilógrafos digitais instalados na subestação, cujo sinal de disparo dos registros de oscilografia opera por sobrecorrente. Estes registros de oscilografia são: tensões e correntes nas três fases medidas na subestação. O sistema proposto é dividido em três módulos, conforme observado na figura 2.1.

Fig. 2.2: Sistema proposto na referência [4]

- *Processamento dos registros de oscilografia:* consiste no cálculo dos fasores de pré e pós-falta das três tensões e três correntes utilizando uma técnica baseada na análise de *Fourier*, e na identificação do tipo de falta (fase-terra, dupla-fase, dupla-fase-terra, etc.);
- *Localização da falta:* para identificar os possíveis pontos de falta, a rotina de localização de faltas gera pontos de teste a cada 50 metros ao longo do alimentador. Para cada um desses pontos é calculada

a corrente de falta que, injetada no ponto, produziria as tensões e correntes medidas na subestação (o cálculo é baseado nas componentes simétricas e no princípio da superposição). Este módulo utiliza os fasores calculados no módulo de processamento e uma base de dados com informações sobre a topologia e os parâmetros elétricos do alimentador defeituoso;

- *Seleção dos possíveis pontos de falta:* a seleção dos possíveis pontos de falta é feita observando-se o valor da corrente de falta em todos os pontos de teste. Para defeitos assimétricos, o ponto de defeito pode ser identificado observando-se o valor da corrente na(s) fase(s) sã(s), uma vez que esse valor deve ser nulo (p. ex. para um curto fase-terra na fase A, as correntes nas fases B e C no ponto de falta são nulas). Este módulo ordena todos os pontos de teste de acordo com o valor da corrente para a(s) fases(s) sã(s).

A metodologia proposta nesta referência aplica-se a redes primárias radiais equilibradas, que utilizam transformadores trifásicos conectados em Δ/Y (Δ - primário, Y - secundário). Esta metodologia restringe-se apenas a este tipo de rede, sendo assim não se aplica, por

exemplo, a redes que utilizam transformadores monofásicos conectados entre fase e terra.

.2.3 Método baseado em lógica fuzzy

A referência [5] descreve um sistema de gerenciamento de distribuição, que possui um aplicativo computacional de localização de faltas baseado em métodos de inteligência artificial (lógica *fuzzy*). A figura 2.2 apresenta o modelo do sistema de localização de faltas proposto.

Fig. 2.3: Sistema proposto na referência [5]

- *Modelo das cargas*: no sistema de gerenciamento da distribuição proposto nesta referência, há um sistema de informações sobre os consumidores que

permite o modelamento das cargas para uso do modelo de inferência do sistema localizador de falhas;

- *Topologia da rede:* o modelo de inferência para a localização de falhas tem acesso a um banco de dados que possui informações sobre a topologia e os parâmetros elétricos dos alimentadores;
- *Cálculo da distância de falta:* o método proposto para o cálculo da distância de falta baseia-se na magnitude da corrente de curto-circuito, medida por relés digitais instalados na subestação, e na hipótese de resistência de defeito nula. Todavia, a magnitude da corrente de defeito depende tanto da distância até a falta quanto da resistência de defeito, que por ser desconhecida, acrescenta uma incerteza na distância calculada. Isto significa que este cálculo fornece a maior distância possível, ao invés da distância correta para curto com resistência de falta diferente de zero;
- *Outros:* são informações sobre condições atmosféricas, estado dos disjuntores, condições do terreno ao longo das linhas de distribuição, estado dos detetores de falta ao longo dos alimentadores, etc.

O sistema de localização de falhas proposto nesta

referência aplica-se a redes de distribuição com um considerável nível de automação. É um sistema que exige uma série de informações para localizar os possíveis pontos de falta. A grande deficiência desta metodologia se deve ao algoritmo de localização de faltas, que considera a resistência de falta nula. Desta forma, nos eventos de curto-circuito onde a resistência de falta não é nula, esse método fornecerá sempre a maior distância ao invés da distância correta, conforme citado anteriormente.

.2.4 Método baseado no equacionamento trifásico

A solução apresentada na referência [6] descreve um sistema automatizado para a localização de faltas em redes primárias de distribuição, que utiliza oscilógrafos digitais instalados na subestação. No momento em que ocorre um evento de sobrecorrente, estes equipamentos registram ciclos de pré e pós-falta das três tensões e três correntes, e disponibilizam estes dados para o software do localizador. Esta solução também pode ser dividida em três módulos, conforme ilustrado na figura 2.3.

Fig. 2.4: Sistema proposto na referência [6]

- *Processamento dos registros de oscilografia:* este módulo de processamento é similar ao proposto na referência [4];
- *Localização da falta:* utiliza informações contidas em uma base de dados sobre a topologia do alimentador e seus parâmetros elétricos, além dos fasores de pré e pós-falta calculados no módulo de processamento, de forma a determinar os possíveis pontos de ocorrência da falta (este cálculo é baseado no equacionamento trifásico). Visto que os alimentadores são radiais e possuem diversos ramais laterais, mais de um ponto do alimentador pode produzir as mesmas tensões e correntes medidas na subestação. Sendo assim, este módulo de localização fornece todos os possíveis pontos de falta;
- *Diagnóstico da falta:* dados os pontos de falta calculados no módulo de localização, o diagnóstico é feito com base no tempo de atuação dos dispositivos de proteção (chaves fusíveis, disjuntores e religadores) e na rejeição de carga. Para isso, é necessário que os oscilógrafos tenham capacidade de armazenamento suficiente, de forma a registrar todos os eventos subsequentes ao defeito.

A solução apresentada nesta referência, ao contrário

da solução apresentada na referência [4], abrange redes de distribuição que utilizam os diversos tipos de transformadores de distribuição (transformadores monofásicos, em delta aberto e trifásicos). Além disso, visto que o cálculo elétrico é baseado no equacionamento trifásico, é possível também lidar com os desequilíbrios que existem nos alimentadores. Por essas razões, optou-se por basear o desenvolvimento do presente trabalho nesta referência. Nos capítulos que se seguem, esta solução será apresentada com maiores detalhes.

.2.5 Precisão da localização de faltas

Uma vez que este trabalho descreve um sistema de localização de faltas, baseado em medições de tensões e correntes feitas somente na subestação e, em uma base de dados com a topologia e os parâmetros elétricos dos alimentadores de distribuição, é interessante descrever os fatores que interferem na precisão da localização de faltas, sob esse ponto de vista [2,3].

- *Precisão dos equipamentos de medição:* os erros introduzidos pelos equipamentos de medição podem ser significativos quando as faltas são próximas à subestação. Isto ocorre porque a magnitude da corrente pode saturar os transformadores de

medição;

- *Modificações na configuração dos alimentadores:* as redes de distribuição sofrem constantes alterações em sua topologia. Sendo assim, o algoritmo de localização de faltas deve ter acesso a uma base de dados periodicamente atualizada com as informações sobre a topologia e os parâmetros elétricos dos alimentadores;
- *Resistência de falta:* a amplitude da corrente não depende apenas da distância entre a subestação e o ponto de ocorrência do defeito, mas também da resistência de falta. Sendo assim, o algoritmo de localização de faltas deve considerar a presença da resistência de falta no cálculo, de forma a minimizar o erro introduzido por essa incerteza.

3. SISTEMA AUTOMATIZADO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

O sistema de localização de faltas, do qual o algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho faz parte, foi desenvolvido para uma concessionária paulista e está ilustrado na figura 3.1. Esse sistema é constituído por:

- Infra-estrutura de hardware e software instalada nas subestações de distribuição;
- Canal de comunicação entre o COD e as subestações;
- Infra-estrutura de hardware e software instalada no COD.

Fig. 3.5: Sistema de localização de faltas

.3.1 Infra-estrutura instalada nas subestações

.3.1.1 Infra-estrutura de hardware

A infra-estrutura de hardware instalada nas subestações está apresentada na figura 3.2. Nessa figura há o esquema de uma subestação típica da concessionária onde o sistema foi instalado. Essa subestação possui uma entrada de alta tensão conectada a um transformador com secundário duplo. A cada um dos secundários do transformador estão conectados oito alimentadores primários, o que resulta em um total de dezesseis alimentadores nesta subestação (obs.:

na figura 3.2 foram representados somente quatro alimentadores para cada secundário do transformador).

Fig. 3.6: Infra-estrutura do sistema nas subestações

A saída de cada alimentador primário é monitorada por um medidor digital. Desta forma existem também dezesseis medidores nesta subestação. Esses medidores estão conectados a um microcomputador, instalado na subestação, através de um canal de comunicação.

Os medidores digitais registram ciclos de pré e pós-falta de tensões e correntes sempre que ocorrer um evento de sobrecorrente. Os registros são enviados ao microcomputador da subestação, onde se encontram uma série de módulos de software responsáveis pelo pré processamento

dos dados contidos nesses registros. O resultado do pré processamento dos registros é então enviado ao COD através do canal de comunicação.

Os medidores utilizados na instalação piloto do sistema são fabricados pela empresa *Power Measurements* - modelo 3720 ACM com opção ZAMPS (a opção ZAMPS foi escolhida por apresentar um fundo de escala maior, o que possibilita o registro dos sinais de corrente sem saturação). Esses medidores estão configurados para efetuar o registro das grandezas utilizadas pelo sistema de localização de falhas, sempre que ocorrer um evento de sobrecorrente (disparo por sobrecorrente).

A figura 3.3 ilustra um ciclo completo de abertura/religamento em um alimentador. Nesta figura estão definidos: o período de pré-falta (em amarelo), os períodos de falta (em laranja) e o período de pós-falta (em azul).

O ciclo tem duração de aproximadamente um minuto. O primeiro religamento é instantâneo e os demais são temporizados (aproximadamente 20 segundos cada).

Fig. 3.7: Ciclo de abertura/religamento

Os registros efetuados pelos medidores digitais são:

- *Oscilografia WAVEFORM*: registro dos valores instantâneos das tensões de fase e das correntes de linha e de neutro. Esta oscilografia é acionada sempre que ocorrer um evento de sobrecorrente no alimentador, possui uma frequência de amostragem de aproximadamente 960 Hz (16 amostras/ciclo de 60 Hz), com uma duração de 36 ciclos. Destes 36 ciclos, o equipamento está configurado para registrar 12 ciclos de pré-falta. Sendo assim, a

oscilografia WAVEFORM é capaz de registrar até o primeiro desligamento do disjuntor (figura 3.3). Este registro é a principal fonte de informação para o processo de localização da falta.

