

FRANCIELE CRISTINA CAVALHEIRO

**EMPREGO DE MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

Co-orientador (a): Dr. Mauricio Sperandio

Alegrete
2012

CIP – Catalogação na Publicação

C377e Cavalheiro, Franciele Cristina

Emprego de mapas auto-organizáveis para localização de faltas em redes de distribuição / Franciele Cristina Cavalheiro. – 2012.

117 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pampa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Alegrete, 2012.

“Orientador: Daniel Pinheiro Bernardon.”

1. Energia elétrica. 2. Redes de distribuição de energia. 3. Mapas auto-organizáveis. I. Título.

CDU: 621.31

Ficha elaborada pela bibliotecária Marlucy Veleda Farias - CRB 10/2067

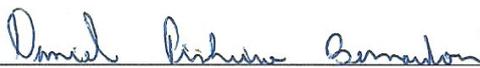
FRANCIELE CRISTINA CAVALHEIRO

**EMPREGO DE MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS PARA LOCALIZAÇÃO
DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

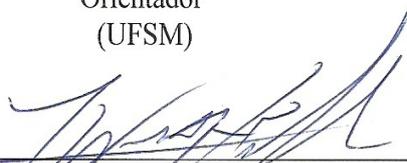
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia

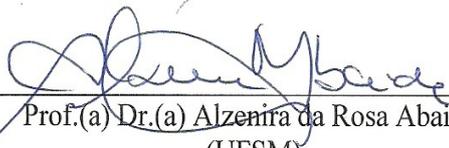
Dissertação defendida e aprovada em: 19 de outubro de 2012
Banca examinadora:



Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon
Orientador
(UFSM)



Prof. Dr. José Wagner Kaehler
(UNIPAMPA)



Prof.(a) Dr.(a) Alzenira da Rosa Abaide
(UFSM)

Dedico essa dissertação aos meus pais, Renato e Sirlei, á minha irmã, Larissa, e ao meu namorado, Tiago, por me apoiarem em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me ajudar a chegar até aqui, ter me dado forças pra enfrentar as dificuldades encontradas no decorrer do mestrado.

Agradeço aos meus pais, Renato e Sirlei, e a minha irmã, Larissa, que sempre estiveram do meu lado, dando-me total apoio para minhas ações.

Em especial, agradeço a minha Vó (in memoriam), que sempre esteve comigo, olhando-me e me guiando pelo caminho certo.

Agradeço ao meu namorado, Tiago, que, apesar da distância, soube compreender, me apoiando e me incentivando nessa caminhada.

Agradecimento especial aos meus colegas de mestrado, Adir, Cleverton, Diego, Everson, Lucas. M, Marcelo, Marthielo, Sérgio e Wagner, pelo companheirismo durante a fase de créditos.

Agradecimento também aos professores do PPGEE, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon, que sempre esteve me ajudando, dando conselhos nos momentos de elaboração deste trabalho. E ao meu co-orientador, Prof. Dr. Mauricio Sperandio, pelas valiosas orientações no desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus amigos das Engenharias Elétrica, Civil e Mecânica, que sempre estiveram me incentivando.

Enfim, a todos que acompanharam e contribuíram de certo modo para realização dessa dissertação.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.”

Roberto Shinyashiki

RESUMO

As distribuidoras de energia elétrica devem estar preparadas para restabelecer o fornecimento de forma ágil, sempre respeitando os critérios de segurança e os índices de continuidade e qualidade compatíveis com o estabelecido na legislação vigente. A possibilidade de localizar defeitos remotamente acelera o processo de restabelecimento. Apesar dos próprios relés e religadores microprocessados fornecerem uma indicação com base na impedância de curto-circuito, ela não é precisa para sistemas de distribuição, uma vez que as redes apresentam várias bifurcações (ramais) protegidas por elementos fusíveis e diferentes bitolas de condutores.

Entretanto, atualmente há vários métodos como revelam as pesquisas, que tentam estabelecer maior precisão dos dados e resultados ali envolvidos, buscando criar uma inovação e satisfação às empresas do setor elétrico.

Assim, a proposta deste projeto é desenvolver uma metodologia diferencial para localização de faltas em redes de distribuição a partir de estudos da rede combinados com a monitoração remota de dispositivos de proteção (relés e religadores microprocessados). Estas variáveis de entrada: corrente de carga (corrente pré-falta), corrente de curto-circuito, corrente pós-falta; serão obtidas em tempo real pelo SCADA no momento da ocorrência de uma falta na rede. As medidas obtidas serão comparadas e classificadas por Mapas Auto-Organizáveis ou SOM (*Self-Organizing Map*) de acordo com os padrões de dados simulados pelos estudos da rede.

A partir do método proposto será possível estimar o local do defeito ocorrido na rede elétrica por meio do mapa que melhor se identifica com os dados medidos.

Essa pesquisa foi aplicada no estudo de caso de uma concessionária da região central gaúcha, a qual alcançou resultados bastante satisfatórios, obtidos a partir de dados reais.

Palavras-chave: Curto-circuito, Equipamentos Telecomandados, Localização de Faltas, Mapas Auto-Organizáveis, Redes de Distribuição.

ABSTRACT

The power utilities must be prepared to restore the supply in an agile way constantly respecting the safety criteria and indexes of continuity and quality consistent with the current legislation. The ability to remotely locate defects accelerates this healing process. Despite own microprocessor relays and reclosers provide an indication based on the short circuit impedance, it is not applicable to distribution systems, since the networks present various bifurcations (branch lines) protected by fuse elements and different wire gauges.

However, today there are several methods such as surveys show, trying to establish more precisely the data and results here involved, seeking to create an innovation and satisfaction to the electric companies.

Thus, the aim of this project is to develop a methodology for distinct fault location in distribution feeders. It will combine network studies with remote monitoring of protective devices (microprocessor relays and reclosers). These input variables: load current (pre-fault current), short circuit current, post-fault current; will be obtained in real time by SCADA when a fault occurs in the network. These measures will be compared and ranked by Self-Organizing Maps (SOM) according to the patterns obtained by simulation studies of the network.

With this method, it will be possible to assess the location of the defect occurring in the power grid, identifying the best map that resembles with the measured data.

This research was applied in a power utility in the South of Brazil as case study, which achieved satisfactory results obtained from real data.

Keywords: Short-circuit, Remote Control Equipment, Fault location, Self-Organizing Maps, Distribution Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Corrente de Curto-Circuito intermediário.....	39
Figura 3.2- Curto-circuito de Alta Impedância	40
Figura 3.3- Diagrama unifilar de uma FAI fase-terra.....	41
Figura 3.4- Demonstração das corrente assimétrica e simétricas.....	44
Figura 3.5- Componentes simétricos- a) sequencia positiva; b) sequencia negativa; c) sequencia zero.....	47
Figura 3.6- Diagrama unifilar de uma rede de distribuição.....	48
Figura 3.7- Curto monofásico-terra	52
Figura 3.8- Curto-circuito monofásico	53
Figura 3.9- Curto bifásico-terra	54
Figura 3.10- Curto-circuito bifásico	55
Figura 3.11- Curto-circuito trifásico.....	56
Figura 4.1- Blocos componentes do relé digital	63
Figura 4.2- Arquitetura do Relé.....	63
Figura 4.3- Partes do fusível.....	66
Figura 4.4- Gráfico da corrente em função do tempo da atuação dos elos fusíveis	67
Figura 4.5- Arquitetura da rede com Religador.....	70
Figura 4.6- Religador telecomandado	70
Figura 4.7- Curvas do comportamento do religador e fusível.....	71
Figura 5.1- Arquitetura do sistema proposto	75
Figura 5.2- Transformação $\phi: \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{S}$ em mapas 4x4 com conexões hexagonais.....	76
Figura 5.3- Mapa ou rede hexagonal com 16 modelos (4x4).....	77
Figura 5.4- As três fases do processo de auto- organização; a) base de dados/ configuração inicial; b) mapa treinado; c) distribuição de densidade	79
Figura 5.5- Mapa 6x6 treinado com os valores da Tabela 5.1.....	81
Figura 5.6- Intensidade das correntes para o mapa treinado	82
Figura 5.7- Fluxograma da metodologia proposta	83
Figura 5.8- Curto-circuito na troncal	84
Figura 5.9- Corrente de pós-falta igual a zero	85
Figura 5.10- Curtos-circuito em ramais.....	85
Figura 5.11- Local com defeito	86
Figura 6.1- Rede de distribuição do AL5	88
Figura 6.2- Tela da ferramenta computacional aplicada para localização de defeitos	89
Figura 6.3- Localização do defeito na rede de distribuição; a) vista geral da topologia da rede; b) vista ampliada mostrando o transformador 166 como referência da falta na rede.....	90
Figura 6.4- Localização do defeito para CC monofásico de 297A	91
Figura 6.5- Gráfico da distância da falta para clima úmido em função da diferença da distância da falta para clima seco	95
Figura 6.6- Gráfico da distância da falta para clima úmido em função da diferença da distância da falta para clima seco	98
Figura 6.7- O gráfico mostra os valores da diferença de CC calculados da tabela para dias úteis.....	103
Figura 6.8- O gráfico mostra os valores da diferença de CC calculados da tabela para o sábado.....	104

Figura 6.9- O gráfico mostra os valores da diferença de CC calculados da tabela para os domingos e feriados105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Tipos de resistências de contato de solo.....	41
Tabela 4.1 - Elos tipo K.....	68
Tabela 4.2- Coordenação dos elos.....	68
Tabela 5.1- Exemplos de informações usadas no treinamento do SOM.....	80
Tabela 6.1- Variáveis medidas pelo RL 452	89
Tabela 6.2- Valores da distância da falta em relação ao religador	92
Tabela 6.3- Valores da distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.4- Valores da distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.5- Valores da distância da falta em relação ao religador.....	93
Tabela 6.6- Valores da distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.7- Valores da a distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.8- Valores da distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.9- Valores da distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.10- Valores da distância da falta em relação ao religador	93
Tabela 6.11- Distância da falta (Km) em função da diferença (%) climática	94
Tabela 6.12- Valores da distância da falta em relação ao religador	96
Tabela 6.13- Valores da distância da falta em relação ao religador	96
Tabela 6.14- Valores da distância da falta em relação ao religador	96
Tabela 6.15- Valores da distância da falta em relação ao religador	96
Tabela 6.16- Valores da distância da falta em relação ao religador	96
Tabela 6.17- Valores da distância da falta em relação ao religador	96
Tabela 6.18- Valores da distância da falta em relação ao religador	97
Tabela 6.19- Valores da distância da falta em relação ao religador	97
Tabela 6.20- Valores da distância da falta em relação ao religador	97
Tabela 6.21- Distância da falta (Km) em função da diferença (%) climática	98
Tabela 6.22- Relatório dos valores de curtos-circuitos simulados para os diferentes patamares	101
Tabela 6.23- Relatório dos valores de curtos-circuitos simulados para os diferentes patamares	102
Tabela 6.24- Valores calculados em % da diferença das correntes de CC com corrente de carga em função das correntes de CC sem corrente de carga.....	103
Tabela 6.25- Valores calculados em % da diferença das correntes de CC com corrente de carga em função das correntes de CC sem corrente de carga.....	104
Tabela 6.26- Valores calculados em % da diferença das correntes de CC com corrente de carga em função das correntes de CC sem corrente de carga.....	105

LISTA DE SIGLAS

AM/ FM/ GIS- Mapeamento Automatizado/ Gerenciamento de Instalações/ Sistema de Informação Geográfica
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFIS – Sistema Adaptativo de Interferência Fuzzy
AT – Alta Tensão
ATP- Alternative Transient Program
BT – Baixa Tensão
CC- Curto- Circuito
CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais
CWT- Transformada Wavelet Contínuo
DEC- Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
DJ- Disjuntor
FAI- Falta de Alta Impedância
FEC- Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora
GA- Algoritmo Genético
GPRS - General Radio Packet Service
IA- Inteligência Artificial
IEDs- Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF- Integral Fuzzy
kHz- Kilo Hertz
LOCFALT- Localização de Falta
MHz- Mega Hertz
MICT- Método de Injeção de Correntes Trifásicas
MT – Média Tensão
P & D- Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento
PPGEE – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
PRAO- Paradigma da Modelagem Orientada a Objetos
RAM – Random Access Memory
RL- Religador
RNA – Redes Neurais Artificiais
RNA- Rede Neural Artificial
RSI- Relé de Sobrecorrente Instantâneo
RSTD- Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido
RSTI- Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso
RSTMI- Relé de Sobrecorrente de Tempo Muito Inverso
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition
SE- Subestação
SGD- Sistema de Gerenciamento da Distribuição
SOM – Self-Organizing Map (Mapa Auto-Organizável)
UFMS – Universidade Federal de Santa Maria
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa
USP- Universidade de São Paulo
CFLCL- Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina

LISTA DE SÍMBOLOS

%- Sensibilidade
 I_a - Corrente de fase a
 I_b - Corrente de fase b
 I_c - Corrente de fase c
 $I_{cc1\phi}$ - Corrente de Curto Monofásico
 $I_{cc1\phi tmin}$ - IIFT- Corrente de Curto Monofásico- terra mínimo
 $I_{cc2\phi}$ - Corrente de Curto bifásico
 $I_{cc2\phi t}$ - Corrente de Curto bifásico- terra
 $I_{cc3\phi}$ - Corrente de Curto trifásico
 I_f - Corrente de falta
 I_e - Corrente nominal do elo
 I_n - Corrente nominal do trecho
 R_f - Resistência de falta
 S_b - Potência base
 V_a - Tensão na fase a
 V_b - Tensão base
 V_b - Tensão na fase b
 V_c - Tensão na fase c
 $Z_0 = R_0 = X_0$ - Impedância de sequencia zero
 $Z_1 = R_1 = X_1$ - Impedância de sequencia positiva
 $Z_2 = R_2 = X_2$ - Impedância de sequencia negativa
 Z_b - Impedância base
 Z_f - Impedância de aterramento
C %- Taxa de crescimento anual
E - Espaço de entrada contínuo
F - Transformação não- linear
 $i(t)$ - Corrente em função do tempo
K- Constante do coeficiente de correção do circuito
n- Número de anos previsto
pu- Por Unidade
S - Espaço de saída discreto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	Objetivos	27
1.2	Estrutura do Trabalho	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	Localização de Faltas	29
2.2	Mapas Auto-Organizáveis (SOM).....	35
2.3	Diferenciais do Trabalho	37
3	MÉTODOS PARA CÁLCULOS DAS CORRENTES DE CURTOS-CIRCUITOS	39
3.1	Tipos de Curtos-Circuitos	42
3.2	Efeitos de Curtos-Circuitos	43
3.2.1	Definição da Corrente de Curto-Circuito	44
3.2.2	Curto-Circuito Equilibrado.....	46
3.2.3	Curto-Circuito Desequilibrado	46
3.2.4	Teorema de Fortescue.....	46
3.3	Cálculo das Correntes de Curtos-Circuitos	48
4	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	59
4.1	Relés	60
4.1.1	Relés de Sobrecorrente	61
4.1.2	Relé Digital	62
4.2	Chaves Fusíveis	65
4.3	Religadores	69
5	METODOLOGIA PROPOSTA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	73
5.1	Formulação do Problema	73
5.2	Metodologia Proposta	74
5.3	Mapas Auto-Organizáveis	75
5.3.1	Definição	76
5.4	Desenvolvimento da Metodologia Proposta	79
6	ANÁLISES EXPERIMENTAIS	87
6.1	Formulação do Problema.....	87

6.2	Localização de Falta.....	87
6.3	Análises de Sensibilidade Considerando Condições Climáticas	92
6.3.1	Simulações de curto-circuito monofásico-terra na troncal	92
6.3.2	Simulações de curto-circuito monofásico-terra nos ramais	96
6.4	Análise de Sensibilidade Considerando a Corrente de Pré-falta no Cálculo das Correntes de Curtos-Circuitos	99
6.4.1	Cálculo das correntes de curto-circuito considerando corrente pré-falta	100
6.4.2	Cálculo das correntes de curto-circuito não considerando corrente pré-falta	101
6.4.3	Cálculo Percentual das Diferenças.....	102
6.5	Análise Geral.....	106
7	CONCLUSÕES	107
7.1	Sobre a Localização de Falhas	107
7.2	Contribuições Originais	108
7.3	Artigos Publicados	108
7.4	Sugestões para Futuros Trabalhos	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

A continuidade no fornecimento de energia elétrica para os consumidores é um objetivo permanente das concessionárias, perseguido com o desenvolvimento de soluções tecnológicas para melhorar o desempenho da recomposição das redes afetadas pela descontinuidade. O propósito maior é minimizar o impacto no número de consumidores afetados, bem como reduzir o tempo necessário para restabelecimento do fornecimento.

Do ponto de vista dos consumidores de energia elétrica, pode-se individualmente verificar os prejuízos causados por uma interrupção no fornecimento. Do ponto de vista da empresa de energia elétrica, a tarefa de avaliar caso a caso as interrupções não programadas, visando a atender os prejuízos causados a cada consumidor, é uma ocupação bastante complexa, mas proporcionar uma continuidade relativamente segura é serviço primordial da empresa distribuidora (COMASSETTO, 2004).

Neste contexto, as concessionárias vêm empregando esforços para automação das redes de distribuição, com o objetivo de restabelecer a energia de forma mais ágil, resultando em melhores índices de continuidade, além de aumentar a satisfação dos consumidores. Uma solução cada vez mais empregada pelas concessionárias de energia é o uso de religadores telecomandados ao longo das redes de distribuição. Tais equipamentos propiciam supervisão, controle, comando e monitoramento a distância, por exemplo, a partir dos Centros de Operação. No entanto, é essencial o emprego de sistemas inteligentes para otimizar o uso destes equipamentos.

Com isso, uma das possibilidades e foco deste trabalho é a localização de defeitos nas redes de distribuição a partir do tratamento combinado das informações provenientes dos dispositivos de proteção em campo e análises computacionais. Apesar de os próprios relés e religadores microprocessados fornecerem uma indicação da possível localização de falta, com base na impedância de curto-circuito, ela não é precisa para sistemas de distribuição. Isso decorre que as redes apresentam características radiais, grande quantidade de bifurcações (ramais), diferentes bitolas de condutores ao longo das redes, entre outros. Neste caso, as técnicas usuais para sistemas de transmissão não se aplicam.

A proposta deste trabalho é desenvolver uma metodologia para localização de faltas em redes de distribuição a partir de estudos da rede combinados com a supervisão remota de dispositivos de proteção. No caso de ocorrência de algum defeito na rede de distribuição, o dispositivo de proteção (por exemplo, religador telecomandado) atuará e informará ao sistema

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) do Centro de Operação a fase que atuou, juntamente com outros valores de: corrente de carga, corrente de curto-circuito, corrente pós-falta, tensão, potência ativa e reativa, entre outras variáveis. De posse destes dados, a ferramenta proposta nessa pesquisa, um software implementado ao SCADA, pegará os dados informados em tempo real e os confrontará com análises computacionais (banco de dados históricos das variáveis da rede). Essa análise computacional será feita a partir do emprego de Mapas Auto-Organizáveis ou SOM (*Self-Organizing Map*), que identificarão no banco de dados históricos o mapa que melhor se aproxima das variáveis de entrada em tempo real da rede. Um mapa será selecionado indicando a provável localização do trecho de rede sob falta.

A definição das variáveis a serem usadas e o tratamento combinado destas, serão então realizados a partir do emprego de Mapas Auto-Organizáveis ou SOM (*Self-Organizing Map*). O SOM é um tipo de rede neural desenvolvido para reconhecimento de padrões (KOHONEN, 2001). O algoritmo realiza um processo de ordenação que acontece em três etapas e consiste em encontrar o modelo que melhor represente um conjunto de dados de entrada na rede (vencedor). As ligações servem para ajustar modelos de neurônios próximos ao vencedor (vizinhos) ao padrão de entrada. Assim, ao final de várias iterações o mapa apresenta os dados associados aos seus neurônios, de forma que padrões similares encontram-se em neurônios contíguos, tendo uma organização topológica. Deste modo, será possível identificar a correlação entre as variáveis, definindo-se quais realmente são necessárias no processo de localização de falta nas redes de distribuição.

Dando ênfase à pesquisa, após fazer a localização de falta utilizando a ferramenta computacional, será feita uma análise de sensibilidade para curto-circuito monofásico-terra, considerando as mudanças climáticas (seco e úmido). Nesse caso será possível analisar a diferença da distância do curto-circuito quando ocorrido em ambas as condições. Outra análise de sensibilidade será feita para o caso de consideramos a corrente de carga, onde também será possível analisar a diferença dos valores de curto-circuito quando usada a corrente de carga e quando não usada essa corrente para os cálculos dos curtos. Nos dois casos, as análises de sensibilidade têm o objetivo de mostrar de acordo com as simulações computacionais, a mudança causada na rede, ou seja, mostrar que, quando se altera uma variável, a localização do curto-circuito também irá mudar.

A localização da falta na rede proporciona redução nos tempos de restabelecimento de energia elétrica e a melhoria nos indicadores de índices de continuidade, caracterizado maiores benefícios para a empresa, além de o impacto na satisfação dos consumidores.

Ressalta-se que a principal contribuição é a originalidade da metodologia proposta, que reside na combinação de técnicas de análise da rede, confiabilidade e informações dos dispositivos de proteção supervisionados, obtendo resultados bastante satisfatórios.

1.1 Objetivos

Tem-se como objetivo principal nessa pesquisa o desenvolvimento de uma metodologia para Localização de Falhas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica, onde serão consideradas as variáveis de corrente pré-falta, corrente de curto-circuito, corrente pós-falta para determinar o local com defeito ocorrido da rede.

Para o cumprimento dessa metodologia, o SOM (Mapas Auto-Organizáveis) agrupará seus neurônios com as variáveis de entrada, conforme seu patamar e dia, classificando o mapa correspondente ao local da ocorrência com defeito.

Essa pesquisa busca mostrar uma metodologia diferencial, que possa trazer resultados satisfatórios e precisos para identificação e análise do defeito ocorrido.

Além disso, outros objetivos contribuintes para o cumprimento da metodologia serão propostos:

- Desenvolver uma metodologia inovadora para Localização de Falhas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica;
- Verificar os valores reais medidos a partir do sistema SCADA;
- Atribuir a ferramenta computacional junto ao SCADA para localização de falhas em redes de distribuição;
- Identificar a localização de curtos-circuitos em tempo real, por meio do tratamento combinado de simulações computacionais, supervisão e controle de religadores telecomandados;
- Aplicar os Mapas Auto-Organizáveis (*SOM: Self-Organizing Maps*) para agrupar os valores das grandezas elétricas de acordo com as variáveis de entrada;
- Identificar, interpretar e analisar os Mapas;
- Análise de sensibilidades: considerar as mudanças climáticas (úmido e seco) para curto-circuito monofásico-terra e o uso da corrente de carga (pré-falta) nos cálculos de curtos-circuitos monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico;
- Análise e comparação dos resultados simulados e comparados com os dados reais;

Entretanto, alguns objetivos gerais também podem ser destacados após o cumprimento da metodologia:

- Melhorar os Índices de Confiabilidade do Sistema;
- Diminuir o tempo de deslocamento das equipes de campo;
- Reduzir as penalidades à concessionária;
- Aumentar a satisfação dos consumidores;
- Elaboração de uma metodologia eficaz e satisfatória à concessionária.

1.2 Estrutura do Trabalho

A dissertação será composta por 7 capítulos:

➤ No primeiro capítulo apresenta-se a Introdução da dissertação, dividida em duas partes: Objetivos e Estrutura do Trabalho. Esse capítulo traduz o foco da pesquisa, juntamente com a sua metodologia que será aplicada na Localização de Faltas.

➤ O segundo capítulo faz uma Revisão Bibliográfica, na qual serão analisados diferentes métodos para Localização de Faltas, com enfoque especial no método sobre Mapas Auto-Organizáveis utilizados nesta pesquisa. Também destaca os diferenciais da mesma.

➤ Já o terceiro capítulo traz os métodos para os Cálculos de Curtos-Circuitos, os quais são: Curto Monofásico Terra-Mínimo; Curto Monofásico; Curto Bifásico; Curto Bifásico-Terra e Curto Trifásico. Através destes cálculos, será possível prevermos os valores das correntes para cada tipo de curto-circuito.

➤ O quarto capítulo descreve as características dos dispositivos de proteção e manobra de uma rede de distribuição, abordados para realização desta pesquisa.

➤ Já o quinto capítulo descreve a metodologia aplicada, a qual mostra as variáveis de entrada que irão compor a base no algoritmo SOM, junto com seu desenvolvimento para Localizar Faltas na Rede.

➤ O sexto capítulo traz a aplicação da metodologia, mostrando os resultados obtidos e simulados na ferramenta computacional. Traz a análise de sensibilidades com seus diferenciais e comparações de dados.

➤ Por fim, no sétimo capítulo são feitas as considerações finais, as quais abordam tudo o que foi visto anteriormente de forma resumida, fazendo-se uma análise da metodologia usada para a Localização de Faltas. Também traz publicações, contribuições e sugestões para trabalhos futuros em continuidade a essa pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema “Localização de Faltas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica” é uma das grandes preocupações das Concessionárias de Distribuição de Energia.

Um dos fatores que os leva a busca por recursos de Localização é o aumento dos indicadores de continuidade, os quais causam perdas econômicas, além da insatisfação dos consumidores pela demora no restabelecimento de energia, pois muitas vezes a equipe de atendimento pode demorar horas até localizar o trecho de defeito na rede.

Esses defeitos podem ocorrer por diversos fatores: curtos-circuitos provocados por galhos de árvores, tempestades ou mesmo pelo mau estado dos cabos ou equipamentos de proteção, entre outros. No caso de ocorrer um defeito num determinado trecho da rede, os dispositivos de proteção atuam de modo a isolar o trecho atingido pela falta, impedindo a sua propagação e melhorando a confiabilidade do sistema.

Em questão, as faltas podem ser consideradas transitórias ou permanentes. Considerando apenas permanentes, esta terá seu tempo de duração superior a três minutos, tempo estipulado de acordo com a legislação vigente, caso contrário a falta será considerada uma interrupção temporária.

Enfim, as faltas permanentes requerem o deslocamento de uma equipe para inspeção do local do defeito, para após o sistema ser reparado e religado. Com isso, nesse capítulo, pode-se destacar várias metodologias sobre localização de faltas, com objetivo de refletir e analisar as diferentes técnicas/ métodos em função da sua identificação.

Também faz-se uma revisão sobre o método utilizado nessa pesquisa, o “SOM” (Mapas Auto-Organizáveis), destacando-se alguns trabalhos que o utilizam para outras áreas, mas com o mesmo propósito de aproximar com precisão os resultados do real.

2.1 Localização de faltas

Dando ênfase à Localização de Faltas, esse capítulo aponta algumas pesquisas mais antigas e atualizadas (artigos, dissertações e teses), com métodos distintos, a fim de demonstrar a comprovação e eficiência dos mesmos.

Entretanto, as técnicas para Localização de Faltas pode ser dividida em três categorias:

➤ Técnicas baseadas em tensões e correntes de frequência fundamental, principalmente na medição de impedâncias;

➤ Técnicas baseadas em ondas viajantes e componentes de altas frequências;

➤ Técnicas baseadas no conhecimento. Este método também pode ser classificado em três categorias:

➤ Inteligência artificial e métodos com base em de análise estatística;

➤ Métodos de dispositivos distribuídos;

➤ Métodos híbridos.

Com essas três técnicas, atualmente há uma grande quantidade de trabalhos publicados, tanto que segue abaixo a literatura de alguns autores que abordam esses diferentes métodos para a Localização de Falhas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica:

Segundo Lehtonen, Pettissalo e Etula (1991), para a Localização de falha discute-se o efeito das correntes de carga, das falhas resistentes, variação das redes independentes e medição precisa da localização das falhas ocorridas. Sugerem duas formas para a localização: uma é a medição da tensão e corrente na subestação, utilizando cálculo da distância da falta até a subestação; a outra é medir as correntes de curto-circuito para estimar a resistência da falta através da corrente de falta e comprimento do arco elétrico ocasionado pela abertura de uma chave fusível. Ressaltam que a determinação do tamanho do arco elétrico, afeta a precisão exata da localização da falta.

Em Zhu et al. (1997), fala que a localização de falhas e diagnósticos é capaz de diagnosticar precisamente o local da ocorrência da falta, baseado na integração de informações disponíveis desde a gravação de perturbações, com o conhecimento contido na distribuição do banco de dados do alimentador. Esse diagnóstico pode também ser aplicado na investigação temporária das falhas em que não deve resultar em um fusível queimado. Esse algoritmo proposto é baseado na análise do estado estável da falha de distribuição da rede.

Girgis e Fallon (1997) mostram um sistema de transmissão com variações de carga, ou seja, no momento de uma falha, a corrente e tensão são obtidas em seus diferentes níveis, estes utilizados para encontrar a falta através da classificação do tipo de falta e tipo de fase. Nisto a impedância aparente é calculada e comparada com a impedância do alimentador, dando precisão do local do defeito, ou seja, traz convenções de arquivos viáveis de dados e de técnicas desenvolvidas para alcançar a máxima precisão em determinar a localização da falha.

De acordo com Zhu et al. (1997), a localização de faltas pode ser estimada através de um algoritmo, o qual busca através da corrente de falta medida na subestação, estimar o local da mesma com base na modelagem e análise probabilística, onde é possível lidar com

múltiplas possibilidades de locais da falta. A partir de um diagnóstico de falha estratégica é então aplicado para identificar o real local com defeito.

Em outro trabalho, Lehtonen et al. (2001), diz que as condições da rede não permitem que ocorram muitas mudanças, devido ao fato das redes não serem completamente automatizadas. Por isso sugere um modelo computacional automático chamado FI-model para localização das falhas de rede e isolamento e suprir a necessidade recente de restauração. O modelo trabalha com uma parte da subestação através de SCADA integrada e uma voltagem média do sistema de rede de distribuição automático, incluindo protetores e AM/FM/GIS (MAPEAMENTO AUTOMATIZADO/GERENCIAMENTO DE INSTALAÇÕES/SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRAFICA). Foi usado os modelos para identificação da falta: comparar a falha da corrente medida no computador; se obtém a estimativa da distância; combina-se essa informação com os dados obtidos dos indicadores na linha de ramificações e na ausência de melhores dados, as informações estatísticas de frequência das falhas são usadas. Com isso, após achar a falta, ela é isolada pelas chaves.

Thomas et al. (2003), usa correlação da função entre a onda incidente e a onda refletida para localizar faltas no sistema de distribuição. Traz o método de ponta dupla, que pode proporcionar um resultado preciso, se a falta ocorrer na linha onde detectores foram instalados. Um dos aspectos negativos destes métodos é a necessidade de dispositivos de medição com uma taxa de amostragem muito alta (MHz).

Segundo Lee et al. (2004), descreve um algoritmo de localização de faltas eficaz, no qual sua proposta faz um diagnóstico inteligente da mesma, onde o sistema estima os locais de faltas através da corrente de carga e corrente pós-falta em cada seção de linha. Após é feita a localização pela análise do algoritmo, comparando as correntes de carga inicial e final.

Na tese escrita por Renato de Arruda Penteado Neto (2005), aborda-se os efeitos causados pelo rompimento de condutores, nos quais têm-se em vista acidentes com seres vivos levando á morte, também ressalta o prejuízo financeiro as concessionárias, causado pela interrupção no fornecimento de energia elétrica. De acordo com esses fatores, para minimizar as causas que levam ao rompimento de condutores, sugere criar um sistema que detecte o local do rompimento do condutor e informe diretamente à concessionária. Desenvolveu um método com dois sistemas, um baseado na aplicação de sensores de corrente elétrica, os quais irão informar a central quando ocorrer uma falta de alta impedância e outro sistema usando a técnica da extensometria, onde foi instalado um extensômetro nos isoladores, que após o rompimento de um cabo sinaliza e informa na central. Ambos os sistemas se complementam.

Contudo, o trabalho de dissertação de mestrado de Edgard Pereira Cardoso (2006) sobre localização de faltas permanente, traz o desenvolvimento de um programa chamado de LOCFALT, criado para ajudar os Centros de Operação de Distribuição nos desligamentos com perda de carga. Essa localização, antes de ter o programa, era feita através de telefonemas realizados a central de atendimento devido a sua falta de energia, estes repassavam para o Centro de Operação de Distribuição, os quais enviavam as equipes para visualizar as linhas e tomar possíveis atitudes. Com o programa, é possível localizar as Faltas através do sistema de geoprocessamento da CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais, o qual possui informações detalhadas dos dados físicos e elétricos das linhas de distribuição obtidas a través do SCADA, assim classificando a possível localização da Falta.

De acordo com Salim et al. (2006), traz um esquema de diagnósticos para sistemas de distribuição de energia composto: detecção e classificação de falhas que traz a técnica baseada em Wavelet, localização de falhas baseada na impedância e tensão da rede local, atual, como fatores fundamentais. Na detecção da secção de falha, este artigo traz o método baseado na rede neural artificial, o qual usa o local atual e sinais de tensão para estimá-la. O artigo traz um esquema híbrido que foi validado com o ATP através de simulações.

Borgheti et al. (2006), propõe o método baseado na Transformada Wavelet Contínuo (CWT) para a análise de transientes de tensão na linha de falhas. Existe correlação entre as frequências típicas dos sinais CWT- transformados e caminhos específicos das ondas que viajam originados pela falha. Níveis de incerteza mostrados inferior a 200 Hz sobre a estimativa da frequência associada aos caminhos cobertos pelas ondas que viajam. Este valor fornece uma indicação da incerteza da localização do defeito estimado. O sistema implementado que era equilibrado e preciso, nessa abordagem é baixa demais.

Em Senger et al. (2006), propôs-se um método baseado num sistema automatizado em redes de distribuição, o qual é capaz de identificar os locais mais prováveis da falha de modo preciso e rápido. São usados dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), instados na subestação, os quais armazenam dados de informações da topologia da rede e seus parâmetros elétricos. A partir destes dados acessados pelo algoritmo proposto, é possível ter uma melhor estimativa do ponto da falta.

Liao (2007) propõe um algoritmo para estimar os parâmetros da linha de sequência positiva, utilizando os valores de tensão e corrente medidos em diferentes tempos de operação. Uma vez que os parâmetros da linha são estimados, é possível avaliar o local da falta na rede.

Já em Mokhlis e Li (2007), aborda-se um método que trabalha a magnitude da tensão real e ângulo de fase, através da análise das simulações e armazenamento em um banco de dados. O método é simples e sua implementação requer apenas uma única medição no ponto monitorado. Quaisquer alterações, tais como variação de cargas ou reconfiguração da rede poderia ser adaptado por este método, atualizando a base de dados.

Khosravi et al. (2007), desenvolve-se em seu trabalho uma estrutura para detecção de falhas e modelagem quando a incerteza na planta estava presente. No método proposto, um alarme foi disparado quando a inconsistência entre os comportamentos da temperatura do sistema e do modelo emerge. O comportamento do sistema defeituoso é modelado usando um Adaptive Neuro Sistema de Inferência Fuzzy (ANFIS).