- *Oscilografia HIGH-SPEED:* registro dos valores RMS, medidos a cada dois ciclos, durante 60 segundos, das três correntes de fase mais a corrente de neutro. Essa informação é utilizada para calcular o tempo de extinção da corrente pelo disjuntor em cada ciclo de religamento/abertura (ver figura 3.3). Desta forma, possui apenas um papel secundário no processo de localização da falta.
- *Grandezas analógicas adicionais:* os medidores registram ainda os valores de potência ativa e reativa de pré-falta e potência ativa de pós-falta. Essas grandezas são utilizadas para estimar a potência ativa rejeitada por um eventual curto-circuito extinto pela abertura de fusível.
- *Grandezas digitais adicionais:* as entradas digitais do medidor monitoram o estado do disjuntor (52A e 52B). Esta informação é utilizada para auxiliar na classificação da falta e para o cálculo dos tempos de extinção da corrente na abertura do disjuntor.

O canal de comunicação entre os medidores 3720 ACM e o

microcomputador localizado na subestação é uma rede padrão *Ethernet* de 10 Mbits.

.3.1.2 Infra-estrutura de software

A infra-estrutura de software instalada nas subestações consiste em pacotes de software comerciais, e módulos de software desenvolvidos para o sistema de localização de faltas.

Os pacotes de software comerciais são:

- *PEGASYS*: é o conjunto de programas disponibilizado pelo fabricante do medidor, que realiza a comunicação com os medidores digitais e o armazenamento dos registros efetuados em arquivos no formato MS-Excel;
- *MS-Excel*: planilha de cálculo do pacote MS-Office utilizada pelo PEGASYS na geração dos relatórios.

Os módulos de software descritos a seguir, foram desenvolvidos para o sistema de localização de faltas. Esses módulos não fazem parte do escopo deste trabalho, entretanto, estão apresentados com o objetivo de proporcionar uma visão geral do sistema de localização de faltas.

- *Módulo de interface com o software do medidor*: é um módulo de software que tem a finalidade de fazer a

interface com o software PEGASYS, e extrair os dados armazenados pelo PEGASYS nos arquivos em formato MS-Excel. Os dados extraídos por esse módulo de software são armazenados em arquivos no formato COMTRADE, ver referência [7]. Isso permite que o restante do sistema de localização de faltas seja independente dos medidores utilizados (sempre que for instalado um medidor diferente no sistema é necessário somente alterar esse módulo de software);

- *Módulo de pré processamento dos sinais:* esta rotina realiza o pré processamento dos dados armazenados nos arquivos COMTRADE (produzidos pelo módulo de interface com o software do medidor);
- *Módulo de comunicação:* é a rotina responsável pelo envio do arquivo produzido pelo módulo de pré processamento ao COD.

As informações obtidas através do pré processamento dos registros armazenados nos arquivos em formato COMTRADE podem ser divididas em dois grupos: informações essenciais e informações secundárias. As informações essenciais são utilizadas diretamente pelo algoritmo de localização de faltas, no cálculo dos possíveis pontos de ocorrência do defeito. As informações secundárias são utilizadas para se

determinar a gravidade do evento de sobrecorrente, a carga rejeitada pelos dispositivos de proteção (disjuntor ou fusível), e desta forma, ordenar os pontos encontrados de acordo com sua probabilidade.

As informações essenciais estão descritas a seguir:

- *Fasores de pré-falta e de falta das tensões e correntes:* calculados a partir das informações contidas nos registros da oscilografia WAVEFORM, utilizando uma técnica baseada na transformada discreta de *Fourier*;
- *Fases envolvidas na falta:* informação sobre o tipo de falta e as fases envolvidas (fase-terra - AN, BN ou CN, dupla-fase - AB, BC ou CA, dupla-fase-terra - ABN, BCN ou CAN, trifásica - ABC e trifásica-terra - ABCN).

As informações secundárias são:

- *Classificação da falta:* informação adicional sobre o evento de sobrecorrente registrado pelos medidores. Esses eventos podem ser classificados como falta permanente isolada por abertura de disjuntor, falta permanente isolada pela abertura de fusível, falta transitória extinta pelo religamento do disjuntor e falta transitória;
- *Potências ativa e reativa de pré-falta, por fase;*

- *Potência ativa de pós-falta, por fase;*
- *Instantes de abertura do disjuntor;*
- *Instantes de religamento do disjuntor;*
- *Tempos de extinção da falta do disjuntor em cada ciclo abertura/religamento:* calculados a partir das informações contidas nos registros da oscilografia HIGH-SPEED e dos instantes de abertura e religamento do disjuntor.

A decisão de se fazer o pré processamento dos dados na subestação, reside no fato de que os arquivos em formato COMTRADE possuem um tamanho razoável, e podem sobrecarregar o canal de comunicação que interliga a subestação ao COD. Com o pré processamento desses arquivos na subestação, somente um arquivo com dados apresentados acima é enviado ao COD (obs.: o tamanho desse arquivo é muito inferior ao tamanho do grupo de arquivos em formato COMTRADE).

.3.2 Infra-estrutura instalada no COD

.3.2.1 Infra-estrutura de hardware

A infra-estrutura de hardware instalada no COD está apresentada na figura 3.4. Basicamente, essa infra-estrutura é composta por um microcomputador, ou uma rede de

microcomputadores, com acesso a uma base de dados que contém informações sobre a topologia e os parâmetros elétricos dos alimentadores de distribuição.

Fig. 3.8: Infra-estrutura do sistema no COD

O microcomputador do COD recebe os dados enviados pelo microcomputador da subestação e executa a rotina de localização de faltas. O resultado da localização de faltas é disponibilizado aos operadores do COD através de uma interface homem-máquina.

.3.2.2 Infra-estrutura de software

A infra-estrutura de software instalada no COD consiste em módulos de software desenvolvidos para o sistema de localização de faltas. Esses módulos são:

- *Interface homem-máquina*: módulo de software que

realiza a interface entre os operadores do COD e o algoritmo de localização de faltas. Este módulo gerencia a execução da rotina de localização de faltas para os eventos aguardando tratamento, e disponibiliza aos operadores os pontos localizados e informações adicionais, de todos os eventos que foram processados pela rotina de localização de faltas;

- *Módulo de localização de faltas:* é a rotina de software que está detalhada neste trabalho. Basicamente, consiste no cálculo dos possíveis pontos de ocorrência do defeito utilizando um equacionamento trifásico. Essa rotina tem acesso à base de dados dos alimentadores de distribuição;
- *Base de dados:* para cada alimentador que faz parte do sistema de localização de faltas existem três arquivos em formato ASCII, que são atualizados periodicamente de forma a refletir as eventuais alterações na configuração dos alimentadores. O primeiro arquivo contém informações sobre a topologia e os parâmetros elétricos dos trechos que compõem os alimentadores. O segundo possui informações sobre as características de todas as cargas conectadas às diversas barras dos alimentadores, e o último contém informações sobre

os bancos de capacitores conectados aos alimentadores.

O gerenciamento da execução da rotina de localização de faltas pelo módulo de interface homem-máquina, é feito com base nas informações secundárias, contidas no arquivo produzido pelo módulo de pré processamento dos registros. Sendo assim, quando houver vários eventos de sobrecorrente aguardando tratamento no COD, o módulo de interface homem-máquina determina a prioridade de processamento da rotina de localização de faltas, de forma a processar os eventos mais urgentes em primeiro lugar (p. ex. um evento permanente extinto pela abertura de disjuntor é processado antes que um evento transitório).

As figuras 3.5 e 3.6 ilustram a tela inicial da interface homem-máquina, e a forma como o resultado do processo de localização de faltas é disponibilizado ao operador do COD (obs.: este resultado também é fornecido em um arquivo texto, para que possa ser integrado a qualquer sistema computacional existente na empresa).

Fig. 3.9: Tela inicial da interface homem-máquina

Fig. 3.10: Tela de resultados da interface homem-máquina

.3.3 Fluxo de dados do sistema de localização de faltas

Na ocorrência de um evento de sobrecorrente em um dado alimentador, o medidor responsável pelo monitoramento desse alimentador registra os sinais de pré-falta, falta e pós-falta e os envia ao microcomputador localizado na subestação, através da rede Ethernet.

O software PEGASYS, localizado no microcomputador da subestação, produz um arquivo em formato MS-Excel com os registros do evento.

O módulo de interface com o software do medidor converte os dados fornecidos pelo PEGASYS e os dados armazenados no arquivo em formato MS-Excel, em um grupo de arquivos no formato COMTRADE, e gerencia a execução do módulo de pré processamento.

O resultado do pré processamento dos sinais é enviado ao microcomputador localizado no COD, pelo módulo de comunicação.

Quando o arquivo enviado pelo microcomputador da subestação chega ao microcomputador do COD, o módulo de interface homem-máquina estabelece a prioridade de processamento desse arquivo, e executa o módulo de localização de faltas.

O módulo de localização de faltas faz uma consulta na base de dados referente ao alimentador defeituoso, e identifica os possíveis pontos de ocorrência do defeito.

O fluxo de dados do sistema de localização de faltas está ilustrado na figura 3.7.

Fig. 3.11: Fluxo de dados

4. O ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

O algoritmo de localização de faltas descrito neste trabalho consiste em um equacionamento trifásico do curto-circuito. Decidiu-se utilizar o equacionamento trifásico, em detrimento do equacionamento através de componentes simétricas, visto que os alimentadores de distribuição apresentam um certo nível de desequilíbrio, nem todos os seus trechos possuem as três fases e nem todos os transformadores de distribuição são trifásicos (existem também transformadores monofásicos conectados entre fase e neutro).

Para equacionamento utilizado no algoritmo, foram desenvolvidos: os modelos dos diversos tipos de curto-circuito a que o alimentador pode estar sujeito, e o equacionamento da carga conectada em cada barra do alimentador.

Nos itens seguintes são apresentados: uma descrição do algoritmo de localização de faltas, o equacionamento para um curto-circuito fase-terra (AN), o equacionamento das cargas conectadas ao alimentador primário, e os modelos desenvolvidos para cada tipo de curto-circuito.

A contribuição deste trabalho está no desenvolvimento dos modelos para os tipos de curto-circuito, e no desenvolvimento do equacionamento das cargas conectadas ao alimentador primário.

.4.1 Descrição do algoritmo

Os alimentadores primários são radiais e possuem uma série de ramais laterais. Desta forma, curtos-circuitos em pontos geograficamente diferentes podem resultar nas mesmas tensões e correntes registradas na subestação.

Por essa razão, o algoritmo de localização de faltas deve submeter cada trecho do alimentador investigado ao equacionamento descrito, de forma a identificar todos os possíveis pontos de ocorrência do defeito.

Fig. 4.12: Alimentador de distribuição

Para o alimentador ilustrado na figura 4.1, o algoritmo inicia o cálculo dos possíveis pontos de ocorrência do curto-circuito, analisando o trecho que liga a subestação à barra (1). Esse procedimento é repetido para os (n) trechos do alimentador de forma a identificar todos os possíveis pontos de ocorrência do defeito.