Em Pereira et al. (2008), traz um método baseado no fluxo de potência pelo método de injeção de correntes trifásicas (MICT) e permite a análise de sistemas trifásicos desbalanceados na presença de qualquer tipo de falta. Esse método foi implementado na plataforma desenvolvida no projeto de P&D intitulado “Extensão do Programa de Fluxo de Potência Trifásico (MICT) e sua integração ao Sistema de Gerenciamento da Distribuição (SGD) e ao aplicativo PRAO”, o qual utilizou os paradigmas da Modelagem Orientada a Objetos e aliado à biblioteca de funções gráficas OpenGL. O programa trabalha com as coordenadas georeferenciadas UTM, permitindo o mapeamento e cadastramento de redes elétricas.

Segundo Oliveira et al. (2008), descreve o uso de um modelo para simular faltas em relés, o qual é baseado no software ATP (*Alternative Transient Program*), para simular redes de energia elétrica em regimes transitório e permanente, e realiza também cálculos de curtos-circuitos. Modelo testado em relés na COSERN (Companhia Energética do RN).

Em Decanini e Minussi (2008), descreve-se uma pesquisa baseada nos conceitos da lógica fuzzy, que irá trabalhar com faltas de curto-circuito em subestações de distribuição de energia elétrica. Desenvolveram-se algoritmos inteligentes modulares para a realização do diagnóstico do estado do sistema. Estes auxiliam a tomada de decisão no ambiente de subestações de distribuição de energia elétrica. Os dados representativos do comportamento do sistema sob as diversas condições de falta foram obtidos através de simulações de um alimentador radial no software ATP.

Riani et al. (2008), mostra em seu trabalho o método sobre modelagem trifásica a quatro fios, que fará a localização de falta através da análise de representação explícita do condutor neutro e das impedâncias de aterramento das barras e dos transformadores, permite calcular diretamente as tensões e correntes dos neutros e dos aterramentos do sistema sob

defeito. Considera-se também o desequilíbrio da rede e da carga entre as fases, onde permite-se avaliar a influência da carga no afundamento de tensão.

Outra metodologia comprovada por Oliveira et al. (2008), traz a identificação de seção faltosa, para a restauração e operação dos sistemas. Este método estima a seção faltosa de um sistema de distribuição desequilibrado, com a utilização de ondas viajantes e a teoria da autocorrelação, e que foi desenvolvido utilizando apenas dados locais, exigindo investimentos econômicos relativamente baixos para sua construção. Desenvolvida na plataforma MATLAB (The Math works Inc., 2006) e aplicada em uma versão modificada do IEEE 13-bus node test feeder, que foi simulada no software EMTPRV (Development Coordination Group, 2006).

Entre as várias metodologias também é de grande importância destacar o trabalho de Abreu et al. (2008), que aborda o método para localização de faltas em redes rurais. Este traz um sistema de detecção e localização de faltas em redes de distribuição rurais, utiliza os sinais de sensores de campo elétrico e de campo magnético, instalados próximos à rede para a análise das contingências. Esse trabalho foi realizado para a CFLCL (Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina) a fim de melhorar o tempo de Atendimento e os Indicadores de Continuidade (DEC/FEC). Através desse sistema instalado, o equipamento comunica-se diretamente com a central de atendimento da concessionária por via rádio, telefonia celular, telefonia via satélite. O sistema detecta falta fase-terra, fase-fase, trifásica e algumas de alta impedância.

Mora et al. (2009), traz na sua metodologia para localização de faltas um modelo estatístico obtido a partir da extração da magnitude da tensão, registrado durante o evento de falha, juntamente com os parâmetros topológico da rede, ou seja, a partir das medições de tensão armazenadas com base nos dados de falha. A determinação de grupos definidos, permite a otimização na classificação de dados, assegurando uma boa precisão. Uma característica importante é o baixo custo de investimento para a execução do sistema de detecção de falta com base no método proposto.

De acordo com Fábio Jose de Andrade et al. (2009), aborda a instalação de um sinalizador luminoso de falta nos três fios de média tensão. Desenvolvido pela CPFL, em parceria com a Expertise Engenharia e a USP, esse método faz a Localização da Falta através de sensores que iluminam o possível trecho danificado sinalizando para as equipes de campo.

Mirzaei et al. (2009), descreve em seu trabalho um método baseado na transmissão do local da falta por ondas viajantes. Neste caso, falha técnica pode ser localizada com alta precisão, embora precise de mais equipamentos adicionados, como o sistema GPS temperatura, detectores de falhas e diagnósticos por software.

O trabalho de Ferrarezi e Higa (2010) traz um método criado para a subestação ELEKTRO, sobre o estabelecimento de alimentadores e religadores em redes de distribuição, utilizando a corrente de curto-circuito associada a indicadores de corrente de falta dentro do sistema de gestão da distribuição SGD (Sistema de Gestão de Distribuição). Esse método pode ser usado para localizar faltas transitórias e assim servir de inspeção, no caso de ocorrer uma falta transitória. Para efetivação do método, é usada a integração do SCADA e do SGD para localizar as faltas, ou seja, a corrente de falta é indicada e disponibilizada pelo SCADA e interpretada no sistema SGD.

Pinheiro, Ulson e Campos (2010), falam sobre os alimentadores, onde a grande maioria é aérea, baseada em uma rede de sensores sem fio padrão IEEE 802.15.4 para aquisição de dados de tensão e corrente de cada fase do alimentador. A metodologia propôs a instalação de medidores, para captar essas informações transmiti-las a um elemento concentrador com a função de coordenar e determinar a ocorrência das falhas. Ressaltando que se deve instalar em todos os ramais e troncais os sensores nos três fios e a cada 100 metros dos equipamentos.

Entretanto, foram alguns métodos revisados nas últimas décadas com o objetivo de detectar falta em redes de distribuição, aprimorando cada vez mais a sua precisão de localização real do defeito.

2.2 Mapas Auto-Organizáveis (SOM)

Como já visto, esta pesquisa tem por finalidade localizar faltas, usando-se o método SOM com a finalidade de agrupar os dados da rede em um algoritmo, compondo neurônios que servirão de interpretação e identificação das faltas na rede de distribuição.

Este método, ainda pouco abordado em pesquisas para a localização de faltas, já teve grande repercussão em outras áreas e aplicações, algumas abordadas a seguir.

O algoritmo SOM, como é mais conhecido, foi introduzido na literatura pelo professor Teuvo Kohonen em 1982 (KOHONEN, 2001).

Já nos anos 90 começaram a surgir trabalhos que traziam o método como eficiente para classificação, agrupamento e reconhecimento de dados (KOHONEN, 2001).

Entretanto, pode-se destacar o método no trabalho de Sperandio (2004), o qual traz o SOM para Classificação de Conjuntos Consumidores de Energia Elétrica.

De acordo, o SOM é uma categoria de Rede Neural Artificial (RNA), a qual tenta descrever alguns fenômenos biofísicos que acontecem em neurônios biológicos reais, que se imaginam ser os elementos responsáveis pelo processamento de informações no cérebro (SPERANDIO, 2004).

Para utilizar o SOM, Sperandio (2004) usa-o para fazer uma seleção das variáveis a serem utilizadas no processo de organização, até a classificação dos grupos de acordo com a qualidade do fornecimento de seus integrantes. A partir dos dados atuais, são selecionadas as variáveis mais significativas pelo método da análise estatística multivariada, onde, através da validação cruzada entre um tipo de rede neural auto-organizável e o método estatístico das k-média, é feito o agrupamento dos conjuntos consumidores. Então esses grupos são classificados de forma a sinalizar quando o nível de continuidade seja inferior ao nível de referência, o que detectará incompatibilidades com a meta ou com o sistema elétrico.

Chen e Young (2005) traz no trabalho uma aplicação do SOM como mecanismo de pesquisa para o sistema dinâmico. É feito um esquema de aprendizagem que consiste do SOM e do sistema de destino dinâmico, onde é analisado o SOM em sua aprendizagem e depois o algoritmo genético (GA) é tomado para comparação, uma vez que esses dois sistemas de aprendizagem apresentam alguma semelhança na busca. Tanto o domínio do SOM e GA estão evoluindo, levando para buscas mais concentradas, até uma solução satisfatória ser encontrada. O desempenho proposto foi comparado e medido com os GA e filtros de KALMAN através de simulações.

Li et al. (2006), mostra no artigo que o SOM serve como um recurso para agrupar a experiência original de dados da teoria dos conjuntos aproximativos, independente de qualquer experiência no domínio e apenas com base na tabela de decisão de duas dimensões. A partir disso, e com base nesta idéia de cognoscibilidade, define-se as mesmas medidas: Valor máximo de cognoscibilidade, qualquer atributo contínuo para a estratégia de busca heurística utilizado na rede de agrupamento SOM e a redundância da taxa de atributo, como a valorização razoável para a redução do mesmo. Este novo modelo de reconhecimento padrão baseia-se na rede SOM heurística e teoria dos conjuntos aproximativos, é eficaz e melhorado.

Min e Dongliang (2009) apresentam o algoritmo SOM, baseado no estudo em tempo real do sistema de detecção de instrução. Onde leva o processo de chamada do sistema como objeto do estudo para ilustra o desempenho deste modelo. Onde é comparada a capacidade de detecção do algoritmo SOM com outros modelos de detecção de instrução através de simulações. Onde a utilização de redes neurais pode melhorar a velocidade de processamento do sistema e melhora a detecção de instrução para lidar com tempo real dos resultados.

Hussain et al. (2009), traz uma pesquisa de campo onde se utiliza o reconhecimento de caracteres para Urdu, rostos de script. O sistema nela proposto tem caráter segmentado como de entrada e reconhece-as em duas etapas: no primeiro passo de formas diferentes, os personagens são classificados em 33 categorias, usando o SOM pelo agrupamento automático de ligaduras semelhantes para classificação inicial. Durante o recurso de fase de extração de mais de 25 diferentes características, essas são extraídas de cada caractere e são transformadas para a final de reconhecimento de caracteres.

Ding, Tellez e Hu (2010), falam do mapeamento de vulnerabilidade de fluxo de detritos baseados no SOM. O artigo refere-se à suscetibilidade das pessoas, comunidades ou regiões com riscos naturais ou tecnológicos. Também define vulnerabilidade como uma combinação econômica potencial de dano social. A fim de medir a vulnerabilidade, os indicadores de ambos os âmbitos: econômicos e sociais. Usa-se a bacia Shengou, com riscos de fluxos de detritos, com seis indicações vulneráveis: estrutura de alojamento, data de construção, área de habitação (níveis, família e população, renda familiar). Assim combinados os indicadores com base em uma auto-organização (SOM), este método cria o mapa de detritos de vulnerabilidade de fluxo para descrever os níveis de vulnerabilidade da cidade na bacia Shengou, descrevendo ainda as condições da cidade e fornecendo uma base científica para atividades de prevenção de desastres.

Jirayusakul (2011), diz que o Mapa Auto-Organizável da rede neural é implementado como classificador de padrão. Na prática, alguns protótipos no SOM classificador podem não ser representantes de regiões de classe de pureza. Assim o processo de decisão de SOM requer informação tanto sobre o vencedor de protótipo quanto dos seus vizinhos, para melhorar a taxa de precisão. A técnica aplicada de Integral Fuzzy sobre o processo de decisão do classificador SOM pode melhorar a capacidade de generalização.

Com vimos na breve revisão bibliográfica sobre o SOM, diferentes aplicações e análises sobre essa rede neural podem ser usadas em diferentes áreas, com objetivo de obter maior precisão dos dados e resultados próximos do real.

2.3 Diferenciais do Trabalho

Após uma breve análise sobre os trabalhos publicados nas últimas décadas, podem-se destacar os principais diferenciais deste trabalho em relação aos apresentados:

➤ Desenvolvimento de uma metodologia inovadora para Localização de Falhas na Rede de Distribuição de Energia Elétrica, a partir do tratamento combinado de simulações computacionais, supervisão e controle de equipamentos telecomandados em tempo real;

➤ Consideração das seguintes variáveis de entrada da rede: corrente de carga, corrente de curto-circuito e corrente pós-falta, que serão obtidas em tempo real na integração com o SCADA;

➤ A partir dessas variáveis, pode-se aplicar o SOM (Mapas Auto-Organizáveis) para o agrupamento dos dados e uso para localização dos respectivos trechos de rede com defeito;

➤ Análise de sensibilidades: uma considerando as mudanças climáticas (úmido e seco) para o tipo de curto-circuito monofásico-terra e a outra considerando, ou não, a corrente pré-falta para o cálculo dos diferentes tipos de curtos-circuitos;

Essas contribuições visam obter resultados mais assertivos na localização de faltas na rede.

3 MÉTODOS PARA CÁLCULOS DAS CORRENTES DE CURTOS-CIRCUITOS

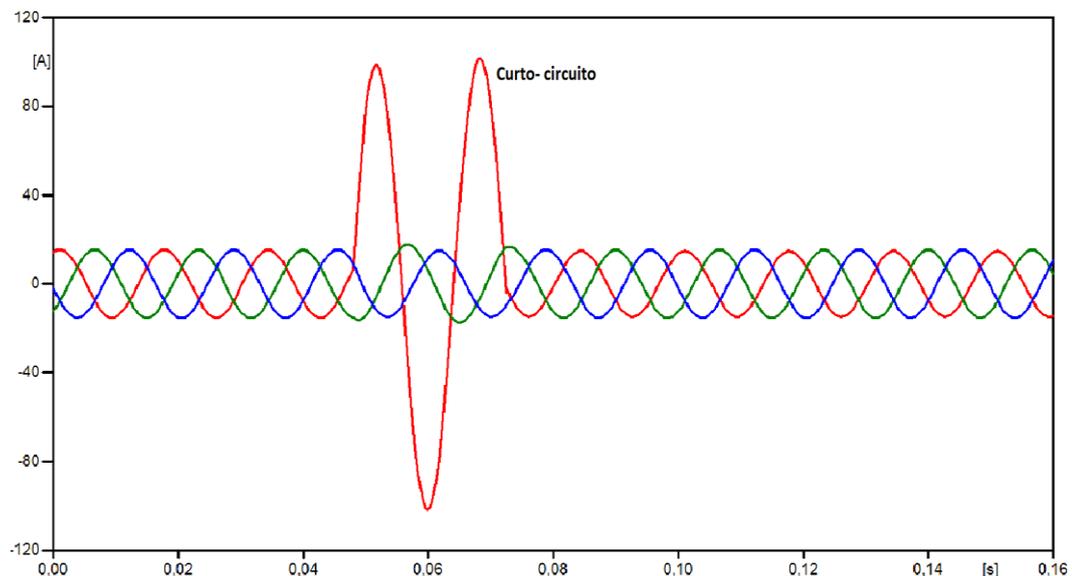
A ocorrência de uma falta ou falha na rede elétrica, provocada por um curto-circuito considera-se uma ligação de baixa impedância estabelecida entre dois pontos que devem permanecer com tensões diferentes.

Esse curto-circuito pode ser considerado como:

➤ Um curto por arco-metálico é chamado como ligação metálica. É uma das situações mais comuns encontradas na rede.

➤ Um curto causado por galhos de árvores ou objetos que caem na rede de distribuição, se apresenta como uma situação de curto intermediário. Neste caso há uma grande elevação da corrente elétrica acima do normal, podendo exceder de 10 a 100 vezes da corrente nominal do circuito (como mostra a Figura 3.1), o que irá provocar uma dissipação instantânea de energia, que vai se revelar na forma de sobretemperatura, faíscas e inevitavelmente explosão.

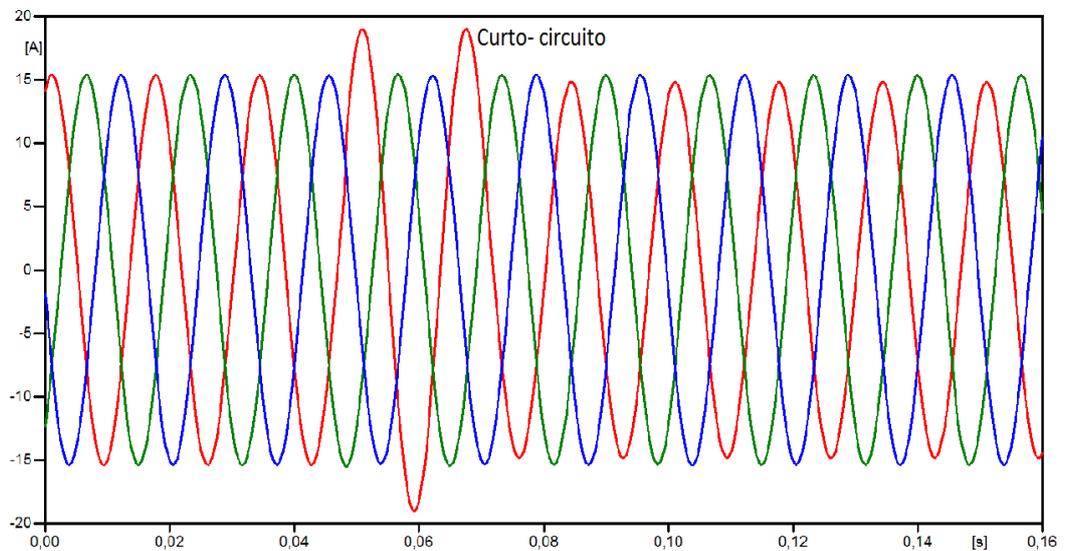
Figura 3.1 - Corrente de Curto-Circuito intermediário



Fonte: CAVALHEIRO, 2012

➤ Um curto ocorrido em circuitos de distribuição longos, a corrente de curto pode ser a mesma da corrente de carga. Neste caso, são chamados de curtos-circuitos de alta impedância (como mostra a figura 3.2).

Figura 3.2 - Curto-circuito de Alta Impedância



Fonte: CAVALHEIRO, 2012

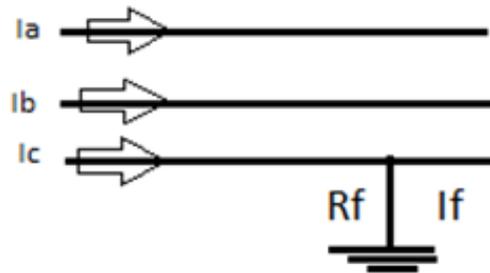
As faltas de Alta Impedância (FAIs) constituem uma categoria de faltas em sistemas de distribuição normalmente não levadas em conta no projeto dos sistemas de proteção utilizados. Uma falta pode ser definida como aquela que não pode ser detectada pelas proteções convencionais de sobrecorrente (MORETO, 2005).

Uma causa comum que ocorre nas FAIs é o rompimento de cabos e queda dos mesmos sobre o solo, além do contato de árvores ou objetos similares com a rede.

Entretanto, em sistemas de distribuição, as FAIs têm baixa magnitude, se comparadas com as faltas sólidas, pois elas têm resistência de falta muito elevada no curto-circuito, fazendo-se com que essa corrente de curto fique muito próxima do valor da corrente de carga, nisso confundindo-se pelo sistema de proteção.

As FAIs podem ser divididas em: fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase e trifásicas. Como mostra a figura 3.3, uma FAI fase-terra.

Figura 3.3 - Diagrama unifilar de uma FAI fase-terra



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Como mostra o diagrama da figura 3.3, a resistência da falta pode variar de acordo com as características de solo ou mesmo objetos. Conforme essa afirmação pode-se observar na tabela abaixo algumas resistências de solos, que variam de acordo com suas características (climas, solo).

Tabela 3.1 - Tipos de resistências de contato de solo

Superfícies	Impedância Média (Ohms)
Solo pantanoso	30
Concessionária (valor padrão)	40
Molhado/ concreto	75
Molhado/ grama	80
Molhado/ cascalho	80
Terra de cultura/ argilosa	100
Seco/ concreto	120
Seco/ cascalho	130
Terra arenosa	200
Seco/ grama	270
Terra de cerrado/ úmida	500
Terra cerrado/ arenosa/ seca	1000
Solo rochoso	3000
Molhado/ madeira	6000

Seco/ asfalto	Infinito
Seco/ madeira	Infinito
Molhado/ asfalto	Infinito

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Contudo, tanto as faltas de alta impedância, como as faltas intermediárias, proporcionam grandes riscos de segurança as pessoas, como também provocam riscos a própria rede elétrica e equipamentos de proteção.

3.1 Tipos de Curtos-Circuitos

Podem ser caracterizados de várias formas como, por exemplo:

1) Duração

➤ Auto-extinguível: como é o caso de um curto-circuito criado pela umidade. A temperatura desenvolvida nesse ponto pode provocar a secagem e assim eliminar o defeito.

➤ Transitório: a falha de isolamento pode introduzir uma impedância relativamente elevada que tende a manter-se originando uma intensidade de corrente superior ao valor da corrente de serviço, mas que na maior parte dos casos, rapidamente evolui para a corrente de curto circuito.

➤ Estacionário ou permanente: mantém-se no caso de não existir a atuação de um dispositivo de proteção.

2) Origem

Os curtos-circuitos podem ser causados por diferentes fatores como: falha na isolação líquida, sólida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores/condutores e terra; redução das distâncias entre os condutores/condutores e terra.

Contudo, a falha pode ser quebrada por algumas causa:

➤ Danos mecânicos: quebra de isoladores, quebra de suportes, queda de poste, entre outros;

➤ Uso abusivo: exigindo de um equipamento potência maior que a nominal provoca-se uma deterioração mais ou menos rápida da isolação que trabalhar a uma temperatura mais alta que a de projeto;

➤ Umidade: isolantes porosos (orgânicos e inorgânicos) apresentam uma redução rápida da sua rigidez quando absorvem umidade;

➤ Descargas parciais: as isolações sólidas sempre apresentam alguns vazios no seu interior. Sob ação do campo elétrico surgem nesses vazios, descargas que por vários mecanismos vão mais ou menos lentamente reduzindo a rigidez dielétrica até sua perfuração;

➤ Sobretensões: dois tipos de sobretensões podem levar a uma perfuração da isolação: as de manobra (ou internas), que ocorrem quando se efetua um desligamento (voluntário ou provocado) ou um ligamento de um circuito, e as atmosféricas que surgem nos condutores de um circuito (em baixa, média ou alta tensão) quando cai um raio nas proximidades ou diretamente nas linhas do circuito.

3) Os curtos circuitos podem ser quanto a sua forma do tipo:

➤ Monofásico-terra-mínimo;

➤ Monofásico;

➤ Bifásico-terra;

➤ Bifásico;

➤ Trifásico.

Aproximadamente 80% dos curtos-circuitos em redes de distribuição são monofásicos, 15% bifásicos e 5% trifásicos (COMASSETO, 2004).

3.2 Efeitos de Curtos-Circuitos

Devido ao fato da elevação de corrente, surgem os efeitos:

➤ O efeito mecânico: são os esforços mecânicos entre os condutores e equipamentos.

➤ O efeito térmico: é o aquecimento dos condutores ou equipamentos. Assim a corrente de curto-circuito deve ser calculada em cada nível de uma instalação elétrica, tendo em vista a determinação das características dos equipamentos necessárias a suportar a corrente de defeito.

➤ Efeito explosivo: é quando curtos-circuitos são originados através de arcos elétricos. Se não houver a atuação de um dispositivo de proteção, podem causar explosões e incêndios.

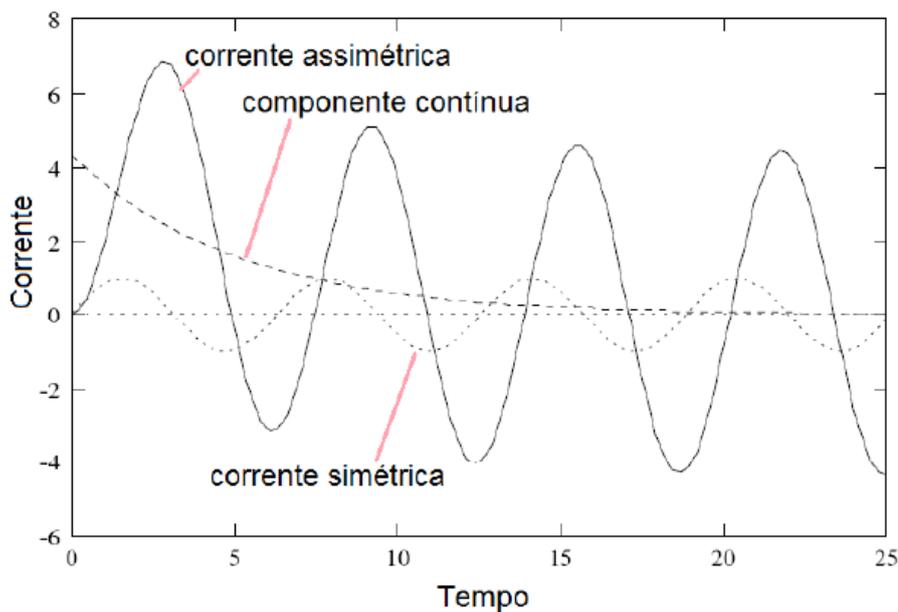
3.2.1 Definição da Corrente de Curto-Circuito

De acordo com a fórmula abaixo:

$$i(t)_{\text{assimétrica}} = i(t)_{\text{simétrica}} + i(t)_{\text{contínua}} \quad (1)$$

Pode-se dizer que a corrente assimétrica é igual a corrente simétrica somada com a corrente contínua como mostra a figura 3.4.

Figura 3.4 - Demonstração das correntes assimétricas e simétrica



Fonte: SANTOS, 2009.

Considerando que para baixa tensão e para alguns casos de média tensão, a magnitude da corrente assimétrica é aplicada para determinar a capacidade dos equipamentos de proteção (disjuntores) desenvolvidos para suportar os efeitos dinâmicos da corrente de falta. Já os valores de corrente simétricas, são utilizadas para determinar a capacidades de corrente dos condutores e equipamentos, inclusive os dispositivos de proteção das instalações, no qual devem ser dimensionados de acordo com os valores maiores de curto-circuito que esses dispositivos podem suportar em cada parte da rede. Neste caso é usada a corrente simétrica para estudos de coordenação e seletividade do sistema elétrico.

Entretanto, a corrente de curto-circuito deve ser calculada em cada nível de uma instalação elétrica, tendo em vistas as características dos equipamentos de proteção necessários para suportar ou cortar a corrente de defeito.

Dois valores de corrente de curto-circuito devem ser calculados:

A corrente máxima de curto circuito é utilizada para determinar:

- a) a abertura dos disjuntores;
- b) o fechamento dos disjuntores;
- c) os esforços eletrodinâmicos sobre condutores e equipamento.

A corrente de curto-circuito máxima corresponde a um curto-circuito na vizinhança, a jusante, dos terminais do dispositivo de proteção.

Esta corrente deve ser calculada com exatidão e usada com uma margem de proteção.

A corrente mínima de curto-circuito é essencial quando da seleção da curva tempo/corrente dos disjuntores e dos fusíveis tem:

- a) os circuitos são longos e/ou a impedância da fonte é relativamente elevada (geradores);
- b) a proteção de pessoas depende da atuação dos disjuntores ou dos fusíveis, essencialmente nos sistemas elétricos.

Sabendo que no momento que ocorre um curto-circuito, este provocado por distintos fatores, terá intensidade de corrente mínima ou máxima, onde deverá atuar um dispositivo de proteção, o qual irá agir de forma a cortar a energia do trecho dentro de um intervalo de tempo, t_c , de forma a isolar o defeito, dado pela expressão (2).

$$\int i^2 dt \leq k^2 S^2 \quad (2)$$

Em que S é a secção do condutor e k é uma constante calculada com base em diferentes coeficientes de correção dependentes do circuito.

3.2.2 Curto-Circuito Equilibrado

Um curto-circuito será equilibrado quando neste houver total simetria entre as fases antes e depois da falha, ou seja, as tensões, correntes de curto-circuito e impedâncias estarão em equilíbrio nas três fases.

Assim um sistema será equilibrado apenas para o curto-circuito trifásico, o qual irá apresentar apenas componentes de sequência positiva, pois as correntes de sequência zero e negativa são iguais a zero.

3.2.3 Curto-Circuito Desequilibrado

Considera-se um curto-circuito desequilibrado quando as cargas deste sistema elétrico forem desequilibradas, ou seja, as correntes de curto, as tensões e impedâncias terão valores diferentes para as três fases. Neste caso, o sistema poderá ter correntes de curto-circuito monofásico, bifásico ou bifásico-terra.

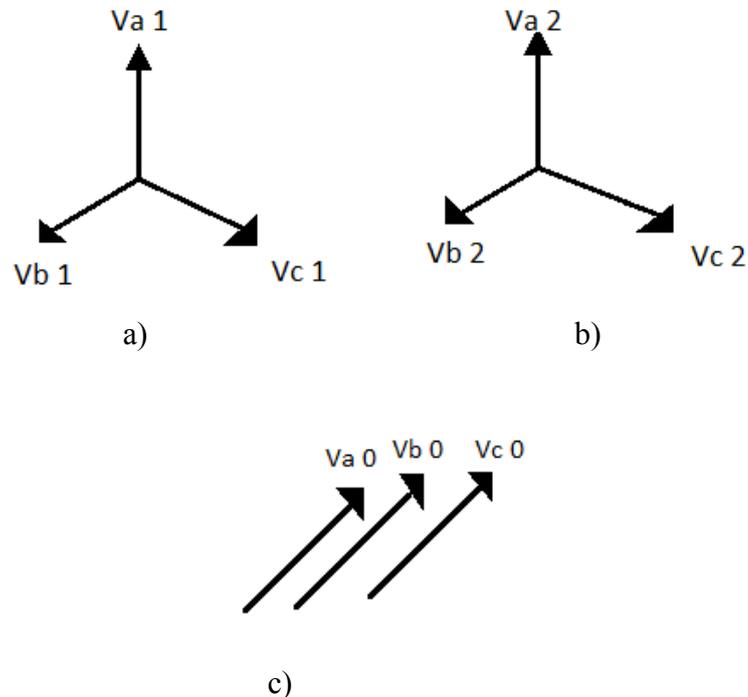
O cálculo de curtos-circuitos desequilibrados baseia-se no Teorema de Fortescue, apresentado a seguir (SANTOS, 2009).

3.2.4 Teorema de Fortescue

De acordo com Kindermann (1997), o teorema de Fortescue diz que um sistema desequilibrado de “n” fasores relacionados, pode ser convertido em n sistemas equilibrados de fasores, chamados componentes simétricas dos fasores originais. Os n fasores de cada conjunto de componentes, são iguais em amplitude e os ângulos entre fasores adjacentes de cada conjunto, são iguais.

Em Vanessa dos Santos (2009), diz que esse teorema decompõe um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos de três fasores balanceados chamados de componentes simétricos de sequência positiva, negativa e zero como mostra a figura 3.5.

Figura 3.5 - Componentes simétricos- a) sequencia positiva; b) sequencia negativa; c) sequencia zero.



Fonte: SANTOS, 2009.

Vanessa do Santos (2009) descreve em seu trabalho que os componentes simétricos de sequência positiva possuem três fasores ($\dot{V}a_1$, $\dot{V}b_1$ e $\dot{V}c_1$) balanceados de mesmo módulo e com defasagem de 120° . Sua sequência de fase é igual ao sistema original (ABC), ou seja, possuem o sentido horário de rotação.

Já os componentes de sequência negativa também possuem os três fasores balanceados ($\dot{V}a_2$, $\dot{V}b_2$ e $\dot{V}c_2$), de mesmo módulo e com defasagem de 120° , mas seu sentido de rotação é invertido (ACB) em relação à sequência original, considerada como sequência inversa ou anti-horária (SANTOS, 2009).

Por fim, os componentes de sequência zero possuem os três fasores ($\dot{V}a_0$, $\dot{V}b_0$ e $\dot{V}c_0$) com mesmo módulo e em fase, ou seja, com o mesmo ângulo.

Para transformar componentes de sequência ($\dot{V}a_0$, $\dot{V}a_1$ e $\dot{V}a_2$) em componentes de fase ($\dot{V}a$, $\dot{V}b$ e $\dot{V}c$) aplica-se a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}a \\ \dot{V}b \\ \dot{V}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1\angle -120^\circ & 1\angle -120^\circ \\ 1 & 1\angle 120^\circ & 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}a_0 \\ \dot{V}a_1 \\ \dot{V}a_2 \end{bmatrix} = \dot{V}_f = \mathbf{T} \cdot \dot{V}_s \quad (3)$$

Com o propósito de localizar faltas em redes de distribuição, a determinação das correntes de curtos-circuitos é essencial para fundamentação dessa pesquisa. Os curtos-circuitos serão calculados e comparados mediante a intensidade da corrente do trecho com defeito e nisto localizar a falha.

O método de cálculo da corrente de curto-circuito atribuído a esta pesquisa será detalhado a seguir.

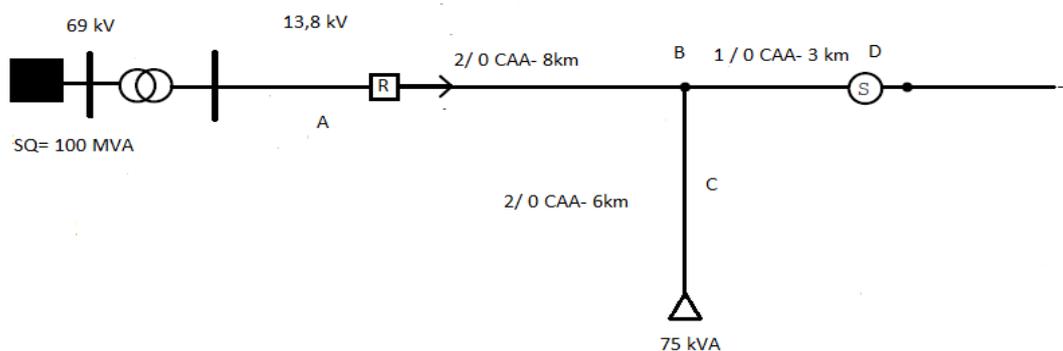
3.3 Cálculos das Correntes de Curtos-Circuitos

Para determinação das correntes de curto-circuito são usados os diagramas de seqüências de fases de acordo com o tipo de curto-circuito: Considerando que os diagramas de seqüências são divididos em três tipos: seqüência negativa, seqüência positiva e seqüência zero.

Descreve-se abaixo a montagem dos diagramas e o modo de determinar as correntes de curto-circuito. Mas, para esse procedimento, é necessário conhecer os componentes como gerador, transformador e linha.

No entanto, para simular um estudo de caso real, será usado um diagrama unifilar (figura 3.6) hipotético, de modo a ilustrar a sua aplicação na metodologia de cálculo de curto-circuito.

Figura 3.6 - Diagrama unifilar de uma rede de distribuição.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Segue a descrição dos passos:

1º Passo- Definir a potência base para os cálculos Por Unidade (pu);
Considerando a potência base de $S_b = 100 \text{ MVA}$.

2ª Passo- Obter das impedâncias dos condutores em todos os trechos das redes de distribuição em Ω/km . Considerar a impedância de sequência positiva ($Z_1 = R_1 + j.X_1$) e zero ($Z_0 = R_0 + j.X_0$). A impedância de sequência negativa Z_2 será igual à sequência positiva;

Observa-se que serão utilizados os valores unitários de resistência(R) e indutância(X) dos condutores, os quais estão ilustrados no diagrama unifilar hipotético (figura 3.6).