No item 4.1.1 é apresentado o equacionamento de um curto-circuito aplicado ao trecho candidato, compreendido entre as barras genericamente denominadas (k) e (k+1). Esse

equacionamento depende dos fasores de tensão e corrente no início do trecho (barra k), que podem ser calculados utilizando os fasores de tensão e corrente medidos na subestação, conforme apresentado no item 4.1.2.

Além de determinar todos os possíveis pontos de ocorrência do defeito, o algoritmo de localização de faltas utiliza as informações secundárias, fornecidas pelo módulo de pré processamento do sinais (ver item 3.1.2), para fazer uma classificação de todos os pontos localizados (p. ex. admitindo que, para um curto-circuito isolado pela abertura de disjuntor, o algoritmo tenha encontrado dois pontos prováveis de ocorrência do defeito, e que, um deles pertença a um ramal protegido por fusível, e o outro não. O algoritmo fornece, como ponto mais provável, aquele cujo ramal não está protegido por fusível).

.4.1.1 Equacionamento para o curto-circuito fase-terra

Para ilustrar o procedimento do algoritmo de localização de faltas, é apresentado neste item, o equacionamento de um curto-circuito fase-terra (AN), aplicado ao trecho compreendido entre as barras (k) e ($k+1$) do alimentador, conforme ilustrado na figura 4.2.

O equacionamento para os demais tipos de curto-circuito está apresentados no anexo A.

Fig. 4.13: Curto-circuito fase A - terra

Segundo a figura 4.2, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{AN}^k \\ V_{BN}^k \\ V_{CN}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \times D \times \begin{bmatrix} I_A^k \\ I_B^k \\ I_C^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V'_{AN} \\ V'_{BN} \\ V'_{CN} \end{bmatrix} \quad [4.1]$$

Mas:

$$V'_{AN} = R_F \cdot I_F \quad [4.2]$$

Substituindo a equação (4.2) na equação (4.1), tem-se:

$$V_{AN}^k = D \cdot \left((z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k) \right) + R_F \cdot I_F \quad [4.3]$$

$$V_{BN}^k = D \cdot \left((z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k) \right) + V'_{BN} \quad [4.4]$$

$$V_{CN}^k = D \cdot \left((z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k) \right) + V'_{CN} \quad [4.5]$$

Além disso:

$$I_F = I_A^k - I_A^{k+1} \quad [4.6]$$

Onde:

$I_A^{k+1} \rightarrow$ Corrente de carga na fase A, na barra k+1

Tem-se então um sistema de duas incógnitas (distância da falta - D , e resistência de falta - R_F) e duas equações (a parte real e a parte imaginária da equação 4.3).

O equacionamento desse sistema fica:

$$\text{Re}\{V_{AN}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_F\} \quad [4.7]$$

$$\text{Im}\{V_{AN}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} + R_F \cdot \text{Im}\{I_F\} \quad [4.8]$$

E a solução é:

$$\begin{bmatrix} D \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{V_{AN}^k\} \\ \text{Im}\{V_{AN}^k\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Re}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} \\ \text{Im}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}\{I_F\} \\ \text{Im}\{I_F\} \end{bmatrix}^{-1} \quad [4.9]$$

Caso essa distância calculada (D) seja menor que o comprimento do trecho ($D \leq L$), esse trecho possui um possível ponto de ocorrência do defeito.

O sistema descrito pela equação 4.9 depende dos fasores de tensão e corrente na barra inicial do trecho candidato (barra k). Esses fasores podem ser estimados utilizando os sinais de tensão e corrente medidos na subestação. No item 4.1.2 é apresentada uma metodologia para o cálculo desses fasores.

.4.1.2 Cálculo das tensões e correntes

O equacionamento apresentado no item 4.1.1 é aplicado ao trecho $(k, k+1)$ do alimentador primário ilustrado na figura 4.3.

Fig. 4.14: Alimentador de distribuição

As tensões na barra (k) são dadas por:

$$V_k^{ABC} = V_{SE}^{ABC} - \sum_{m=1}^k I_m^{ABC} \cdot z_{(m-1,m)}^{trecho} \quad [4.10]$$

Onde:

$m=1, \dots, k \rightarrow$ "caminho-série" da SE à barra k .

$V_{SE}^{ABC} \rightarrow$ tensão medida na subestação.

$I_m^{ABC} \rightarrow$ corrente na barra (m) .

$z_{(m-1,m)}^{trecho} \rightarrow$ impedância do trecho $(m-1, m)$.

As correntes na barra (m) são:

$$I_m^{ABC} = I_{SE}^{ABC} - \sum_{L=1}^{m-1} I_L^C \quad [4.11]$$

Onde:

$L = 1, \dots, m-1 \rightarrow$ todos os pontos de carga cuja alimentação passa por parte do trecho que se inicia na SE até o trecho $(m-1)$.

$I_{SE}^{ABC} \rightarrow$ corrente medida na subestação.

$I_L^C \rightarrow$ corrente de carga na barra L (ver fig. 4.3).

Através das expressões 4.10 e 4.11 pode-se determinar as tensões e correntes no início do trecho a ser pesquisado. Essas expressões dependem das correntes de carga em cada nó do alimentador. A metodologia para a obtenção dessas correntes está apresentada no item 4.2.

.4.2 Equacionamento das cargas

O correto modelamento das cargas conectadas à rede primária implica no aumento da performance do algoritmo de localização de faltas. Entretanto, uma vez que é impossível estimar corretamente o carregamento de cada transformador de distribuição conectado à rede primária, faz-se necessário o desenvolvimento um equacionamento.

A princípio, pensou-se em utilizar um equacionamento para estimar a corrente em todos os nós da rede e em cada instante de tempo, baseada em um trabalho de pesquisa anterior desenvolvido pela USP e Eletropaulo, ver

referências [8], [9] e [10]. Esse trabalho propõe a utilização de curvas representativas da carga diária para cada tipo de consumidor e classe de consumo (essas curvas representativas de carga fornecem a potência média consumida [p.u.], a cada intervalo de 15 minutos, existindo dessa forma, 96 intervalos em 24 horas).

Para se determinar o carregamento de cada transformador de distribuição, seria necessário então agregar as cargas de todos os consumidores, de forma a se obter as correntes das fases e de neutro em cada barra do alimentador. Devido ao volume de informações necessário para esse tipo de implementação, optou-se por utilizar um equacionamento mais simplificado.

Nesse equacionamento, considera-se que todos os transformadores operam à plena carga, com fator de potência unitário. Entretanto, não é coerente admitir que os transformadores de distribuição operem sempre desta maneira. Portanto, o algoritmo de localização de faltas corrige essas correntes de forma a adequá-las à potência total consumida, ao fator de potência, e à variação de tensão no instante do evento de sobrecorrente.

A potência nominal dos transformadores de distribuição está armazenada na base de dados, em termos de corrente por fase em cada barra. No item 4.2.1 está apresentada a forma como essas correntes foram calculadas, e no item 4.2.2

estão apresentadas as correções aplicadas pelo algoritmo de localização de faltas nas correntes armazenadas na base de dados.

.4.2.1 Cálculo das correntes de carga

O arquivo de cargas da base de dados contém os fasores das correntes I_A , I_B e I_C para cada barra do alimentador, supondo que todos os transformadores operem a plena carga e com fator de potência unitário.

Considerando essas duas hipóteses, o cálculo da parte real e imaginária das correntes é feito em função da tensão nominal do alimentador (V_L) e das características do transformador (potência nominal - S_N , se monofásico ou trifásico, fase em que é conectado à rede no caso de transformador monofásico, e carga equilibrada no caso de transformador trifásico). A tabela 4.1 apresenta as equações utilizadas para o cálculo das correntes I_A , I_B e I_C .

		Trifásico	Monofásico – Fase de ligação		
			A	B	C
I_A	$\text{Re}\{I_A\}$	$\frac{S_N}{V_L \cdot \sqrt{3}}$	$\sqrt{3} \frac{S_N}{V_L}$	0	0
	$\text{Im}\{I_A\}$	0	0	0	0
I_B	$\text{Re}\{I_B\}$	$-\frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{S_N}{V_L}$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_N}{V_L}$	0
	$\text{Im}\{I_B\}$	$-\frac{1}{2} \cdot \frac{S_N}{V_L}$	0	$-\frac{3}{2} \cdot \frac{S_N}{V_L}$	0
I_C	$\text{Re}\{I_C\}$	$-\frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{S_N}{V_L}$	0	0	$-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_N}{V_L}$
	$\text{Im}\{I_C\}$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{S_N}{V_L}$	0	0	$\frac{3}{2} \cdot \frac{S_N}{V_L}$

Tab. 4.1: Correntes nominais dos transformadores

.4.2.2 Correção das correntes de carga

A correção das correntes de carga, armazenadas na base de dados, é feita pelo algoritmo de localização de faltas, utilizando os dados fornecidos pelo módulo de pré processamento dos registros. As correntes de carga são corrigidas de forma a se adequarem à potência total consumida no instante imediatamente anterior à falta, ao fator de potência, e à variação na tensão, durante o evento de sobrecorrente.

1. *Correção pela potência total consumida:* a potência ativa total de pré-falta, medida na subestação, é distribuída entre as barras do alimentador de forma

proporcional à potência nominal dos transformadores instalados em cada barra, conforme as equações 4.12 à 4.19.

Para adequar as correntes nominais dos transformadores à potência total consumida no instante do evento de sobrecorrente, definiu-se um fator de correção f_c dado pela equação 4.12.

$$f_c = \frac{P_{MEDIDA}}{P_{NOMINAL}} \quad [4.12]$$

Onde:

P_{MEDIDA} → Potência ativa fornecida pelos medidores.