Contudo, os valores de R e X dos cabos condutores foram obtidos no trabalho de Almeida (2000) para a modelagem da rede elétrica, o qual considera um espaçamento equivalente dos condutores de 1,355m e as impedâncias de seqüências:

$$\text{Cabo 2/0 CAA: } Z_1 = Z_2 = 0,4387 + j0,4567 \frac{\Omega}{\text{km}}; Z_0 = 0,6163 + j1,9135 \frac{\Omega}{\text{km}}; \quad (4)$$

$$\text{Cabo 1/0 CAA: } Z_1 = Z_2 = 0,5599 + j0,4501 \frac{\Omega}{\text{km}}; Z_0 = 0,7275 + j1,9069 \frac{\Omega}{\text{km}}. \quad (5)$$

Sabendo- se que o trecho AB tem o cabo 2/0 CAA – 8km; o trecho BD tem o cabo 1/0 CAA – 3km; o trecho BC tem o cabo 2/0 CAA – 6km.

3ª Passo- Multiplicar as impedâncias pelo comprimento do trecho, para obter as impedâncias do trecho em Ω :

Trecho AB

$$Z_{1AB} = Z_{2AB} = 0,4387 + j0,4567 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 8 \text{ km}$$

$$\mathbf{Z_{1AB} = Z_{2AB} = 3,5096 + j3,6536 \Omega} \quad (6)$$

$$Z_{0AB} = 0,6163 + j1,9135 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 8 \text{ km}$$

$$\mathbf{Z_{0AB} = 4,9304 + j15,308 \Omega} \quad (7)$$

Trecho BD:

$$Z_{1BD} = Z_{2BD} = 0,5599 + j0,4501 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 3 \text{ km}$$

$$\mathbf{Z_{1BD} = Z_{2BD} = 1,6797 + j1,3503 \Omega} \quad (8)$$

$$Z_{0BD} = 0,7275 + j1,9069 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 3 \text{ km}$$

$$\mathbf{Z_{0BD} = 2,1825 + j5,7207 \Omega} \quad (9)$$

Trecho BC:

$$Z_{1BC} = Z_{2BC} = 0,4387 + j0,4567 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 6 \text{ km}$$

$$\mathbf{Z_{1BC} = Z_{2BC} = 2,6322 + j2,7402 \Omega} \quad (10)$$

$$Z_{0BC} = 0,6163 + j1,9135 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 6 \text{ km}$$

$$\mathbf{Z_{0BC} = 3,6978 + j11,481 \Omega} \quad (11)$$

4º Passo - Acumular as impedâncias da SE até o referido ponto em Ω ;

Soma das impedâncias do trecho AD:

$$Z_{1AD} = Z_{2AD} = Z_{1AB} + Z_{1BD} = (3,5096 + j3,6536)\Omega + (1,6797 + j1,3503) \Omega$$

$$\mathbf{Z_{1AD} = Z_{2AD} = 5,1893 + j5,0039 \Omega} \quad (12)$$

$$Z_{0AD} = Z_{0AB} + Z_{0BD} = (4,9304 + j15,308) \Omega + (2,1825 + j5,7207) \Omega$$

$$\mathbf{Z_{0AD} = 7,1129 + j21,0287 \Omega} \quad (13)$$

Soma das impedâncias do trecho AC:

$$Z_{1AC} = Z_{2AC} = Z_{1AB} + Z_{1BC} = (2,6322 + j2,7402) \Omega + (3,5096 + j3,6536) \Omega$$

$$\mathbf{Z_{1AC} = Z_{2AC} = 6,1418 + j6,3938 \Omega} \quad (14)$$

$$Z_{0AC} = Z_{0AB} + Z_{0BC} = (3,6978 + j11,481) \Omega + (4,9304 + j15,308) \Omega$$

$$\mathbf{Z_{0AC} = 8,6282 + j26,789 \Omega} \quad (15)$$

5º Passo - Calcular as impedâncias base para cada trecho de rede,

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}, \quad (16)$$

Conforme a tensão nominal de operação de cada rede. Como nesse exemplo, a tensão nominal é a mesma para todos os trechos, a impedância base também será a mesma.

Sabendo que:

$$V_b = 13,8 \text{ kV};$$

$$S_b = 100 \text{ MVA.}$$

Obteve-se a impedância base através da fórmula (16):

$$Z_b = \mathbf{1,9044 \Omega} \quad (17)$$

6º Passo- Para obter-se em ampéres [A] os valores das correntes de curto-circuito, deve-se multiplicar elas pela corrente base (I_b). A corrente base é obtida por:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_b} \quad (18)$$

$$I_b = \mathbf{4183,69A}$$

7º Passo- Converter as impedâncias acumuladas dos cabos de [Ω] para [pu] dividindo pela impedância base do trecho.

Trecho AB:

$$z_{1AB} = z_{2AB} = \frac{3,5096 + j3,6536 \Omega}{1,9044 \Omega} = \mathbf{1,8428 + j1,9185 pu} \quad (19)$$

$$z_{0AB} = \frac{4,9304 + j15,308 \Omega}{1,9044 \Omega} = \mathbf{2,5889 + j8,0382 pu} \quad (20)$$

Trecho AD:

$$z_{1AD} = z_{2AD} = \frac{5,1893 + j5,0039 \Omega}{1,9044 \Omega} = \mathbf{2,7249 + j2,6275 pu} \quad (21)$$

$$z_{0AD} = \frac{7,1129 + j21,0287 \Omega}{1,9044 \Omega} = \mathbf{3,7349 + j11,04216 pu} \quad (22)$$

Trecho AC:

$$z_{1AC} = z_{2AC} = \frac{6,1418 + j6,3938 \Omega}{1,9044 \Omega} = \mathbf{3,2250 + j3,3573 pu} \quad (23)$$

$$z_{0AC} = \frac{8,6282 + j26,789 \Omega}{1,9044 \Omega} = \mathbf{4,5306 + j14,0668 pu} \quad (24)$$

8º Passo- Com base nas impedâncias acumuladas (z_1 , z_2 e z_0), calcular as correntes de curto-circuito nos trechos AB, AC e AD, através das fórmulas abaixo:

Considerando que para os cálculos das correntes, utilizaram-se as fórmulas abordadas em Comasseto (2008).

Sabendo que:

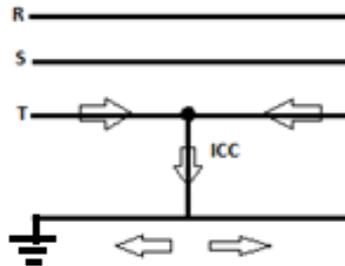
$$E = 13,8kV \quad (25)$$

Convertendo para [pu]:

$$e = 1 \text{ pu} \quad (26)$$

➤ CURTO MONOFÁSICO-TERRA-MÍNIMO

Figura 3.7 - Curto monofásico-terra



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Neste caso de curto monofásico terra-mínimo, a impedância de aterramento pode variar de acordo com o tipo de contato.

Conforme a fórmula:

$$I_{cc1\phi tmin} = \frac{3 \cdot e}{z_1 + z_2 + z_0 + 3 \cdot z_f} \cdot I_b \quad (27)$$

Onde:

z_f = impedância de aterramento em pu;

Neste caso, é considerado o valor padrão das concessionárias $3 \cdot Z_f = 40 \Omega$, transformando para por unidade: $3 \cdot z_f = \frac{40 \Omega}{1,9044 \Omega} = 21,003 \text{ pu}$.

Trecho AB

$$I_{cc1\phi tmin} = \left| \frac{3 \times 1 \text{ pu}}{1,8428 + j1,91185 + 1,8428 + j1,91185 + 2,5889 + j8,0382 + 21,003 \text{ pu}} \right|$$

$$\times 4183,69A$$

$$I_{cc1\phi tmin} = \mathbf{178,54A} \quad (28)$$

Trecho AC

$$I_{cc1\phi tmin} = \left| \frac{3 \times 1 \text{ pu}}{3,3259 + j3,3573 + 3,3259 + j3,3573 + 4,5306 + j14,0668 + 21,003 \text{ pu}} \right|$$

$$\times 4183,69A$$

$$I_{cc1\phi tmin} = \mathbf{163,31A} \quad (29)$$

Trecho AD

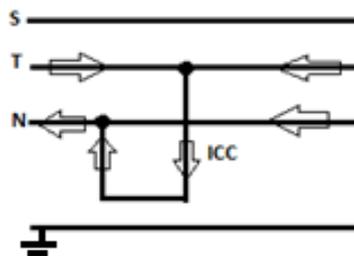
$$I_{cc1\phi tmin} = \left| \frac{3 \times 1 \text{ pu}}{2,7249 + j2,6275 + 2,7249 + j2,6275 + 3,7349 + j11,04216 + 21,003 \text{ pu}} \right|$$

$$\times 4183,69A$$

$$I_{cc1\phi tmin} = \mathbf{169,58A} \quad (30)$$

➤ CURTO MONOFÁSICO

Figura 3.8- Curto-circuito monofásico



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Conforme a fórmula:

$$I_{cc1\phi} = \frac{3 \cdot e}{(z_1 + z_2 + z_0)} \cdot I_b \quad (31)$$

Pode-se calcular os valores das correntes para curto-circuito monofásico:

Trecho AB

$$I_{cc1\phi} = \left| \frac{3 \times 1 \text{ pu}}{1,8428 + j1,91185 + 1,8428 + j1,91185 + 2,5889 + j8,0382 \text{ pu}} \right| \times 4183,69A$$

$$I_{cc1\phi} = \mathbf{934,48A} \quad (32)$$

Trecho AC

$$I_{cc1\phi} = \left| \frac{3 \times 1 \text{ pu}}{3,3259 + j3,3573 + 3,3259 + j3,3573 + 4,5306 + j14,0668 \text{ pu}} \right| \times 4183,69A$$

$$I_{cc1\phi} = \mathbf{533,99A} \quad (33)$$

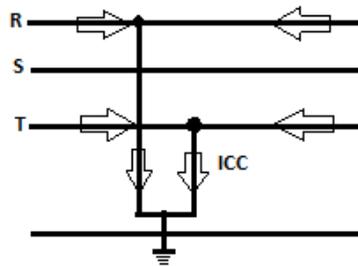
Trecho AD

$$I_{cc1\phi} = \left| \frac{3 \times 1 \text{ pu}}{2,7249 + j2,6275 + 2,7249 + j2,6275 + 3,7349 + j11,04216 \text{ pu}} \right| \times 4183,69A$$

$$I_{cc1\phi} = \mathbf{670,92A} \quad (34)$$

➤ CURTO BIFÁSICO-TERRA

Figura 3.9 - Curto-circuito bifásico-terra



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Para o curto-circuito bifásico-terra é necessário aplicar a transformação de Fortecue a partir das componentes de sequência obtidas pelo circuito série-paralelo. Quando $z_2 = z_1$ e $e = 1$ pu, essas componentes são calculadas por:

$$\dot{i}_{a0} = \frac{-z_1}{(z_1^2 + 2 \cdot (z_1 + z_0))} \quad (35)$$

$$i_{a1} = \frac{z_1 + z_0}{(z_1^2 + 2 \cdot (z_1 + z_0))} \quad (36)$$

$$i_{a2} = \frac{-z_0}{(z_1^2 + 2 \cdot (z_1 + z_0))} \quad (37)$$

Além disso, como as correntes de fase serão desequilibradas, deve-se extrair o maior valor, logo:

$$I_{cc2\phi t} = \max (|T \cdot \dot{V}_s|) \cdot I_b \quad (38)$$

que resulta em,

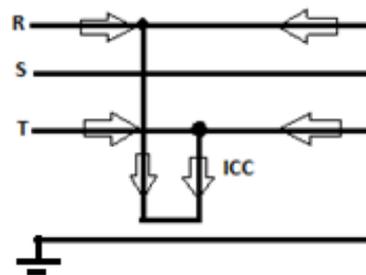
$$\begin{array}{l} \text{Trecho AB} \\ I_{cc2\phi t} = \mathbf{1516,5A} \end{array} \quad (39)$$

$$\begin{array}{l} \text{Trecho AC} \\ I_{cc2\phi t} = \mathbf{866,56A} \end{array} \quad (40)$$

$$\begin{array}{l} \text{Trecho AD} \\ I_{cc2\phi t} = \mathbf{1073A} \end{array} \quad (41)$$

➤ CURTO BIFÁSICO

Figura 3.10 - Curto-circuito bifásico



Fonte: CAVALHEIRO, 2012

Considerando a fórmula:

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{e}{z_1} \cdot I_b \quad (42)$$

Podem-se calcular as correntes para curto-circuito bifásico dos seguintes trechos:

Trecho AB

$$I_{cc2\phi} = \left| 0,866 \times \left(\frac{1 \text{ pu}}{1,8428 + j1,91185 \text{ pu}} \right) \right| \times 4183,69 \text{ A}$$

$$I_{cc2\phi} = \mathbf{1362 \text{ A}} \quad (43)$$

Trecho AC

$$I_{cc2\phi} = \left| 0,866 \times \left(\frac{1 \text{ pu}}{3,3259 + j3,3573 \text{ pu}} \right) \right| \times 4183,69 \text{ A}$$

$$I_{cc2\phi} = \mathbf{778,27 \text{ A}} \quad (44)$$

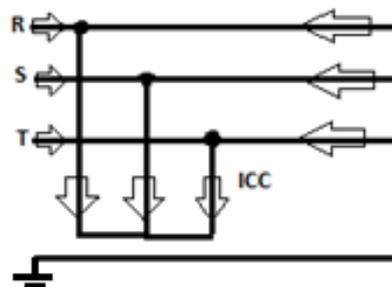
Trecho AD

$$I_{cc2\phi} = \left| 0,866 \times \left(\frac{1 \text{ pu}}{2,7249 + j2,6275 \text{ pu}} \right) \right| \times 4183,69 \text{ A}$$

$$I_{cc2\phi} = \mathbf{957,15 \text{ A}} \quad (45)$$

➤ CURTO TRIFÁSICO

Figura 3.11 - Curto-circuito trifásico



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

De acordo com a fórmula:

$$I_{cc3\phi} = \frac{e}{Z_1} \cdot I_b \quad (46)$$

Calcula-se as correntes trifásicas para os seguintes trechos:

$$\begin{aligned}
 & \text{Trecho AB} \\
 I_{cc3\phi} &= \left| \frac{1 \text{ pu}}{1,8428 + j1,91185 \text{ pu}} \right| \times 4183,69A \\
 I_{cc3\phi} &= \mathbf{1572,7A}
 \end{aligned} \tag{47}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Trecho AC} \\
 I_{cc3\phi} &= \left| \frac{1 \text{ pu}}{3,3259 + j3,3573 \text{ pu}} \right| \times 4183,69A \\
 I_{cc3\phi} &= \mathbf{898,67A}
 \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Trecho AD} \\
 I_{cc3\phi} &= \left| \frac{1 \text{ pu}}{2,7249 + j2,6275 \text{ pu}} \right| \times 4183,69A \\
 I_{cc3\phi} &= \mathbf{1105,2A}
 \end{aligned} \tag{49}$$

De acordo com a metodologia abordada nesse capítulo, referente ao cálculo das correntes de curtos-circuitos, apresenta-se o conhecimento de vários conceitos atribuídos a tipos de curtos, aos seus efeitos e causas, sua classificação, suas correntes de fase, etc. Entretanto, o estudo de caso apresentado na figura 3.6, teve o objetivo de criar um exemplo de rede elétrica de distribuição, com componentes reais, a fim de contribuir para o desenvolvimento deste método, ou seja, obter-se melhor visualização e análise dos processos de transformações e cálculos matemáticos a partir das fórmulas e valores encontrados acima.

Ressalta-se que foi inserido o método do cálculo das correntes de curtos-circuitos na ferramenta proposta para efetivação dessa pesquisa, a qual determina os valores de curto para todas as barras da rede de distribuição. Esses valores calculados são armazenados em um banco de dados (dados históricos) da ferramenta computacional, os quais irão servir para comparar em tempo real com os valores indicados pelo sistema, no momento da ocorrência de uma falta em um determinado trecho da rede, a partir dos Mapas Auto-Organizáveis.

4 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

As concessionárias estão cada vez mais preocupadas com o aumento de demanda, com a qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Por isso, adotam sistemas de proteção de maior complexidade e acessibilidade para as redes.

Entretanto, para um sistema mais confiável é indispensável a análise de coordenação dos equipamentos de proteção, pois essa coordenação manterá o sistema em funcionamento em todos os pontos ou não. No caso de uma ocorrência de curto-circuito, o dispositivo operará, atuando na forma de isolar o local com defeito na rede elétrica.

Esses defeitos são causados por uma falha da isolação líquida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores ou entre condutores e terra. Podem ser também causado por uma redução da distância entre os condutores, rompimento de cabos, causas naturais (queda de árvores na rede entre outros fatores), falhas nos equipamentos ou mesmo uma variação e elevação de cargas (sobrecargas).

Para que ocorra essa coordenação, os dispositivos devem atuar de forma seletiva, mas sabemos que são sempre usados os mesmos nas redes de distribuição, o que mudam são evoluções construtivas, pois os seus princípios de funcionamento não evoluíram muito. Então o bom funcionamento destes dispositivos depende muito de sua vida útil, que diminui a cada momento de interrupção, devido a sua atuação de isolar os curtos-circuitos na rede, com isso podem ocorrer acidentes fatais ou graves com pessoas próximas ao curto, no fato de aumentar o seu tempo de atuação ou de não atuação, devido ao seu desgaste/dano causado ao equipamento (COMASSETO, 2004).

Nesse caso, podemos destacar a metodologia do Software Procedi- Proteção dos Sistemas Elétricos de Distribuição, desenvolvido para executar estudos de coordenação, seletividade de proteção de sistemas aéreos de distribuição. Ele avalia o avanço e recuo dos relés eletromecânicos quando da atuação de religadores, calcula os tempos de atuação dos dispositivos frente aos curtos-circuitos em diversos pontos do alimentador e sugere possíveis modificações visando atender aos critérios de coordenação (PEREIRA, 2008).