$P_{NOMINAL}$ → Potência estimada a partir das correntes de carga (fornecidas pela base de dados) e da tensão nominal.

$$E: P_{NOMINAL} = P_{AN}^{NOMINAL} + P_{BN}^{NOMINAL} + P_{CN}^{NOMINAL} \quad [4.13]$$

Onde:

$$P_{AN}^{NOMINAL} = \operatorname{Re} \left\{ V_{AN}^{NOMINAL} \cdot \left(\sum_{barra(1)}^{barra(n)} \operatorname{Re}\{I_A\} - j \cdot \sum_{barra(1)}^{barra(n)} \operatorname{Im}\{I_A\} \right) \right\} \quad [4.14]$$

$$P_{BN}^{NOMINAL} = \operatorname{Re} \left\{ V_{BN}^{NOMINAL} \cdot \left(\sum_{barra(1)}^{barra(n)} \operatorname{Re}\{I_B\} - j \cdot \sum_{barra(1)}^{barra(n)} \operatorname{Im}\{I_B\} \right) \right\} \quad [4.15]$$

$$P_{CN}^{NOMINAL} = \operatorname{Re} \left\{ V_{CN}^{NOMINAL} \cdot \left(\sum_{barra(1)}^{barra(n)} \operatorname{Re}\{I_C\} - j \cdot \sum_{barra(1)}^{barra(n)} \operatorname{Im}\{I_C\} \right) \right\} \quad [4.16]$$

Corrigindo as correntes tem-se:

$$\dot{I}'_a = fc \cdot (\text{Re}\{I_A\} + j \cdot \text{Im}\{I_A\}) \quad [4.17]$$

$$\dot{I}'_b = fc \cdot (\text{Re}\{I_B\} + j \cdot \text{Im}\{I_B\}) \quad [4.18]$$

$$\dot{I}'_c = fc \cdot (\text{Re}\{I_C\} + j \cdot \text{Im}\{I_C\}) \quad [4.19]$$

2. *Correção pelo fator de potência:* para adequar as correntes estimadas através das expressões 4.17 à 4.19 ao fator de potência de pré-falta ($\cos\varphi$) medido na subestação, no instante do evento de sobrecorrente, deve-se dividir o módulo dessas correntes pelo fator de potência e defasá-las de um ângulo (φ).

Tem-se então:

$$\dot{I}''_a = \frac{\dot{I}'_a}{\cos\varphi} \cdot 1\angle -\varphi \quad [4.20]$$

$$\dot{I}''_b = \frac{\dot{I}'_b}{\cos\varphi} \cdot 1\angle -\varphi \quad [4.21]$$

$$\dot{I}''_c = \frac{\dot{I}'_c}{\cos\varphi} \cdot 1\angle -\varphi \quad [4.22]$$

3. *Correção pela variação de tensão:* o algoritmo de localização da faltas utiliza o modelo de corrente constante para as cargas, durante o curto-circuito. Entretanto, não é coerente admitir que as cargas permaneçam consumindo a corrente de pré-falta (dadas

pelas expressões 4.20 a 4.22) quando a tensão na subestação diminui significativamente durante um curto-circuito. Desta forma, optou-se por corrigir as correntes dadas pelas equações 4.20 a 4.22 conforme a variação da tensão.

Tem-se então:

$$\dot{I}_a^{CARGA} = \dot{I}_a'' \cdot \frac{|V_{AN}^{FALTA}|}{|V_{AN}^{NOMINAL}|} \quad [4.23]$$

$$\dot{I}_b^{CARGA} = \dot{I}_b'' \cdot \frac{|V_{BN}^{FALTA}|}{|V_{BN}^{NOMINAL}|} \quad [4.24]$$

$$\dot{I}_c^{CARGA} = \dot{I}_c'' \cdot \frac{|V_{CN}^{FALTA}|}{|V_{CN}^{NOMINAL}|} \quad [4.25]$$

.4.3 Modelamento do tipos de curto-circuito

Conforme a referência [2], faltas resultantes de arcos elétricos têm característica puramente resistiva. O valor da resistência de arco é dado pela equação [4.26].

$$R = \frac{8750}{I^{1.4}} \frac{l}{0.305} \quad [4.26]$$

Onde:

l : comprimento do arco [m]

I : corrente de falta [A]

Considerando que faltas provocadas por outras fontes, tais como quebra de condutor, galhos de árvores, etc. têm também característica resistiva, pode-se modelar os diversos tipos de curto-circuito conforme apresentado na figura 4.4. Desta forma, tem-se:

- *Curto-circuito fase-terra*: é modelado por uma resistência de falta (R_F) conectada entre a fase em falta e a terra;
- *Curto-circuito dupla-fase*: é modelado por uma resistência de falta (R_F) conectada entre as fases em falta;
- *Curto-circuito dupla-fase-terra*: é modelado por uma resistência conectada à cada uma das fases em falta (R_{FB} e R_{FC}), e uma resistência conectada à terra (R_F);
- *Curto-circuito trifásico*: é modelado por uma resistência conectada em cada uma das fases (R_{FA} , R_{FB} e R_{FC}), e conectadas entre si;
- *Curto-circuito trifásico-terra*: é modelado por uma resistência conectada em cada uma das fases (R_{FA} , R_{FB} e R_{FC}) e uma resistência conectada à terra (R_F).

Fig. 4.15: Modelamento dos tipos de curto-circuito

5. SIMULAÇÃO DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO

O algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho foi aplicado ao alimentador primário ilustrado na figura 5.1.

Esse alimentador possui 25 [km] de extensão, potência nominal instalada de 8 [MVA] e tensão nominal de 13.8 [kV].

Fig. 5.16: Rede utilizada para simulação do algoritmo

Esse alimentador é constituído por um tronco, conforme ilustrado na figura 5.1 (linha cheia), e por diversos ramais laterais. Os condutores do alimentador possuem bitola #336.

Os ramais laterais são protegidos por chaves fusíveis e o tronco é protegido pelo disjuntor da subestação.

Para se efetuar uma avaliação da performance do algoritmo, diversas situações de falta foram simuladas utilizando-se o programa *Alternative Transient Program* -ATP. Os ramais do alimentador foram simulados utilizando-se o modelo de linha transposta, com parâmetros distribuídos, e as cargas foram modeladas como impedâncias constantes.

Os parâmetros que sofreram alteração nas simulações foram: o tipo de curto-circuito (fase-terra, dupla-fase, etc.); a resistência de falta e as barras de ocorrência do curto-circuito.

O tempo total de cada simulação foi de seis ciclos, sendo os dois primeiros de pré-falta e os quatro restantes de falta.

Ao total foram simulados 120 casos. A tabela 5.1 apresenta uma síntese dos parâmetros utilizados em cada caso de simulação.

Barra	Tipo de Falta	Resistência de falta [Ω]			
		R_F	R_{FA}	R_{FB}	R_{FC}
17	AN*	0,1,5,10,20,50	--	--	--
57	BC	0,1,5	--	--	--
73					
86	BCN	0,1,2.5	--	0,1,2.5	0,1,2.5
106	ABC	--	0,1,1.5	0,2,2.5	0,3,3.5
158	ABCN	0,1,1.5	0,1,1.5	0,2,2.5	0,3,3.5

Tab. 5.2: Casos de simulação do ATP

NOTA: Para os curtos-circuitos AN, com resistências de falta de 0, 1 e 5 ohms, foram simulados casos com 2 e 2.25 ciclos de pré-falta, e o restante de pós falta.

6. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados do algoritmo de localização de faltas para três casos de curto-circuito produzidos no ATP, e para dois eventos de curto-circuito que ocorreram nos alimentadores de número 106 e 108 da subestação Butantã, de propriedade da concessionária paulista Eletropaulo Metropolitana.

Os três casos de curto-circuito produzidos pelo ATP foram escolhidos porque representam de forma significativa, o grupo de casos simulados. Estes casos estão descritos em detalhes neste capítulo.

Os eventos nos alimentadores 106 e 108 da subestação Butantã não estão detalhados da mesma forma que os casos simulados no ATP, uma vez que é impossível verificar a precisão de parâmetros como: fasores das correntes de pré-falta, falta e resistência de falta. Entretanto, a equipe da Eletropaulo disponibilizou a informação sobre a localização exata dos eventos de curto-circuito apresentados neste capítulo.

.6.1 Casos simulados no ATP

Conforme a tabela 5.1, foram simulados 120 casos variando-se: o tipo de falta, a resistência e o local de

ocorrência da falta.

Os casos apresentados aqui são:

- 1) *Curto-circuito fase-terra na barra 17*: é um curto-circuito fase-terra AN, com resistência de falta de 5 ohms. A duração da pré-falta é de exatamente 2 ciclos e o restante é de falta (4 ciclos);
- 2) *Curto-circuito dupla-fase na barra 57*: é um curto circuito dupla-fase (BC), com resistência de falta nula. A duração da pré-falta é de 2 ciclos e a duração da falta é de 4 ciclos;
- 3) *Curto-circuito trifásico na barra 158*: é um curto circuito com resistências de falta praticamente nulas nas três fases (há uma diferença entre elas com o objetivo de se verificar o efeito de algum desequilíbrio). A duração da pré-falta é de 2 ciclos e a duração da falta é de 4 ciclos.

.6.1.1 Curto-circuito fase-terra na barra 17

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os fasores das tensões e correntes fornecidos pelo ATP e os fasores calculados pelo módulo de pré processamento dos sinais. A tabela 6.3 apresenta a resistência de falta calculada pelo algoritmo de localização de faltas e a resistência utilizada na simulação do ATP.

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam os sinais de tensão e

corrente produzidos pelo ATP, e a posição da janela de *Fourier* utilizada no cálculo dos fasores pelo módulo de pré processamento dos sinais. A figura 6.3 apresenta os pontos localizados pelo algoritmo.

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase [°]
ATP	A	200	-26,66	7967	0,0
	B	200	-146,66	7967	-120,0
	C	200	96,34	7967	120,0
CALCULADO	A	200	-26,18	7921	0,0
	B	200	-146,12	7930	-120,0
	C	200	93,78	7927	120,0

Tab. 6.3: Fasores de pré-falta

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase [°]
ATP	A	1674	-12,70	7855	-4,32
	B	193	-147,04	7904	-120,55
	C	204	91,90	7954	119,36
CALCULADO	A	1673	-12,20	7850	-3,82
	B	193	-146,54	7905	-120,02
	C	205	92,4	7942	119,82

Tab. 6.4: Fasores de falta

Resistência simulada no ATP [Ω]	Resistência Calculada [Ω]
5,00	4,995

Tab. 6.5: Resistência de falta

Fig. 6.17: Correntes de linha para a simulação na barra 17

Fig. 6.18: Tensões de fase para a simulação na barra 17

Fig. 6.19: Pontos localizados para a simulação na barra 17

.6.1.2 Curto-circuito dupla-fase na barra 57

As tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os fasores das tensões e correntes fornecidos pelo ATP e os fasores calculados pelo módulo de pré processamento dos sinais. A tabela 6.6 apresenta a resistência de falta calculada pelo algoritmo de localização de faltas e a resistência utilizada na simulação do ATP.

As figuras 6.4 e 6.5 apresentam os sinais de tensão e corrente produzidos pelo ATP, e a posição da janela de *Fourier* utilizada no cálculo dos fasores. A figura 6.6 apresenta os pontos localizados pelo algoritmo.