Conforme Gieger (1988), os sistemas elétricos são os principais responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica e de manter uma boa qualidade do fornecimento aos consumidores, que devem atender os seguintes requisitos:

➤ Seletividade; Somente deve ser isolada a parte defeituosa do sistema, mantendo em serviço as demais partes;

- Rapidez: As sobrecorrentes geradas pela falta devem ser extintas no menor tempo possível, de modo a dificultar que o defeito interfira em outras partes do sistema;
- Sensibilidade: A proteção deve ser sensível aos defeitos que possam ocorrer no sistema;
- Segurança: A proteção não deve atuar de forma errônea em casos onde não houver falta, bem como deixar de atuar em casos faltosos;
- Economia: A implementação do sistema de proteção deve ser economicamente viável.

De modo a satisfazer os requisitos acima, a instalação e ajuste dos equipamentos de proteção em uma linha de distribuição devem levar em conta a existência de cargas e ramificações em seu percurso. Com isso, faz-se com que haja a necessidade da atuação dos dispositivos de proteção, instalados ao longo da rede, a fim de proteger o sistema na ocorrência de uma falta, isolando a falha do restante da rede e proporcionando uma melhor confiabilidade ao sistema (MORETO, 2005).

Giguer (1988) considera também neste caso a coordenação dos dispositivos, necessária para que somente o dispositivo de proteção mais próximo da falta atue, isolando esta do resto do sistema, satisfazendo o requisito da seletividade e proporcionando maior confiabilidade ao sistema. Sua implementação é feita com a escolha e ajuste adequados dos dispositivos de proteção utilizados.

Para esse capítulo, foram considerados na metodologia proposta os seguintes Dispositivos de Proteção: Relés, Chaves Fusíveis e Religadores, os quais serão apresentados a seguir.

4.1 Relés

Atualmente, os relés microprocessados vêm sendo empregados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica em seus sistemas, juntamente com o aprimoramento do SCADA- Sistema de monitoramento e controle remoto. Esse sistema disponibiliza uma redução de custos operacionais e de manutenção, pois possibilita o controle e aquisição de dados e informações remotamente, através do seu sistema operacional existente na concessionária.

Os relés são considerados um dos dispositivos de proteção mais importantes dos sistemas, visto que possuem uma série de recursos (proteção de sobrecarga, instantânea,

religamentos, entre outros), além disto, normalmente são localizados nas subestações com recursos SCADA (monitoração e controle a distância) como já dito acima.

Eles são responsáveis pelo acionamento dos disjuntores quando da ocorrência de defeitos nas redes de distribuição, protegendo principalmente as redes troncais.

Segundo o trabalho realizado pela Eletrobrás (1982) um relé é:

Os dispositivos que supervisionam constantemente as grandezas de um sistema elétrico, ou seja, tensões, correntes, frequências, potências, bem como grandezas inerentes aos próprios componentes, como temperaturas, etc., são denominados relés.

Quando um curto ocorre na linha, uma corrente flui através de sua impedância, fazendo surgir uma queda de tensão sobre esta. O relé mede a tensão e corrente no terminal da linha e divide-se as duas grandezas, obtendo a impedância entre o local e o ponto da falta (MORETO, 2005).

Deste modo, o relé faz uma diferenciação entre os locais de falta, na qual atua identificando o trecho com defeito que o relé irá proteger. Sabendo-se o valor da impedância da linha indicado pelo relé, podemos fazer uma estimativa do local do defeito.

Segundo Horowitz e Phadke (1995) independentemente do tipo de falta envolvida, os valores de tensão e corrente fornecidos ao relé devem ser tais que a impedância medida seja sempre a impedância de sequência positiva de falta.

No entanto, existem vários tipos de relés que podemos destacar:

4.1.1 Relés de Sobrecorrente

Esse relé, como diz o nome, supervisiona o aumento da corrente elétrica no sistema, na ocorrência de um falta, a corrente fica bem elevada em relação a sua corrente nominal. O relé detectando essa corrente atua informando o disjuntor e desenergizando o alimentador. A corrente máxima para o relé detectar é ajustada conforme a corrente máxima das fases e o valor mínimo de curto-circuito. Já o tempo de atuação do relé deve ser considerado pela concessionária.

Segundo a Eletrobrás (1982) em função desse tempo de atuação, os relés de sobrecorrente podem se classificar em:

- Relé de Sobrecorrente Instantâneo (RSI): o relé atua após a ocorrência de sobrecorrentes em um intervalo de tempo muito curto. Não há retardo de tempo;
- Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido (RSTD): o tempo de atuação é manualmente definido e independente do valor da corrente;

- Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso (RSTI): o tempo de operação é inversamente proporcional ao valor da corrente;
- Relé de Sobrecorrente de Tempo Muito Inverso (RSTMI): apresenta variações no tempo de atuação em função da corrente de atuação;
- Relés de Indução Eletromagnética: apresenta o mesmo princípio de funcionamento de um motor de indução, ou seja, o torque é ocasionado pela indução do seu rotor.

Neste caso existem dois tipos de relés por indução:

Relé com disco de alumínio: o relé recebe o torque da bobina de operação em função do torque promovido pelo ímã, na qual produz a velocidade do disco. A bobina energizada terá um toque que a fará girar sobre o disco onde irá atuar, fechando os terminais. Esse tempo de fechamento é ajustado conforme o tempo de retardo de atuação desejada.

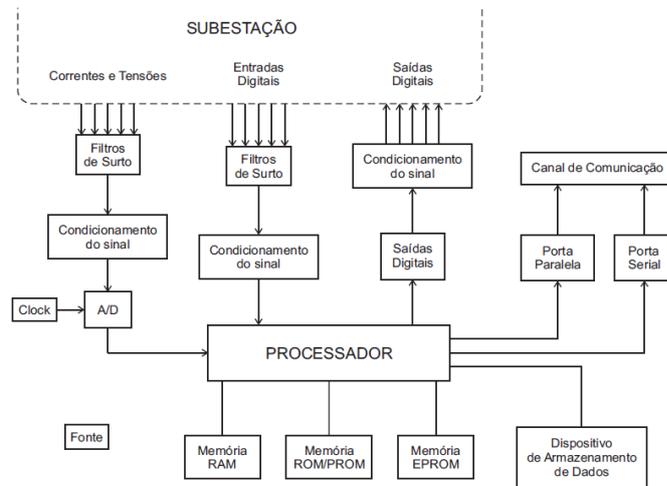
Relé de Copo Cilíndrico: seu funcionamento é parecido com o do relé de disco, porém seu rotor é em forma de copo, o qual proporciona uma rotação mais rápida. Um contato é fixado no copo o qual se movimentará em função de uma força induzida resultante de uma corrente elétrica na bobina a qual está atuando.

4.1.2 Relé Digital

Vistos acima alguns tipos de Relés, hoje sendo cada vez mais aprimorados ao sistema “Relés Digitais”, o qual, devido ao seu implemento ao SCADA, tem como objetivo melhorar o controle e operação do sistema, devido ao fato de serem telecomandados, ou seja, possuir canais de comunicações, diminuindo o tempo de operação e custos de manutenção à concessionária.

Segundo Moreto (2005), os relés digitais são construídos em torno de um processador digital. O processador executa continuamente um programa que verifica os sinais de entrada do relé, implementando uma ou mais funções de proteção. De acordo com a figura 4.1, podemos ver um esquema de blocos que compões o relé digital.

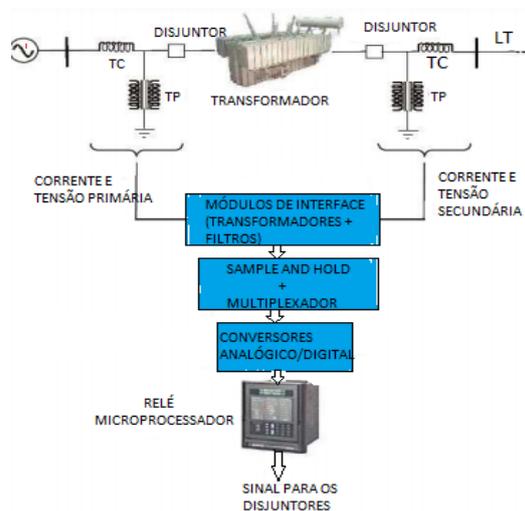
Figura 4.1- Blocos componentes do relé digital



Fonte: SALIM, R.; 2006.

Os sinais de entrada dos relés são sinais de tensão e corrente, os quais são obtidos a partir da saída transdutores específicos, os quais servem para que o relé atue nos disjuntores ou outro dispositivo instalado na subestação. Também se pode dizer que os relés causam mudança na configuração no estado das chaves do sistema, devido ao fato de possuir entradas que indicam a mesma informação necessária para a sua atuação no sistema elétrico. Os sinais de entrada passar por filtros de surto (Figura 4.2), que possuem a finalidade de filtrar as frequências ocasionadas por distúrbios que podem afetar o sinal, onde estes filtros possuem uma frequência de corte da ordem de centenas de kHz, não afetando o espectro do sinal normalmente utilizado pelo relé (PHADKE, THORP, 1988).

Figura 4.2 - Arquitetura do Relé



Fonte: Adaptado de SANTIAGO, R. F.

Os relés digitais facilitam a propagação remota, ou seja, com eles é possível adaptar com mais facilidade e rapidez a topologia da rede elétrica. Pois o equipamento tradicional de proteção é necessário ser ajustado manualmente, o qual ocasiona em um maior tempo, como consequência podendo ocorrer riscos de erro. Algumas vezes, os ajustes de relés não são alterados para manobras de emergência, porque são muito demoradas ou muito difíceis, deixando o sistema comprometido (SCHWEITZER, SCHEER, FELTIS, 1992).

Segundo Roberts e Schweitzer (1989), os relés digitais atualizados, ou seja, modernos, fornecem relatórios de eventos completo para cada perturbação detectada. Estes relatórios podem conter oscilografias de vários ciclos pré e pós-falta, data e hora da ocorrência da falta, estado da entrada, e saída do relé, estado dos elementos internos do relé, ajustes do relé no momento da falta e, em alguns casos, até uma estimativa do local da falta é apresentada. Os relatórios podem ser recuperados remotamente via canais de comunicação. Assim, o operador tem acesso a um maior número de informações com rapidez, podendo tomar medidas corretivas de forma mais eficiente.

A arquitetura de funcionamento de um relé digital é muito semelhante ao de um computador, contudo o relé apresenta características adicionais, a fim de melhorar a confiabilidade do sistema elétrico.

Segundo Moreto (2005); Phadke, Thorp (1988); Schweitzer, Scheer e Feltis (1992), com base nessas características, algumas já citadas anteriormente, podem-se destacar as principais a seguir:

➤ ADAPTABILIDADE

Com capacidade de programação e comunicação, os relés digitais oferecem a possibilidade de mudar suas características de acordo com as condições de operação do sistema, adaptando-se facilmente a reconfiguração do sistema.

➤ RELATÓRIO DE EVENTOS

Os relés digitais possuem a capacidade de armazenar dados para análise posterior. Assim, na ocorrência de uma falta no sistema, o relé pode armazenar dados oscilográficos de tensão e corrente e os estados das chaves, aumentando as ferramentas disponíveis aos operadores e engenheiros de proteção do sistema, para controle e o planejamento dos sistemas de distribuição.

➤ AUTO-TESTE

Assim como os relés eletromecânicos e de estado sólido, os relés digitais também estão suscetíveis a falhas. Dessa forma, diversos relés possuem uma função de auto-teste automático para verificar se o mesmo está operando corretamente. Se alguma parte interna do

relé estiver com problemas, o mesmo acusa através de uma saída, podendo ser ligado em sistema SCADA, para visualização dos operadores do sistema.

➤ LOCALIZAÇÃO DE FALTA

Um das funções que os relés podem possuir é a localização de faltas, tanto temporárias como transitórias. Através de algoritmos, o local das faltas pode ser estimado com certa precisão, aumentando a rapidez com que as equipes de manutenção reparem o defeito detectado.

➤ COORDENAÇÃO

Os relés, por possuírem diversas entradas e saídas analógicas e digitais, podem ser facilmente coordenados com outros equipamentos de proteção, como fusíveis e religadores. Ainda é possível simular a operação de um relé eletromecânico dentro de um relé digital, através da inserção de curvas características de operação destes relés.

➤ CUSTO

Atualmente o custo dos relés digitais é comparável ao custo de equipamentos de proteção mais sofisticados. Equipamentos eletromecânicos de proteção simples, como relés de sobrecorrente, ainda são mais baratos que relés digitais, mas mesmo assim o uso de relés digitais tornou-se uma importante opção para o projeto de sistemas de potência de grande porte.

4.2 Chaves Fusíveis

A Seletividade está no número menor de consumidores atingidos por um defeito. Para essa seletividade é preciso ter coordenação no sistema, para isso é necessário que os dispositivos de proteção sejam adequadamente instalados no sistema, para que haja coordenação nos seus respectivos tempos de atuação e aumentar a seletividade no circuito. Sua atuação envolve a proteção de ramais de alimentadores, cargas e transformadores de distribuição (HOROWITZ, PHADKE, 1995).

O tempo de atuação do elo fusível de acordo com Giguier (1988) depende de diversos fatores:

- A intensidade de corrente que passa pelo fusível;
- O tipo de material que constitui o elemento fusível;
- O seu grau de envelhecimento;
- O tipo de material envolvente.

Segundo Gieger (1988), outro fator importante que devemos destacar é a máxima corrente máxima que os fusíveis podem interromper, limitadas pelos fatores:

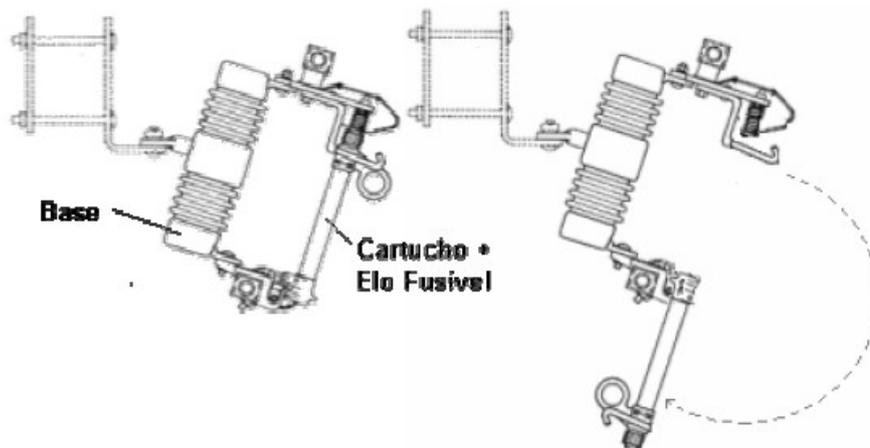
- Capacidade de produção de gases do cartucho;
- Pressão interna do cartucho;
- Força decorrente da expulsão dos gases e capacidade térmica dos contatos.

Como já citado acima, o fusível é um dos principais equipamentos para a seletividade do sistema, ele tem baixo custo, porém, não tem a capacidade de distinguir faltas temporárias de faltas permanentes, mas servem como uma das maneiras mais simples de fazer a interrupção automaticamente da corrente de curto ou sobrecarga.

O fusível compõe-se de três partes (figura 4.3):

- Base;
- Porta-Fusível (cartucho);
- Elo Fusível.

Figura 4.3 - Partes do fusível



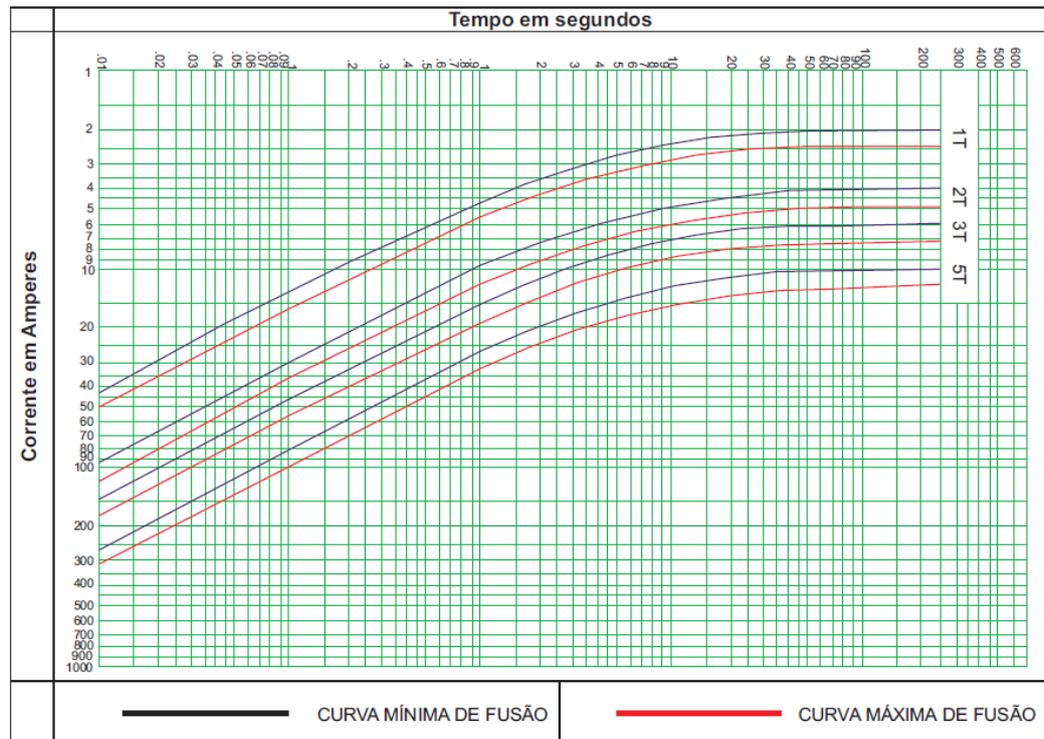
Fonte: COMASSETTO, L.; 2008.