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase[°]
ATP	A	200	-26,66	7967	0,0
	B	200	-146,66	7967	-120,0
	C	200	96,34	7967	120,0
CALCULADO	A	200	-26,16	7930	0,0
	B	200	-146,17	7930	-120,0
	C	200	93,77	7930	120,0

Tab. 6.6: Fasores de pré-falta

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase [°]
ATP	A	200	-26,66	7934	-0,49
	B	5448	-161,34	6779	-133,29
	C	5358	20,20	5985	123,30
CALCULADO	A	200	-26,16	7930	0,01
	B	5456	-160,71	6777	-132,78
	C	5317	20,83	5984	123,79

Tab. 6.7: Fasores de falta

Resistência simulada no ATP [Ω]	Resistência Calculada [Ω]
0,001	0,066

Tab. 6.8: Resistência de falta

Fig. 6.20: Correntes de linha para a simulação na barra 57

Fig. 6.21: Tensões de fase para a simulação na barra 57

Fig. 6.22: Pontos localizados para a simulação na barra 57

Este foi o caso de simulação que mais forneceu pontos como resultado do processo de localização de faltas (onze no total). Entretanto, todos os pontos se encontram num raio de 100 [m] e somente um dos pontos fornecidos faz parte do tronco do alimentador, onde realmente ocorreu o curto-circuito (ver figura 6.6).

Desta forma, é possível que o módulo de localização de faltas classifique este ponto como o mais provável, através das informações secundárias fornecidas pelo módulo de pré processamento dos sinais (ver item 3.1.2).

.6.1.3 Curto-circuito trifásico na barra 158

As tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os fasores das tensões e correntes fornecidos pelo ATP e os fasores calculados pelo módulo de pré processamento dos sinais. A tabela 6.9 apresenta a resistência de falta calculada pelo algoritmo de localização de faltas e a resistência utilizada na simulação do ATP.

As figuras 6.7 e 6.8 apresentam os sinais de tensão e corrente produzidos pelo ATP, e a posição da janela de *Fourier* utilizada no cálculo dos fasores. A figura 6.9 apresenta os pontos localizados pelo algoritmo.

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase[°]
ATP	A	200	-26,66	7967	0,0
	B	200	-146,66	7967	-120,0
	C	200	96,34	7967	120,0
CALCULADO	A	200	-26,19	7922	0,0
	B	200	-146,15	7930	-120,0
	C	200	93,76	7927	120,0

Tab. 6.9: Fasores de pré-falta

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase [°]
ATP	A	3955	-67,45	6601	-5,02
	B	3953	172,56	6602	-125,02
	C	3954	52,58	6602	114,98
CALCULADO	A	3952	-66,94	6599	-4,56
	B	3956	173,12	6600	-124,55
	C	3957	53,05	6601	115,44

Tab. 6.10: Fasores de falta

Resistência simulada no ATP [Ω]			Resistência Calculada [Ω]		
R_{FA}	R_{FB}	R_{FC}	R_{FA}	R_{FB}	R_{FC}
0,001	0,002	0,003	0,020	0,019	0,023

Tab. 6.11: Resistência de falta

Fig. 6.23: Correntes de linha para a simulação na barra 158

Fig. 6.24: Tensão de fase para a simulação na barra 158

Fig. 6.25: Pontos localizados para a simulação na barra 158

.6.2 Curto-circuito no alimentador 106 da SE Butantã

O evento de sobrecorrente registrado no alimentador 106 da subestação Butantã, ocorreu no dia 10/11/2000 às 10:56:49. O evento foi classificado como um curto-circuito fase-terra (AN), permanente, extinto pela abertura de fusível.

Os fasores calculados estão apresentados na tabela 6.10. O algoritmo de localização de faltas forneceu quatro pontos prováveis de ocorrência do defeito. A resistência de falta para cada um dos pontos localizados está apresentada na tabela 6.11.

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase [°]
PRÉ-FALTA	A	274,37	-17,51	7894	0,0
	B	268,18	-128,82	7915	-115,01
	C	277,17	111,13	7846	131,14
FALTA	A	1882,67	-62,59	5522,04	-5,27
	B	335,23	-125,80	7860,50	-114,70
	C	293,06	102,77	7721,00	131,56

Tab. 6.12: Fasores calculados

Pontos Localizados	1	2	3	4
Resistência Calculada [Ω]	0,29	0,27	0,29	0,29

Tab. 6.13: Resistência de falta calculada

A figura 6.10 apresenta a oscilografia WAVEFORM das correntes de linha, efetuada pelo medidor digital. Nesta figura está apresentada a janela de *Fourier* utilizada para o cálculo dos fasores de pré-falta e falta.

Fig. 6.26: WAVEFORM das correntes - Butantã 106

Pode-se notar, na figura 6.10, que houve a abertura do disjuntor, mesmo após a falta ter sido extinta pela abertura de fusível. Isto ocorreu porque a concessionária optou por temporizar a abertura do disjuntor em 10 ciclos, porém não configurou corretamente essa temporização.

Desta forma, mesmo após a falta ter sido isolada, o disjuntor abriu, o que caracteriza um problema de coordenação da proteção.

A figura 6.11 apresenta a oscilografia HIGH-SPEED das correntes de linha, mais a corrente de neutro.

Fig. 6.27: HIGH-SPEED das correntes - Butantã 106

Pode-se notar, na figura 6.11, que houve sobrecorrente no início do registro (região I), e após o religamento do disjuntor não há a presença de sobrecorrente. A região I está apresentada em detalhes na figura 6.12.

Fig. 6.28: HIGH-SPEED das correntes (região I) - Butantã 106

Na figura 6.12 está ilustrada a sobrecorrente, a abertura e o religamento do disjuntor, registrados pelo medidor digital. Após o religamento, o alimentador 106 da subestação Butantã, voltou a operar normalmente (a falta

foi extinta pela abertura de fusível).

A figura 6.13 apresenta a oscilografia WAVEFORM das tensões de fase, efetuada pelo medidor digital. Nesta figura está apresentada a janela de *Fourier* utilizada para o cálculo dos fasores de pré-falta e falta (obs.: a posição da janela de *Fourier* é a mesma ilustrada na figura 6.10 - WAVEFORM das correntes).

Fig. 6.29: WAVEFORM das tensões - Butantã 106.

A figura 6.14 apresenta os quatro pontos fornecidos pelo algoritmo de localização de faltas e o ponto onde realmente ocorreu o curto-circuito.

A concessionária confirmou a ocorrência do curto-circuito fase-terra (AN) e forneceu o ponto de ocorrência do defeito. Este ponto se encontra a aproximadamente 50 metros do conjunto de pontos fornecidos pelo algoritmo de localização.

Fig. 6.30: Pontos localizados no alimentador 106 - Butantã.

.6.3 Curto-circuito no alimentador 108 da SE Butantã

O evento de sobrecorrente registrado no alimentador 108 da subestação Butantã, ocorreu no dia 14/11/2000 às 05:10:48. O evento foi classificado como um curto-circuito fase-terra (CN), permanente, extinto pela abertura de fusível.

Os fasores calculados estão apresentados na tabela 6.12. O algoritmo de localização de faltas forneceu dois pontos prováveis de ocorrência do defeito. A resistência de falta para cada ponto localizado está apresentada na tabela 6.13.

Fases		Correntes		Tensões	
		Amplitude [A]	Fase [°]	Amplitude [V]	Fase [°]
PRÉ-FALTA	A	156,01	-19,63	7637	0,0
	B	127,63	-126,47	7642	-114,7
	C	89,33	119,50	7720	131,4
FALTA	A	170,23	-16,83	7671,23	0,44
	B	133,23	-141,40	7432,29	-114,33
	C	2960,61	68,29	3820,96	109,29

Tab. 6.14: Fasores calculados

Pontos Localizados	1	2
Resistência Calculada [Ω]	0,58	0,59

Tab. 6.15: Resistência de falta calculada

A figura 6.15 apresenta a oscilografia WAVEFORM das correntes de linha, efetuada pelo medidor digital. Nesta figura está apresentada a janela de *Fourier* utilizada para o cálculo dos fasores de pré-falta e falta.

Fig. 6.31: WAVEFORM das correntes - Butantã 108.

A figura 6.16 apresenta a oscilografia HIGH-SPEED das correntes de linha, mais a corrente de neutro.

Pode-se notar que houve sobrecorrente no início do registro (região I). Após aproximadamente dez segundos da primeira ocorrência, houve outro evento de sobrecorrente (região II). Estas regiões estão apresentadas em detalhes nas figuras 6.17 e 6.18.

Fig. 6.32: HIGH-SPEED das correntes - Butantã 108.

O disparo do registro foi provocado pelo primeiro evento de sobrecorrente, conforme ilustrado na figura 6.17.

Após o religamento do disjuntor, o alimentador 108 da subestação Butantã, voltou a operar em condições normais. Entretanto, houve outro evento de sobrecorrente (ver figura 6.18), e o disjuntor abriu novamente.

Fig. 6.33: HIGH-SPEED das correntes (região I) - Butantã 108.

A figura 6.18 abaixo, mostra em detalhes o segundo evento de sobrecorrente que ocorreu no alimentador 108 da subestação Butantã.

Fig. 6.34: HIGH-SPEED das correntes (região II) - Butantã 108.

Visto que a oscilografia WAVEFORM não tem capacidade para registrar todo o evento (apenas 36 ciclos), e a oscilografia HIGH-SPEED é somente um registro RMS das correntes, não é possível descrever exatamente o que ocorreu neste segundo evento de sobrecorrente (fig. 6.18).

A figura 6.19 apresenta a oscilografia WAVEFORM das tensões de fase, efetuada pelo medidor digital. Nesta figura está apresentada a janela de *Fourier* utilizada para o cálculo dos fasores de pré-falta e falta (obs.: a posição da janela de *Fourier* é a mesma ilustrada na figura 6.15 – WAVEFORM das correntes).

Fig. 6.35: WAVEFORM das tensões – Butantã 108.

A figura 6.20 apresenta os dois pontos fornecidos pelo algoritmo de localização de faltas e o ponto onde realmente ocorreu o curto-circuito.

A concessionária confirmou a ocorrência do curto-circuito fase-terra (CN) e forneceu o ponto de ocorrência do defeito. Este ponto se encontra a aproximadamente 100 metros do conjunto de pontos fornecidos pelo algoritmo de localização.

Fig. 6.36: Pontos localizados no alimentador 108 - Butantã.

.6.4 Análise dos resultados

O módulo de pré processamento dos sinais e o módulo de localização de faltas foram implementados utilizando o programa MATLAB. O sistema de localização de faltas foi submetido a testes utilizando os resultados fornecidos pelo ATP para os 120 casos de simulação.

A eficiência do sistema foi verificada utilizando os seguintes critérios: erro na estimativa da distância entre o ponto de falta e a subestação, e influência da resistência de falta na localização da falta.

1. Critério de análise do cálculo da distância da falta até a SE

Foram verificados os erros em módulo no cálculo da distância do ponto de falta até a subestação. Esses erros foram estimados para o ponto mais provável, fornecido pelo algoritmo de localização de faltas. O erro é dado pela equação [6.1].

$$erro_{DISTÂNCIA} = |D_{CALCULADA} - D_{SIMULADA}| \quad [6.27]$$

Esses erros estão apresentados nas figuras 6.21 a 6.25.