A forma de operação das chaves fusíveis está diretamente relacionada as características dos elos fusíveis (COMASSETTO, 2008). Os elos fusíveis são a parte ativa da chave- fusível, ou seja, são os elementos que detectam as sobrecorrentes, onde juntamente com o cartucho interrompem o circuito.

A corrente de carga do equipamento ou do circuito protegido deve obedecer as curvas características de tempo em função da corrente, os quais devem ser fornecidas pelo

fabricante. Como exemplo dessa situação, pode-se observar a atuação dos elos fusíveis através das curvas mostradas na figura 4.4.

Figura 4.4 - Gráfico da corrente em função do tempo da atuação dos elos fusíveis.



Fonte: SALIM, R.; 2006.

Para o caso dos fusíveis serem utilizados em redes de distribuição, a sua curva será inversa, quanto maior for a corrente, menor será o tempo de atuação. Esse elo é alojado dentro de um tubo de fibra isolante o qual é revestido internamente por uma fibra especial, onde a queima desta fibra no instante de fusão do elemento fusível produz gases desionizantes importantes na extinção do arco elétrico que surge no momento em que o circuito é aberto (MORETO, 2005).

Os elos fusíveis podem ser do tipo k ou H:

- Elo do tipo H: serve para proteger transformadores primários, devido a sua capacidade de suportar correntes elevadas;
- Elo do tipo k: serve para proteger ramais e também transformadores primários.

Entretanto, o tipo de elo fusível escolhido, será o qual melhor corresponder às características de trecho, ou seja, este será o elo a ser instalado.

Considerando o elo do tipo k, pode-se fazer uma visualizar as tabelas abaixo, de acordo com o elo fusível, corrente nominal, corrente admissível, corrente de fusão e a

coordenação dos elos. A partir desses dados, é possível escolher o tipo de elo que melhor coordene o sistema elétrico, tanto para proteção, como interrupção da corrente antes de atingir um valor elevado.

A. Elos tipo k

Tabela 4.1 - Elos tipo k

ELO FUSÍVEL	CORRENTE NOMINAL	CORRENTE ADMISSÍVEL	CORRENTE FUSÃO
*6	6	9	12
8	8	12	16
*10	10	15	20
12	12	18	24
*15	15	22,5	30
20	20	30	40
*25	25	37,5	50
30	30	45	60
*40	40	60	80
50	50	75	100
*65	65	97,5	130
80	80	120	160
*100	100	150	200

* Elos fusíveis preferenciais tipo "k"

Fonte: COMASSETO, L.; 2008.

B. Elos tipo k em Coordenação

Tabela 4.2 - Coordenação dos elos

ELOS FUSÍVEIS PROTETOR	ELO FUSÍVEL PROTEGIDO OU DE RETAGUARDA							
	10K	15K	25K	40K	65K	100K	140K	200K
6K	190	510	840	1340	2200	3900	5800	9200
10K		300	840	1340	2200	3900	5800	9200
15K			430	1340	2200	3900	5800	9200
25K				660	2200	3900	5800	9200
40K					1100	3900	5800	9200
65K						2400	5800	9200
100K							2000	9100
6140K								4000

Fonte: COMASSETO, L.; 2008.

Para escolhermos o tipo k do fusível, tem-se a fórmula:

$$k \cdot I_n \leq I_e \leq \frac{1}{4} \cdot I_{cc\phi tmin} \quad (50)$$

$$k = \left(1 + \frac{C\%}{100}\right)^n \quad (51)$$

Onde:

I_n : Corrente nominal do trecho;

I_e : Corrente nominal do elo;

$I_{cc\phi tmin}$: Corrente de fase mínimo no final do trecho protegido;

$C\%$: Taxa de crescimento anual;

n : Numero de anos previsto;

4: Fator de segurança.

Através da fórmula é possível escolher o elo que melhor de garantia de coordenação na atuação da proteção desejada aos ramais, ou seja, o elo fusível pode interromper a passagem de corrente quando está muito elevada ou também agir interrompendo a passagem desta antes mesmo que atinja este valor elevado.

4.3 Religadores

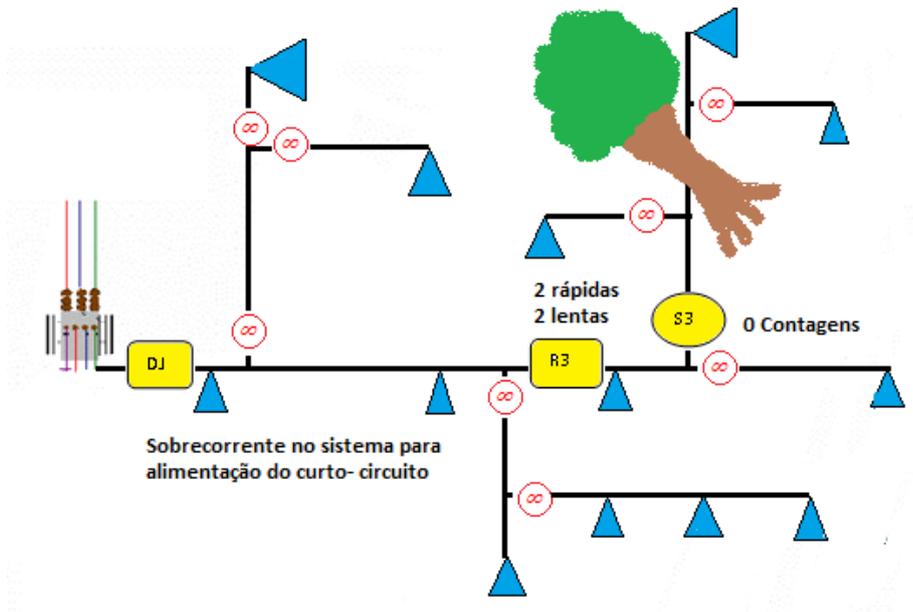
Os religadores são dispositivos de proteção que podem ser trifásicos ou monofásicos, com programação flexível permitindo a interrupção automática com abertura e fechamento instantâneo, o qual é temporizado de acordo com o surgimento de defeitos transitórios, bem como a abertura permanente sob defeitos permanentes, de acordo com a programação imposta ao equipamento.

As sequências podem ser combinadas em até 4 operações:

- 1 rápida- 3 lentas
- 2 rápidas- 2 lentas
- 3 rápidas- 1 lenta
- 4 rápidas
- 4 retardadas

Uma vez bloqueado em caso de defeito permanente, o religador deverá ser fechado manualmente após a realização do serviço de correção da falha do sistema.

Figura 4.5- Arquitetura da rede com Religador



Fonte: Adaptado de BERNARDON, D.P.; 2004.

Normalmente, são instalados ao longo dos alimentadores (na troncal, como mostra a figura 4.5) com a função de atuar para defeitos permanentes nas redes troncais a sua jusante e para defeitos transitórios nos ramais, de modo a evitar a queima de elos fusíveis e, conseqüentemente, o deslocamento de equipes de manutenção para o restabelecimento de energia elétrica.

Figura 4.6 - Religador telecomandado



Fonte: SPERANDIO, M. et al.; 2011

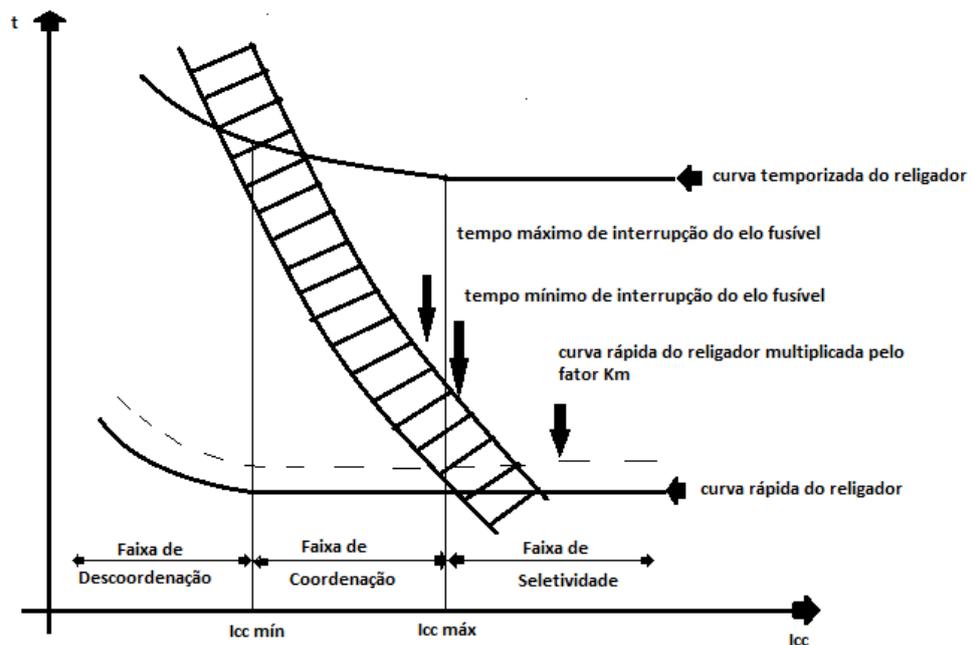
Segundo Giguier (1988), os religadores apresentam as seguintes vantagens:

- 1) Menor número de queima de elos fusíveis;

- 2) Menor deslocamento de equipes de manutenção para sua troca;
- 3) Facilidade de manobras;
- 4) Melhor seletividade de defeitos;
- 5) Minimização dos efeitos maleféticos as redes pelos curtos-circuitos;
- 6) Menores danos aos condutores e transformadores;
- 7) Maior faturamento;
- 8) Melhor imagem da empresa.

O diferencial dos religadores para as chaves fusíveis, é que eles sabem diferenciar as faltas transitórias das faltas permanentes. A atuação dos elos fusíveis em caso de faltas transitórias leva a elevados custos de operação e principalmente um maior tempo de interrupção, cujos índices de qualidade são avaliados pelas agências reguladoras podendo resultar em multas para a empresa (MORETO, 2005).

Figura 4.7- Curvas do comportamento do religador e fusível



Fonte: Adaptado de COMASSETO, L.; 2008.

Os tempos de operação, o número de interrupções, os ajustes da corrente de disparo e outros parâmetros podem ser facilmente modificados pelo usuário, resultando em grande flexibilidade e possibilitando a coordenação com outros dispositivos de proteção, como os fusíveis (GIGUER, 1988).

O religador atua no momento que detecta um defeito, através da corrente em seus terminais onde dispara, atuando na forma de abrir o circuito, após alguns segundos o circuito é fechado. O religador pode abrir e fechar o circuito várias vezes até que o defeito seja eliminado. No caso do defeito permanecer, o religador será aberto definitivamente, isolando o defeito no circuito.

Baseado nos Dispositivos de Proteção apresentados nesse capítulo ressalta-se que esse trabalho apresenta uma pesquisa desenvolvida em uma pequena concessionária, cuja metodologia atribuída para comprovação da mesma é feita através do monitoramento em tempo real por um Religador Telecomandado. Esse monitoramento ocorre em tempo real pelo sistema SCADA, cujos valores de curtos-circuitos detectados são confrontados pelo SOM (Mapas Auto-Organizáveis) e feita a sua identificação.

Essa identificação do defeito na rede ocorre de forma seletiva e coordenada entre o religador e as chaves fusíveis, ou seja, o defeito pode ser diferenciado pelo ramal ou troncal. Neste trabalho, são analisados apenas os defeitos permanentes, considerando a atuação do religador para faltas na troncal das redes com corrente pós-falta no religador igual a zero, e a atuação de chaves fusíveis para faltas nos ramais das redes com corrente pós-falta no religador diferente de zero.

Ressalta-se que apesar dos relés e religadores microprocessados indicarem a distância do defeito com base na impedância de curto-circuito, ela não é precisa para sistema de distribuição, uma vez que as redes apresentam vários ramais e diferentes bitolas de condutores.

5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 Formulação do Problema

Como já citado anteriormente no trabalho, umas das principais preocupações das concessionárias de energia elétrica e ao mesmo tempo uma das maiores dificuldades é fazer a localização de defeitos na rede de distribuição.

Essas dificuldades ocorrem pelo fato de que as redes são muito extensas, possuem várias bifurcações, mudança de bitola de condutores, variações de carga, ramais trifásicos, bifásicos e monofásicos. Devido a alguns desses fatores, as concessionárias estão cada vez mais em busca de novos métodos que proporcionam a melhora na localização do determinado local da falta, ou seja, que o método aproxime com mais ênfase do ramal com defeito, de modo mais rápido e eficiente. Com isso, é possível aprimorar e aperfeiçoar uma melhor qualidade, segurança, confiabilidade e eficiência para as próprias concessionárias, além de aumentar a satisfação dos consumidores.

De acordo com esta pesquisa, que pode-se destacar pela sua grande importância em localizar faltas em um menor tempo através de uma distinta metodologia, a qual será detalhada a seguir.

Esta metodologia busca uma possível melhora no gerenciamento do sistema elétrico, que através da ajuda do SCADA, incluído neste sistema, poderá ter-se a monitoração em tempo real das grandezas elétricas da rede, provenientes dos dispositivos de proteção nela contida.

Dentre esses dispositivos de proteção, podemos destacar como sendo um dos conceitos envolvidos para realização dessa pesquisa, como já vimos anteriormente no capítulo 4 alguns conceitos sobre Relé, Chave Fusível e Religadores. Estes dispositivos servem de proteção para o funcionamento da rede elétrica, no momento da ocorrência de um curto-circuito num trecho da rede, este dispositivo de proteção que irá detectar e atuar rapidamente de forma a isolar o ramal com defeito, o desenergizando até o momento da localização, manutenção ou reparo do mesmo pela equipe da concessionária de distribuição de energia elétrica.

Entretanto, para o cumprimento de uma solução para identificar e localizar faltas em redes de distribuição segue a descrição do método proposto nessa pesquisa.

5.2 Metodologia Proposta

Nesta etapa, serão definidas as funcionalidades do sistema incluindo a concepção da metodologia inovadora para localização de defeitos em redes de distribuição.

A técnica inovadora se baseia no tratamento combinado de informações provenientes do sistema supervisório com simulações da rede elétrica. Para tanto, são usados os Mapas Auto-Organizáveis (*SOM: Self-Organizing Maps*) para agrupar os valores das grandezas elétricas simuladas (corrente de carga, correntes de curto-circuito, corrente pós-falta) em neurônios relativos a trechos do sistema. Quando ocorrer um defeito na rede de distribuição, o software atribuído para execução dessa pesquisa irá verificar os valores reais medidos a partir do sistema SCADA, que possui comunicação GPRS (*General Packet Radio Service*) com o religador telecomandado, confrontando-os com os valores usados no treinamento do SOM. Desta forma, o SOM identificará o neurônio que possui padrões mais similares aos valores medidos, indicando o trecho com problema.

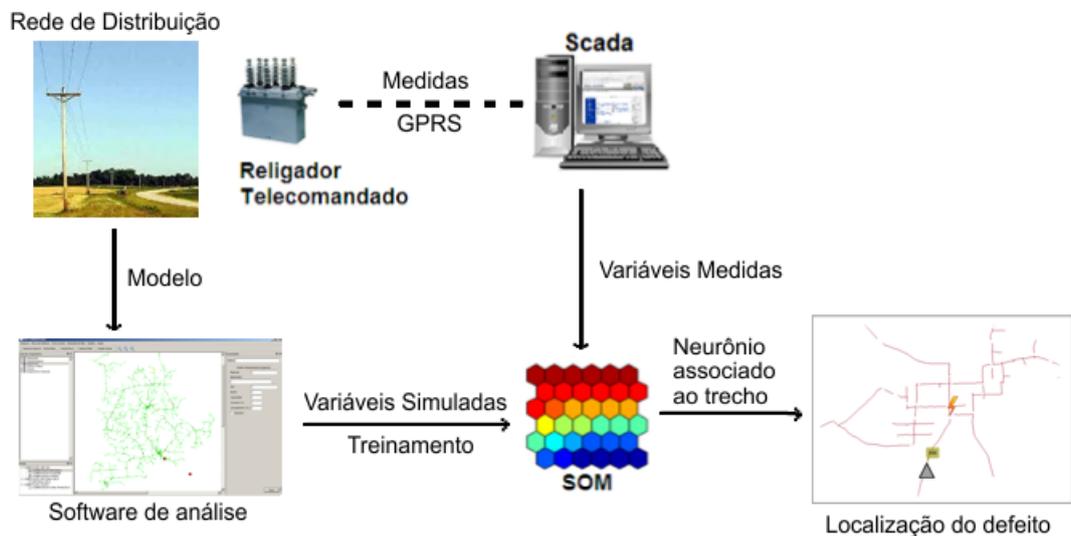
Assim, a proposta é desenvolver uma metodologia para localização de faltas em redes de distribuição a partir de estudos da rede combinados com a supervisão remota de dispositivos de proteção.

No caso de ocorrência de algum defeito na rede de distribuição, o dispositivo de proteção (por exemplo, religador telecomandado) atuará e informará no sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) do Centro de Operação a fase que atuou, as correntes de curtos-circuitos, a corrente pré-falta, tensões, potência ativa e reativa, entre outros. De posse destes dados, a ferramenta proposta os confrontará com análises computacionais a partir do emprego dos Mapas Auto-Organizáveis (SOM), de modo a associá-los com os seus neurônios um trecho/ramal da rede de distribuição.

Assim, quando o SOM receber este conjunto de dados, incluindo as informações dos equipamentos supervisionados, ele irá confrontar com os dados históricos e indicará qual mapa se aproxima mais dos dados de entrada, com isso, um neurônio irá se assemelhar mais a estas informações e conseqüentemente, se terá a localização do trecho de rede sob falta.