Fig. 6.37: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [m] para o curto-circuito AN

Fig. 6.38: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [m] para o curto-circuito BC

Fig. 6.39: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [m] para o curto-circuito BCN Fig. 6.40: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [m] para o curto-circuito ABC

Fig. 6.41: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [m] para o curto-circuito ABCN

Pode-se notar que os valores dos erros, em termos absolutos, podem ser considerados pequenos. Para um alimentador de distribuição com uma distância máxima de 3500 metros (um alimentador típico da concessionária para a qual o sistema foi desenvolvido), pode-se considerar que os erros percentuais também estão dentro de limites aceitáveis.

2. *Influência da resistência de falta no cálculo da distância*

Para se verificar a influência da resistência de falta no cálculo da distância foram feitas simulações, no ATP, de

curtos-circuitos fase-terra com resistências de falta variando entre 0 [ohms] e 50 [ohms], conforme apresentado na tabela 6.14. Os erros foram estimados da mesma forma que no item anterior. Além disso, são apresentados também os gráficos dos erros percentuais no cálculo da distância, segundo a equação [6.2].

$$erro_{DIST\grave{A}NCIA} = \left| \frac{D_{CALCULADA} - D_{SIMULADA}}{D_{SIMULADA}} \right| \times 100\% \quad [6.28]$$

Barras	R _F [ohms]
57, 106	0, 1, 5, 10, 20, 50

Tab. 6.16: Casos de simulação do ATP

Fig. 6.42: Erro na $D_{CALCULADA}$ [m] x variação de R_F - barra 57

Fig. 6.43: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [%] x variação de R_F - barra 57 Fig. 6.44: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [m] x variação de R_F - barra 106

Fig. 6.45: Erro na $D_{\text{CALCULADA}}$ [%] x variação de R_F - barra 106

Verifica-se que o algoritmo é sensível à variação na resistência de falta. Isto ocorre porque, quanto maior a resistência de falta, menor a magnitude da corrente de curto-circuito. Desta forma, a corrente de falta começa a assumir valores da mesma ordem de grandeza da corrente de carga. Uma vez que a corrente de carga representa uma grande incerteza no modelamento do sistema, começam a aparecer erros elevados.

Entretanto, curtos-circuitos com elevada resistência de falta (acima de 20 [ohms]) não vão provocar o disparo do medidor digital. Para os curtos-circuitos com resistência de falta pequena, os erros são considerados aceitáveis.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um sistema automatizado de localização de faltas em redes primárias de distribuição e, mais especificamente, um algoritmo de localização de faltas. Esse algoritmo é baseado no equacionamento trifásico do curto-circuito, nos modelos dos tipos de curto-circuito a que o alimentador pode estar sujeito, e no equacionamento das cargas conectadas à rede primária.

A principal contribuição deste trabalho foi desenvolver os modelos para os tipos de curto-circuito, e desenvolver o equacionamento das cargas.

O algoritmo de localização de faltas foi implementado utilizando o software MATLAB, e foi submetido a uma série de testes utilizando resultados produzidos por simulações do ATP.

Verificou-se que o algoritmo de localização de faltas descrito apresentou um desempenho adequado frente às diversas situações a que foi submetido, e se mostrou uma ferramenta útil para a operação e manutenção das redes de distribuição.

Para os eventos reais apresentados neste trabalho, a resposta do algoritmo de localização de faltas foi considerada satisfatória, uma vez que o erro relativo entre a distância calculada e a distância real não ultrapassou 100 metros.

ANEXO A: EQUACIONAMENTO DOS MODELOS DE CURTO-CIRCUITO

No capítulo 4 foi apresentado o equacionamento do curto-circuito fase A - terra. O equacionamento para o restante dos modelos de curto-circuito está apresentado aqui.

Curto-circuito dupla-fase:

O curto-circuito dupla-fase pode ser modelado através de uma resistência conectada entre as fases em curto, no ponto de defeito. A figura [A.1] ilustra um curto-circuito dupla-fase BC:

Fig. A.46: Curto-circuito dupla-fase BC

O curto-circuito dupla-fase pode ser equacionado como se segue:

$$\begin{bmatrix} V_{AN}^k \\ V_{BN}^k \\ V_{CN}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \times D \times \begin{bmatrix} I_A^k \\ I_B^k \\ I_C^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN}' \\ V_{BN}' \\ V_{CN}' \end{bmatrix} \quad [\text{A.29}]$$

Mas:

$$V_{BN}' = V_{CN}' + (R_F \cdot I_F) \quad [\text{A.30}]$$

Substituindo a equação [A.2] na equação [A.3], tem-se:

$$V_{AN}^k = D \cdot \left((z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k) \right) + V_{AN}' \quad [\text{A.31}]$$

$$V_{BN}^k = D \cdot \left((z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k) \right) + V_{CN}' + (R_F \cdot I_F) \quad [\text{A.32}]$$

$$V_{CN}^k = D \cdot \left((z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k) \right) + V_{CN}' \quad [\text{A.33}]$$

Além disso:

$$I_F = I_B^k - I_B^{k+1} \quad [\text{A.34}]$$

Subtraindo a equação [A.5] da equação [A.4], tem-se:

$$V_{BN}^k - V_{CN}^k = D \cdot \left((z_{BA} - z_{CA}) \cdot I_A^k + (z_{BB} - z_{CB}) \cdot I_B^k + (z_{BC} - z_{CC}) \cdot I_C^k \right) + (R_F \cdot I_F) \quad [\text{A.35}]$$

Mas :

$$V_{BN}^k - V_{CN}^k = V_{BC}^k \quad [\text{A.36}]$$

$$z_{BA} - z_{CA} = z_1 \quad [\text{A.37}]$$

$$z_{BB} - z_{CB} = z_2 \quad [\text{A.38}]$$

$$z_{BC} - z_{CC} = z_3 \quad [\text{A.39}]$$

Tem-se então um sistema de duas incógnitas (distância da falta - D , e resistência de falta - R_F) e duas equações (a parte real e a parte imaginária da equação [A.7]). Substituindo as equações [A.8] a [A.11] na equação [A.7], o equacionamento fica:

$$\text{Re}\{V_{BC}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_1 \cdot I_A^k) + (z_2 \cdot I_B^k) + (z_3 \cdot I_C^k)\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_F\} \quad [\text{A.40}]$$

$$\text{Im}\{V_{BC}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_1 \cdot I_A^k) + (z_2 \cdot I_B^k) + (z_3 \cdot I_C^k)\} + R_F \cdot \text{Im}\{I_F\} \quad [\text{A.41}]$$

A solução fica:

$$\begin{bmatrix} D \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{V_{BC}^k\} \\ \text{Im}\{V_{BC}^k\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Re}\{(z_1 \cdot I_A^k) + (z_2 \cdot I_B^k) + (z_3 \cdot I_C^k)\} & \text{Re}\{I_F\} \\ \text{Im}\{(z_1 \cdot I_A^k) + (z_2 \cdot I_B^k) + (z_3 \cdot I_C^k)\} & \text{Im}\{I_F\} \end{bmatrix}^{-1} \quad [\text{A.42}]$$

Curto-circuito dupla-fase - terra:

O curto-circuito dupla-fase - terra pode ser modelado através de duas resistências conectadas entre as fases em curto e uma resistência conectada à terra, no ponto de defeito. A figura [A.2] ilustra um curto-circuito dupla-fase BC - terra.

O curto-circuito dupla-fase - terra é equacionado como se segue:

$$\begin{bmatrix} V_{AN}^k \\ V_{BN}^k \\ V_{CN}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \times D \times \begin{bmatrix} I_A^k \\ I_B^k \\ I_C^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN}' \\ V_{BN}' \\ V_{CN}' \end{bmatrix} \quad [\text{A.43}]$$

$$I_C' = I_C^k - I_C^{k+1} \quad [\text{A.50}]$$

Tem-se então um sistema de quatro incógnitas (distância da falta - D , resistência de falta - R_F , resistência de falta da fase B - R_{FB} e a resistência de falta da fase C - R_{FC}) e quatro equações (a parte real e a parte imaginária das equações [A.19] e [A.20]). O equacionamento fica:

$$\text{Re}\{V_{BN}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} + R_{FB} \cdot \text{Re}\{I_B'\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_B' + I_C'\} \quad [\text{A.51}]$$

$$\text{Im}\{V_{BN}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} + R_{FB} \cdot \text{Im}\{I_B'\} + R_F \cdot \text{Im}\{I_B' + I_C'\} \quad [\text{A.52}]$$

$$\text{Re}\{V_{CN}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} + R_{FC} \cdot \text{Re}\{I_C'\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_B' + I_C'\} \quad [\text{A.53}]$$

$$\text{Im}\{V_{CN}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} + R_{FC} \cdot \text{Im}\{I_C'\} + R_F \cdot \text{Im}\{I_B' + I_C'\} \quad [\text{A.54}]$$

A solução fica:

$$\begin{bmatrix} D \\ R_{FB} \\ R_{FC} \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{V_{BN}^k\} \\ \text{Im}\{V_{BN}^k\} \\ \text{Re}\{V_{CN}^k\} \\ \text{Im}\{V_{CN}^k\} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Re}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} & \text{Re}\{I_B'\} & 0 & \text{Re}\{I_B' + I_C'\} \\ \text{Im}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} & \text{Im}\{I_B'\} & 0 & \text{Im}\{I_B' + I_C'\} \\ \text{Re}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} & 0 & \text{Re}\{I_C'\} & \text{Re}\{I_B' + I_C'\} \\ \text{Im}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} & 0 & \text{Im}\{I_C'\} & \text{Im}\{I_B' + I_C'\} \end{bmatrix}^{-1} \quad [\text{A.55}]$$

Curto-circuito Trifásico:

O curto-circuito trifásico pode ser modelado através de três resistências conectadas entre as fases em curto, no ponto de defeito. A figura [A.3] ilustra o curto-circuito trifásico:

Fig. A.48: Curto-circuito trifásico

O curto-circuito trifásico é equacionado como se segue:

$$\begin{bmatrix} V_{AN}^k \\ V_{BN}^k \\ V_{CN}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \times D \times \begin{bmatrix} I_A^k \\ I_B^k \\ I_C^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V'_{AN} \\ V'_{BN} \\ V'_{CN} \end{bmatrix} \quad [A.56]$$

Mas:

$$V'_{AN} = R_{FA} \cdot I'_A + V_{NN'} \quad [A.57]$$

$$V'_{BN} = R_{FB} \cdot I'_B + V_{NN'} \quad [\text{A.58}]$$

$$V'_{CN} = R_{FC} \cdot I'_C + V_{NN'} \quad [\text{A.59}]$$

Substituindo as equações [A.29] à [A.31] na equação [A.28], tem-se:

$$V_{AN}^k = D \cdot \left((z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k) \right) + R_{FA} \cdot I'_A + V_{NN'} \quad [\text{A.60}]$$

$$V_{BN}^k = D \cdot \left((z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k) \right) + R_{FB} \cdot I'_B + V_{NN'} \quad [\text{A.61}]$$

$$V_{CN}^k = D \cdot \left((z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k) \right) + R_{FC} \cdot I'_C + V_{NN'} \quad [\text{A.62}]$$

Além disso:

$$I'_A = I_A^k - I_A^{k+1} \quad [\text{A.63}]$$

$$I'_B = I_B^k - I_B^{k+1} \quad [\text{A.64}]$$

$$I'_C = I_C^k - I_C^{k+1} \quad [\text{A.65}]$$

Das equações [A.29] à [A.31], tem-se:

$$V_{NN'} = \frac{V_{AN'} + V_{BN'} + V_{CN'} - (R_{FA} \cdot I'_A + R_{FB} \cdot I'_B + R_{FC} \cdot I'_C)}{3} \quad [\text{A.66}]$$

Ainda:

$$V'_{AN} = V_{AN}^k - D \cdot \left((z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k) \right) \quad [\text{A.67}]$$

$$V'_{BN} = V_{BN}^k - D \cdot \left((z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k) \right) \quad [\text{A.68}]$$

$$V'_{CN} = V_{CN}^k - D \cdot \left((z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k) \right) \quad [\text{A.69}]$$

Substituindo as equações [A.39] à [A.41] na equação [A.38], tem-se:

$$V_{NN'} = \frac{1}{3} \cdot \left\{ V_{AN}^k + V_{BN}^k + V_{CN}^k - D \cdot \left[I_A^k \cdot (z_{AA} + z_{BA} + z_{CA}) + I_B^k \cdot (z_{AB} + z_{BB} + z_{CB}) + I_C^k \cdot (z_{AC} + z_{BC} + z_{CC}) \right] \right\} - \frac{1}{3} \cdot \left\{ R_{FA} \cdot I_A' + R_{FB} \cdot I_B' + R_{FC} \cdot I_C' \right\} \quad [A.70]$$

Substituindo a equação [A.42] nas equações [A.32] à [A.34], tem-se:

$$\frac{2}{3} V_{AN}^k - \frac{1}{3} V_{BN}^k - \frac{1}{3} V_{CN}^k = D \cdot \left[I_A^k \cdot \left(\frac{2}{3} z_{AA} - \frac{1}{3} z_{BA} - \frac{1}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(\frac{2}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BB} - \frac{1}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(\frac{2}{3} z_{AC} - \frac{1}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{CC} \right) \right] + \frac{2}{3} R_{FA} \cdot I_A' - \frac{1}{3} R_{FB} \cdot I_B' - \frac{1}{3} R_{FC} \cdot I_C' \quad [A.71]$$

$$-\frac{1}{3} V_{AN}^k + \frac{2}{3} V_{BN}^k - \frac{1}{3} V_{CN}^k = D \cdot \left[I_A^k \cdot \left(-\frac{1}{3} z_{AA} + \frac{2}{3} z_{BA} - \frac{1}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(-\frac{1}{3} z_{AB} + \frac{2}{3} z_{BB} - \frac{1}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(-\frac{1}{3} z_{AC} + \frac{2}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{CC} \right) \right] - \frac{1}{3} R_{FA} \cdot I_A' + \frac{2}{3} R_{FB} \cdot I_B' - \frac{1}{3} R_{FC} \cdot I_C' \quad [A.72]$$

$$-\frac{1}{3} V_{AN}^k - \frac{1}{3} V_{BN}^k + \frac{2}{3} V_{CN}^k = D \cdot \left[I_A^k \cdot \left(-\frac{1}{3} z_{AA} - \frac{1}{3} z_{BA} + \frac{2}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(-\frac{1}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BB} + \frac{2}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(-\frac{1}{3} z_{AC} - \frac{1}{3} z_{BC} + \frac{2}{3} z_{CC} \right) \right] - \frac{1}{3} R_{FA} \cdot I_A' - \frac{1}{3} R_{FB} \cdot I_B' + \frac{2}{3} R_{FC} \cdot I_C' \quad [A.73]$$

Tem-se então um sistema de quatro incógnitas (distância da falta - D , resistência de falta da fase A - R_{FA} , resistência de falta da fase B - R_{FB} , e a resistência

de falta da fase C - R_{FC}) e seis equações (a parte real e a parte imaginária das equações [A.43] à [A.45]).

Uma vez que o sistema possui seis equações e quatro incógnitas, é necessário utilizar o Método dos Mínimos Quadrados para sua solução. Esse método consiste basicamente na minimização do erro quadrático. Sendo assim, tem-se:

$[I]_{4 \times 1} \rightarrow$ Matriz de Incógnitas do problema:

$$[I]_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} D \\ R_{FA} \\ R_{FB} \\ R_{FC} \end{bmatrix} \quad [A.74]$$

$[C]_{6 \times 4} \rightarrow$ Matriz dos coeficientes do problema:

$$[C]_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left\{ I_A^k \cdot \left(+ \frac{2}{3} z_{AA} - \frac{1}{3} z_{BA} - \frac{1}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(+ \frac{2}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BB} - \frac{1}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(+ \frac{2}{3} z_{AC} - \frac{1}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{CC} \right) \right\} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \\ \text{Im} \left\{ I_A^k \cdot \left(+ \frac{2}{3} z_{AA} - \frac{1}{3} z_{BA} - \frac{1}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(+ \frac{2}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BB} - \frac{1}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(+ \frac{2}{3} z_{AC} - \frac{1}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{CC} \right) \right\} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \\ \text{Re} \left\{ I_A^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AA} + \frac{2}{3} z_{BA} - \frac{1}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AB} + \frac{2}{3} z_{BB} - \frac{1}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AC} + \frac{2}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{CC} \right) \right\} - \frac{1}{3} - \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \\ \text{Im} \left\{ I_A^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AA} + \frac{2}{3} z_{BA} - \frac{1}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AB} + \frac{2}{3} z_{BB} - \frac{1}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AC} + \frac{2}{3} z_{BC} - \frac{1}{3} z_{CC} \right) \right\} - \frac{1}{3} - \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \\ \text{Re} \left\{ I_A^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AA} - \frac{1}{3} z_{BA} + \frac{2}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BB} + \frac{2}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AC} - \frac{1}{3} z_{BC} + \frac{2}{3} z_{CC} \right) \right\} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \\ \text{Im} \left\{ I_A^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AA} - \frac{1}{3} z_{BA} + \frac{2}{3} z_{CA} \right) + I_B^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AB} - \frac{1}{3} z_{BB} + \frac{2}{3} z_{CB} \right) + I_C^k \cdot \left(- \frac{1}{3} z_{AC} - \frac{1}{3} z_{BC} + \frac{2}{3} z_{CC} \right) \right\} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad [A.75]$$

$[K]_{6 \times 1} \rightarrow$ Matriz de constantes do problema:

$$[K]_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} \text{Re} \left\{ + \frac{2}{3} V_{AN}^k - \frac{1}{3} V_{BN}^k - \frac{1}{3} V_{CN}^k \right\} \\ \text{Im} \left\{ + \frac{2}{3} V_{AN}^k - \frac{1}{3} V_{BN}^k - \frac{1}{3} V_{CN}^k \right\} \\ \text{Re} \left\{ - \frac{1}{3} V_{AN}^k + \frac{2}{3} V_{BN}^k - \frac{1}{3} V_{CN}^k \right\} \\ \text{Im} \left\{ - \frac{1}{3} V_{AN}^k + \frac{2}{3} V_{BN}^k - \frac{1}{3} V_{CN}^k \right\} \\ \text{Re} \left\{ - \frac{1}{3} V_{AN}^k - \frac{1}{3} V_{BN}^k + \frac{2}{3} V_{CN}^k \right\} \\ \text{Im} \left\{ - \frac{1}{3} V_{AN}^k - \frac{1}{3} V_{BN}^k + \frac{2}{3} V_{CN}^k \right\} \end{bmatrix} \quad [\text{A.76}]$$

Dadas as matrizes acima, o sistema fica:

$$[K]_{6 \times 1} = [C]_{6 \times 4} \times [I]_{4 \times 1} \quad [\text{A.77}]$$

$$[C]_{4 \times 6}^t \times [K]_{6 \times 1} = [C]_{4 \times 6}^t \times [C]_{6 \times 4} \times [I]_{4 \times 1} \quad [\text{A.78}]$$

Desta forma, a solução do problema fica:

$$[I]_{4 \times 1} = \left\{ [C]_{4 \times 6}^t \times [C]_{6 \times 4} \right\}^{-1} \times [C]_{4 \times 6}^t \times [K]_{6 \times 1} \quad [\text{A.79}]$$

Curto-circuito Trifásico - Terra

O curto-circuito trifásico - terra pode ser modelado através de três resistências conectadas entre as fases em curto e uma resistência conectada à terra, no ponto de defeito. A figura A.4 ilustra esse modelamento.

Fig. A.49: Curto-circuito trifásico-terra

O curto-circuito trifásico - terra pode ser equacionado como se segue:

$$\begin{bmatrix} V_{AN}^k \\ V_{BN}^k \\ V_{CN}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{AA} & z_{AB} & z_{AC} \\ z_{BA} & z_{BB} & z_{BC} \\ z_{CA} & z_{CB} & z_{CC} \end{bmatrix} \times D \times \begin{bmatrix} I_A^k \\ I_B^k \\ I_C^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V'_{AN} \\ V'_{BN} \\ V'_{CN} \end{bmatrix} \quad [\text{A.80}]$$

Mas:

$$V'_{AN} = R_{FA} \cdot I'_A + R_F \cdot I_F \quad [\text{A.81}]$$

$$V'_{BN} = R_{FB} \cdot I'_B + R_F \cdot I_F \quad [\text{A.82}]$$

$$V'_{CN} = R_{FC} \cdot I'_C + R_F \cdot I_F \quad [\text{A.83}]$$

Substituindo as equações [A.53] à [A.55] na equação [A.52], tem-se:

$$V_{AN}^k = D \cdot \left((z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k) \right) + R_{FA} \cdot I_A' + R_F \cdot I_F \quad [\text{A.84}]$$

$$V_{BN}^k = D \cdot \left((z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k) \right) + R_{FB} \cdot I_B' + R_F \cdot I_F \quad [\text{A.85}]$$

$$V_{CN}^k = D \cdot \left((z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k) \right) + R_{FC} \cdot I_C' + R_F \cdot I_F \quad [\text{A.86}]$$

Além disso:

$$I_A' = I_A^k - I_A^{k+1} \quad [\text{A.87}]$$

$$I_B' = I_B^k - I_B^{k+1} \quad [\text{A.88}]$$

$$I_C' = I_C^k - I_C^{k+1} \quad [\text{A.89}]$$

Tem-se então um sistema de cinco incógnitas (distância da falta - D , resistência de falta da fase A - R_{FA} , resistência de falta da fase B - R_{FB} e a resistência de falta da fase C - R_{FC} e a resistência de falta para a terra R_F) e seis equações (a parte real e a parte imaginária das equações (62) à (64)). O equacionamento desse sistema fica:

$$\text{Re}\{V_{AN}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} + R_{FA} \cdot \text{Re}\{I_A'\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_F\} \quad [\text{A.90}]$$

$$\text{Im}\{V_{AN}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} + R_{FA} \cdot \text{Im}\{I_A'\} + R_F \cdot \text{Im}\{I_F\} \quad [\text{A.91}]$$

$$\text{Re}\{V_{BN}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} + R_{FB} \cdot \text{Re}\{I_B'\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_F\} \quad [\text{A.92}]$$

$$\text{Im}\{V_{BN}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} + R_{FB} \cdot \text{Im}\{I_B'\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_F\} \quad [\text{A.93}]$$

$$\text{Re}\{V_{CN}^k\} = D \cdot \text{Re}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} + R_{FC} \cdot \text{Re}\{I_C'\} + R_F \cdot \text{Re}\{I_F\} \quad [\text{A.94}]$$

$$\text{Im}\{V_{CN}^k\} = D \cdot \text{Im}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} + R_{FC} \cdot \text{Im}\{I_C'\} + R_F \cdot \text{Im}\{I_F\} \quad [\text{A.95}]$$

Uma vez que este sistema de equações é similar àquele utilizado no cálculo do curto-circuito trifásico, faz-se necessário também, a utilização do Método dos Mínimos Quadrados para sua solução. Tem-se então:

$[I]_{5 \times 1} \rightarrow$ Matriz de Incógnitas do problema:

$$[I]_{5 \times 1} = \begin{bmatrix} D \\ R_{FA} \\ R_{FB} \\ R_{FC} \\ R_F \end{bmatrix} \quad [\text{A.96}]$$

$[C]_{6 \times 5} \rightarrow$ Matriz dos coeficientes do problema:

$$[C]_{6 \times 5} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} & \text{Re}\{I_A'\} & 0 & 0 & \text{Re}\{I_F\} \\ \text{Im}\{(z_{AA} \cdot I_A^k) + (z_{AB} \cdot I_B^k) + (z_{AC} \cdot I_C^k)\} & \text{Im}\{I_A'\} & 0 & 0 & \text{Im}\{I_F\} \\ \text{Re}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} & 0 & \text{Re}\{I_B'\} & 0 & \text{Re}\{I_F\} \\ \text{Im}\{(z_{BA} \cdot I_A^k) + (z_{BB} \cdot I_B^k) + (z_{BC} \cdot I_C^k)\} & 0 & \text{Re}\{I_B'\} & 0 & \text{Im}\{I_F\} \\ \text{Re}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} & 0 & 0 & \text{Re}\{I_C'\} & \text{Re}\{I_F\} \\ \text{Im}\{(z_{CA} \cdot I_A^k) + (z_{CB} \cdot I_B^k) + (z_{CC} \cdot I_C^k)\} & 0 & 0 & \text{Re}\{I_C'\} & \text{Im}\{I_F\} \end{bmatrix}$$

[A.97]

$[K]_{6 \times 1} \rightarrow$ Matriz de constantes do problema:

$$[K]_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{V_{AN}^k\} \\ \text{Im}\{V_{AN}^k\} \\ \text{Re}\{V_{BN}^k\} \\ \text{Im}\{V_{BN}^k\} \\ \text{Re}\{V_{CN}^k\} \\ \text{Im}\{V_{CN}^k\} \end{bmatrix} \quad [\text{A.98}]$$

A solução para o curto-circuito trifásico - terra é:

$$[I]_{5 \times 1} = \left\{ [C]_{5 \times 6}^t \times [C]_{6 \times 5} \right\}^{-1} \times [C]_{5 \times 6}^t \times [K]_{6 \times 1} \quad [\text{A.99}]$$

ANEXO B: ARQUIVO DE SIMULAÇÃO DO ATP

Neste anexo estão apresentadas partes de um dos arquivos utilizados para simulação no ATP.

```

BEGIN NEW DATA CASE
$BEGIN PL4 COMMENTS
CComprimento total: 25309.8 metros
CCondutores      : #336
CCarga total     : 8137.1 kVA
CTipo de curto   : CURTO-CIRCUITO FASE A-TERRA
CBarra           : 17
CRF              : 5 ohms
Ct_curto         : 2 ciclos
$END PL4 COMMENTS
$PREFIX,C:\ATP\ATPDRAW\LIB\
$SUFFIX, .LIB
$DUMMY, XYZ000
C Miscellaneous Data Card ....
POWER FREQUENCY                6.0E+01
C
C Este tempo de simulacao e passo de integracao estao dentro do limite
C do maior numero inteiro permitido no ATP. Isto e:
C (1/DELTAT)*TMAX<=9.99999900E+06 (Que e o maior numero inteiro permitido
C                               no programa)
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C DELT | TMAX | XOPT | COPT | EPSILN| TOLMAT| TSTART|
1.1E-08      .1 6.0E+01 0.0E+00
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C IOUT | IPLOT | IDOUBL| KSSOUT| MAXOUT| IPUN  | MEMSAV| ICAT  | NERERG| IPRSUP|
15783  15783      0      1      0      0      0      1      0
C
C IOUT = 15783 -> 96 amostras por ciclo
C
/BRANCH
C
C THEVENIN PARA SISTEMA E TRAF0 DA SE
51AF0  A0                0.3174
52BF0  B0                0.3809
53CF0  C0
C
C Impedâncias sequenciais e tamanho do Trecho  1:  30.0 kVA
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C NO_IN| NO_FIM|          |R0/R1|X0/X1|C0/C1|LENGT|
-1A1   A4                0.49131.28799.3E-3 0.382
-2B1   B4                0.19010.37140.0141 0.382
-3C1   C4
C
C Impedâncias sequenciais e tamanho do Trecho  2:  30.0 kVA
-1A4   A9                0.49131.28799.3E-3 0.437
-2B4   B9                0.19010.37140.0141 0.437
-3C4   C9
C
C Impedâncias sequenciais e tamanho do Trecho  3:  0.0 kVA
-1A4   A8                0.49131.28799.3E-3 0.158
-2B4   B8                0.19010.37140.0141 0.158
-3C4   C8
C
C
C

```

```

C  ENTRADA DE DADOS DAS CARGAS
C
C  Carga do Trecho 1: 30.0 kVA
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C      |      |      |      R      |      L      |      C      |
C      A4      B4      28566.13835.
C      B4      C4      28566.13835.
C      C4      A4      28566.13835.
C
C  Carga do Trecho 2: 30.0 kVA
C      A9      B9      28566.13835.
C      B9      C9      28566.13835.
C      C9      A9      28566.13835.
C
C  Carga do Trecho 4: 45.0 kVA
C      A10     B10     19044.9223.4
C      B10     C10     19044.9223.4
C      C10     A10     19044.9223.4
C
C  Carga do Trecho 5: 90.0 kVA
C      A17     B17     9522.04611.7
C      B17     C17     9522.04611.7
C      C17     A17     9522.04611.7
C
C
C
C
C
C  FIM DA ENTRADA DE DADOS DAS CARGAS
C
C  ENTRADA DE DADOS DO PONTO DE CURTO-CIRCUITO
C
C      A17      AKEY      5.
C
C
C  /SWITCH
C  Chave de medida na barra A1
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C < n 1>< n 2>< TCLOSE >< TOPEN >
C      A0      A1      -1.      10.      1
C      B0      B1      -1.      10.      1
C      C0      C1      -1.      10.      1
C  Chave de simulacao do curto-circuito
C      AKEY      3.333E-02      10.
C
C
C  /SOURCE
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
C 14AF0      0 1.1268E+4      60.      0.0      -1.      10.
C 14BF0      0 1.1268E+4      60.      -120.0      -1.      10.
C 14CF0      0 1.1268E+4      60.      120.0      -1.      10.
C BLANK BRANCH
C BLANK SWITCH
C BLANK SOURCE
C      A1      B1      C1
C BLANK OUTPUT
C BLANK PLOT
C BEGIN NEW DATA CASE
C BLANK

```

BIBLIOGRAFIA

1. JOHNS, A. T.; Lai, L. L.; EL-HAMI, M. DARUVALA, D. J. **New approach to directional fault location for overhead power distribution feeders**. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), vol. 138, n.º 4 p. 38-43, July, 1993.
2. LEHTONEN, M.; PETTISSALO, S.; ETULA, J. H. **Calculational fault location for electrical distribution networks**. Third International Conference on Power System Monitoring and Control (Conf. Publ. No. 336), p. 38-43, IEE, London, 1991.
3. TENSCHERT, W. **Fault location using fault distance measurement of digital relays**. 12th International Conference on Electricity Distribution. CIRED (Conf. Publ. No. 373), p. 4.20.1-4, IEE, London, 1993.
4. SENGER, E.C. **Localizador de faltas para redes de distribuição**. III Conladis, Setembro 1998.
5. JÄRVENTAUSTA, P. **Using fuzzy sets to fault location in distribution networks**. Physica Verlac. Nova Iorque, 1998.
6. ZHU, J.; LUBKEMAN, D.L.; GIRGIS, A.A. **Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No. 2, April 1997.
7. IEEE. **Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems**. 27 de Junho de 1991.
8. JARDINI, J.A.; TAHAN, C.M.V.; ATMAN, J.L.; AHN, S.U.; FERRARI, E.L. **Distribution transformer loading evaluation based on load profiles measurements**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No. 4, p. 1766-70, October 1997.
9. JARDINI, J.A.; BOCCUZZI, C.V.; FERRARI, E.L.; ATMAN, J.L.; AHN, S.U.; FARIA, F. **Aplicação de curvas de carga residenciais medidas para avaliação da diversidade de cargas**. XIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia elétrica. São Paulo, Maio 1997.
10. JARDINI, J.A.; CASOLARI, R.P.; FERRARI, E.L.;

TAHAN, C.M.V.; AHN, S.U.; BASSOTELLI, F.J.; FARIA, F. FIQUEIREDO, F.M. **Curvas diárias de carga de consumidores comerciais e industriais.** XIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia elétrica. São Paulo, Maio 1997.

11. HOROWITZ, S.H.; PHADKE A.G. **Power system relaying.** Research Studies Press, 1992.
12. BLACKBURN, J. L. **Protective relaying - Principles and applications.** 1987.