A Figura 5.1 ilustra a arquitetura do sistema proposto:

Figura 5.1- Arquitetura do sistema proposto.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Então os mapas serão diferenciados pelos dias da semana, patamares de carga e tipos de curto-circuito. Também é considerada nas simulações computacionais a informação das condições climáticas para curto-circuito monofásico-terra, onde será considerada uma resistência de contato do condutor ao solo, no caso da ocorrência de condição climática seco ou úmido.

Os mapas trazem dados como resultados que devem ser interpretados para obtermos as maiores e detalhadas informações sobre o algoritmo de auto-organização, ou seja, após esse processo de organização, o mapa treinado irá representar as variáveis da rede de distribuição para possível identificação do trecho com defeito.

5.3 Mapas Auto-Organizáveis

Já há tempo diferentes métodos são utilizados para a localização de faltas, com o objetivo de aperfeiçoar cada vez mais a sua precisão em dados relativos ao curto-circuito e nisso aproximar os dados de acordo com a distância real da falta em uma determinada rede de distribuição.

Entre esses vários métodos, esse trabalho aborda um método ainda pouco abordado em pesquisas de localização de faltas, chamado SOM (Self-Organizing Map).

O SOM foi escolhido para efetivação dessa pesquisa pelo fato de reconhecer e diferenciar vários dados de entrada ou variáveis da rede pelo seu processo de treinamento e organização, que será visto mais a frente. O método tem a finalidade de agrupar dados da rede em um algoritmo, formando um banco de dados históricos, que serão comparados com os dados de entrada em tempo real fornecidos pelo Sistema SCADA. Os mapas de dados históricos serão comparados com os dados reais, assim irá gerar o Mapa correspondente às suas características de entrada. Esse mapa determinará e identificará o local da falta na rede, fornecendo também o tipo de curto-circuito, horário em que ocorreu e dia de semana.

Para dar continuidade ao trabalho, a seguir será detalhado um pouco do método SOM.

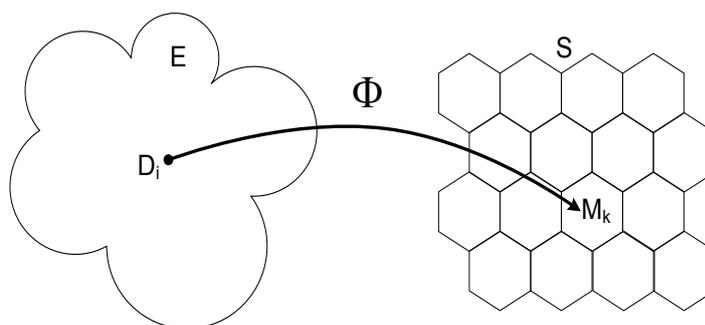
5.3.1 Definição

O algoritmo SOM (*Self-Organizing Maps*) ou Mapas Auto-Organizáveis foram introduzido na bibliografia no ano de 1982 por Teuvo Kohonen.

De acordo com Kohonen (2001) diz que o SOM é um tipo de rede neural desenvolvido para reconhecimento de padrões.

Segundo Sperandio (2004) e Haykin (2001), o algoritmo SOM é definido como uma transformação Φ não-linear, que mapeia um espaço de entrada $\mathcal{E} \in \mathbb{R}^n$ contínuo, cuja topologia é definida pela relação métrica dos vetores de dados $\mathcal{D} \in \mathcal{E}$, para um espaço de saída \mathcal{S} discreto, cuja topologia é definida por um conjunto de modelos \mathcal{M} dispostos em uma grade bidimensional, como mostra a Fig. 5.2. Normalmente essa rede de neurônios é interligada por conexões sinápticas (pesos) hexagonais.

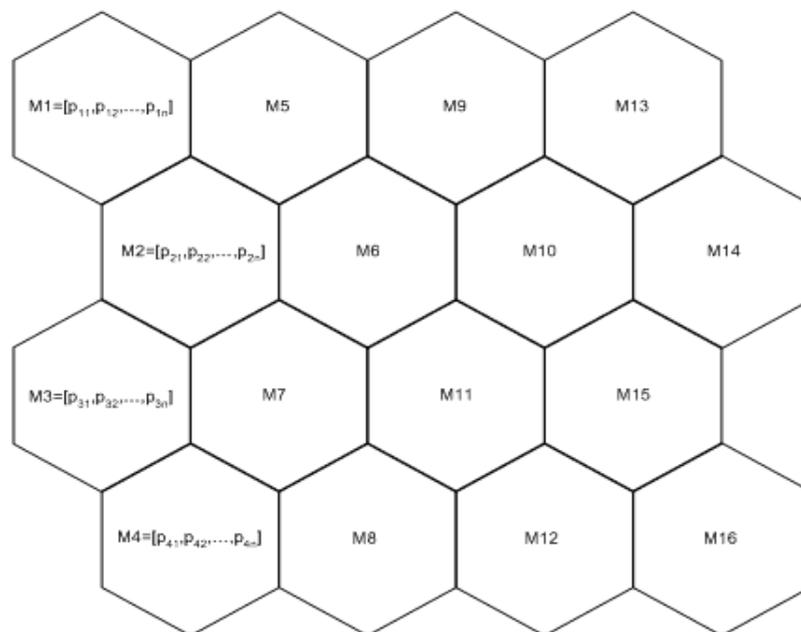
Figura 5.2 - Transformação $\Phi: \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{S}$ em mapa 4x4 com conexões hexagonais.



O principal objetivo do Mapa Auto-Organizável é transformar um padrão de sinal incidente de dimensão arbitrária em um mapa discreto uni ou bidimensional e realizar esta transformação adaptativamente de uma maneira topologicamente ordenada (SPERANDIO, 2004; HAYKIN, 2001).

De acordo com Sperandio (2004) o padrão de sinal incidente é um dado de entrada, composto por um vetor de dimensão arbitrária “n” (variáveis). O mapa é formado por neurônios, contendo modelos que também são vetores de dimensão “n” (pesos sinápticos), conectados entre si como uma rede (Fig. 5.3). O processo de ordenação acontece em três etapas e consiste em encontrar o modelo que melhor represente um dado de entrada na rede (vencedor). As ligações servem para ajustar modelos de neurônios próximos ao vencedor (vizinhos) ao padrão de entrada. Assim, ao final de várias iterações o mapa apresenta os dados associados aos seus neurônios, de forma que padrões similares encontram-se em neurônios contíguos.

Fig. 5.3 - Mapa ou rede hexagonal com 16 modelos (4x4).



Fonte: Sperandio, 2004.

A Fig. 5.3 apresenta um mapa bidimensional (4x4), com um total de 16 neurônios, onde cada um tem uma forma hexagonal que permite interagir com até 6 vizinhos.

Sperandio (2004) aborda que deve-se definir o tamanho e o tipo da rede, procedendo com a inicialização do mapa, que é o primeiro passo do algoritmo de auto-organização. Traz duas formas de montar a configuração inicial dos modelos:

- aleatória;
- linear.

Na forma aleatória os pesos sinápticos de cada modelo são distribuídos por sorteio, podendo ser qualquer valor pequeno o suficiente para estar dentro da variância dos dados de entrada. Essa é uma maneira de se comprovar a auto-organização do mapa, mas exige muito mais processamento. A inicialização linear tem a intenção de impor alguma ordem já na criação do mapa, mesmo que alguns modelos fiquem fora da distribuição de probabilidade da base de dados.

Entretanto, Sperandio (2004) sugere o método proposto por Kohonen (2001), que consiste em determinar os dois autovetores da matriz de autocorrelação da base de dados que possui os maiores autovalores, e então expandir um subespaço linear de duas dimensões sobre os neurônios da grade. Assim, o mapa já começa de certa forma organizada, e consegue atingir uma configuração estável em muito menos iterações do que com uma inicialização aleatória.

Após iniciado o mapa, acontece a fase de treinamento, onde seus pesos sinápticos são ajustados aos padrões de entrada e formam uma saída discreta.

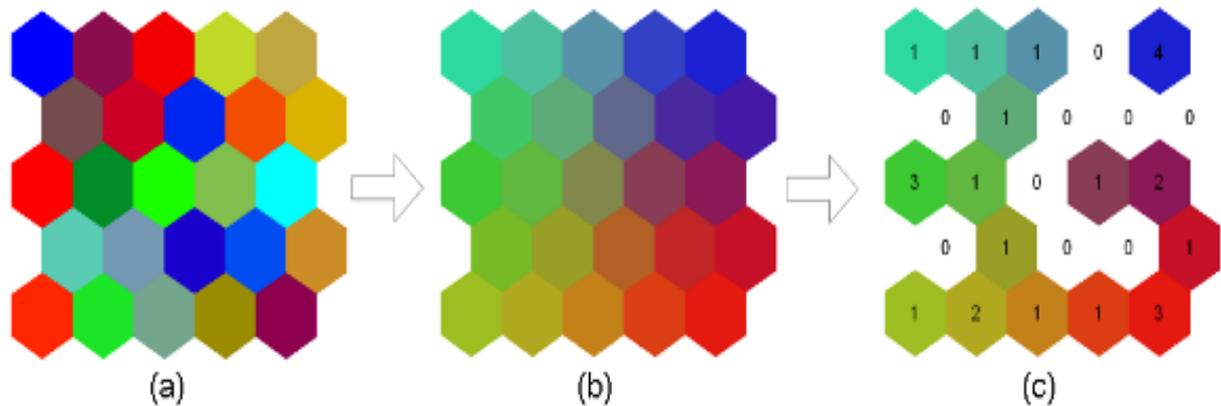
Esta fase de treinamento é dividida pela etapa:

- Processo Competitivo;
- Processo Cooperativo;
- Processo Adaptativo.

Após passar-se pelo processo de auto-organização, considerando uma inicialização aleatória do mapa, divide-se o processo de treinamento em: chamada de ordenação e fase de convergência.

Por fim, vem a interpretação dos resultados através da visualização dos Mapas Auto-Organizáveis, pois é a partir dessa visualização que são fornecidas e interpretadas as informações mais importantes.

Figura 5.4 - As três fases do processo de auto-organização; (a) base de dados / configuração inicial (b) mapa treinado (c) distribuição de densidade.



Fonte: SPERANDIO, M.; 2004.

Os Mapas Auto-Organizáveis (SOM) se tornaram um poderoso método para visualização de dados com grandes dimensões, convertendo complexas relações estatísticas não-lineares entre esses dados em simples relações geométricas, ou topológicas, em uma superfície de pequena dimensão. Consequentemente existe uma compressão de informação, mas sem perder a métrica ou hierarquia da relação entre os elementos expostos no mapa, e podendo também abstrair características intrínsecas da relação das variáveis envolvidas. Estes aspectos, visualização e abstração, são necessários em uma quantidade de aplicações, especialmente na engenharia (KOHONEN, SIMULLA, 1996).

Contudo, maiores definições e detalhamentos sobre as fases de treinamento, agrupamento e visualização dos Mapas Auto-Organizáveis podem ser encontradas em Sperandio (2004).

5.4 Desenvolvimento da Metodologia Proposta

A metodologia proposta se baseia no tratamento combinado das informações oriundas do religador telecomandado (etapa *online*: correntes pré-falta, corrente de curto-circuito e corrente pós-falta) e simulações computacionais (etapa *offline*: fluxo de potência horário e cálculos de curto-circuito). Então é feita a análise da dinâmica de coordenação e seletividade entre religador e chaves fusíveis, identificando defeitos na troncal com a abertura de religador ou em ramais com a abertura de chave fusível e rearme do religador. Também é feita a consideração dos tipos de resistência de contato entre uma fase e o solo, em função de

dia úmido ou seco. Estas informações são correlacionadas através da aplicação de Mapas Auto-Organizáveis (*SOM: Self-Organizing Maps*).

A Tabela 5.1 apresenta um extrato de alguns nós de um alimentador, no qual considera-se esse mesmo alimentador 5 para o estudo de caso, cujas grandezas elétricas simuladas serão usadas para a criação e o treinamento dos Mapas Auto-Organizáveis.

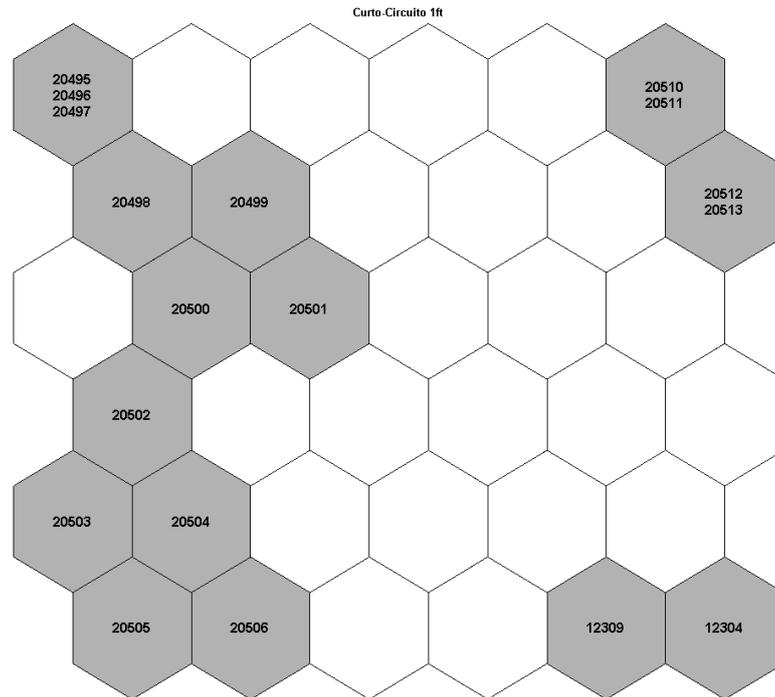
Tabela 5.1 - Exemplo de informações usadas no treinamento do SOM

Alimentador	Nó	ID Religador	Corrente pré-falta(A)	Corrente pós-falta(A)	3f(A)	2ft(A)	2f(A)	1ftz(A)	1ft(A)
5	20495	452	49.2	42.3	140.5	119.7	126.4	136.8	167.8
5	20496	452	49.2	42.3	140.7	119.9	126.6	136.9	168.0
5	20497	452	49.2	42.3	140.9	120.1	126.8	137.1	168.3
5	20498	452	49.2	42.3	141.1	120.3	127.0	137.3	168.6
5	20499	452	49.2	42.3	141.4	120.5	127.2	137.5	168.9
5	20500	452	49.2	42.3	141.8	120.8	127.5	137.8	169.5
5	20501	452	49.2	42.3	142.0	120.9	127.7	137.9	169.7
5	20502	452	49.2	42.3	142.2	121.1	127.9	138.1	170.0
5	12304	452	49.2	41.9	229.3	192.2	202.2	181.2	279.2
5	20503	452	49.2	42.3	142.5	121.4	128.1	138.3	170.5
5	20504	452	49.2	42.3	142.8	121.6	128.4	138.5	170.9
5	20505	452	49.2	42.3	143.1	121.8	128.6	138.7	171.2
5	20506	452	49.2	42.3	143.6	122.3	129.0	139.0	171.9
5	12309	452	49.2	41.9	225.0	188.5	198.5	179.4	273.6
5	20510	452	49.2	0.0	144.1	122.7	129.4	139.4	172.5
5	20511	452	49.2	0.0	144.5	123.0	129.8	139.7	173.1
5	20512	452	49.2	0.0	144.9	123.3	130.1	140.0	173.6
5	20513	452	49.2	0.0	145.1	123.5	130.3	140.1	173.9

Fonte: RELATÓRIO FINAL DO PROJETO DE P&D; 2011.

O valor da corrente de carga (corrente pré-falta) é usado para identificar o patamar, e as demais grandezas elétricas simuladas (corrente pós-falta e correntes de curto-circuito) são usadas no treinamento da rede neural SOM. O tamanho do mapa deve ser suficiente para agrupar o mínimo de nós em um mesmo neurônio, pois este será a referência para a identificação do trecho do sistema com defeito, conforme ilustrado na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Mapa 6x6 treinado com os valores da Tabela 5.1

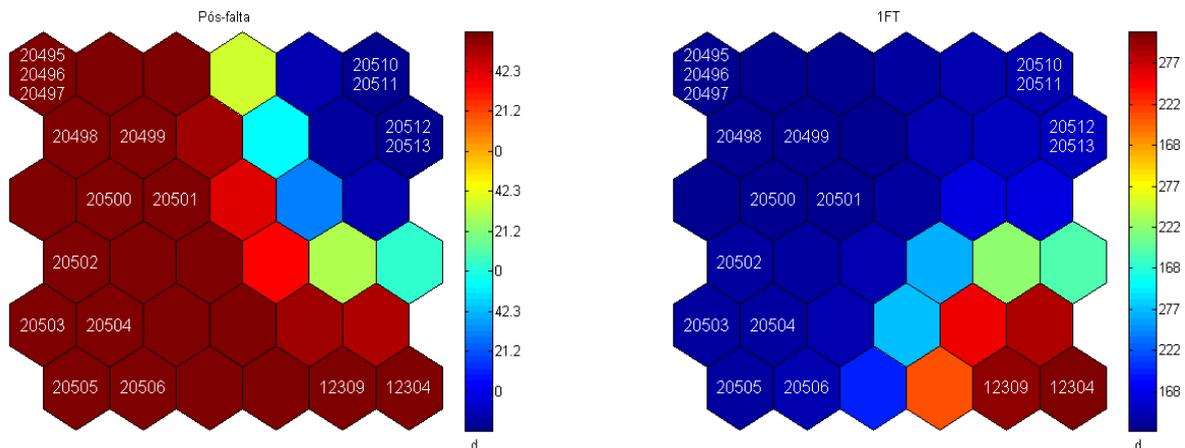


Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Na Figura 5.5, os neurônios cinza e com rótulos foram ativados, e estão associados a um ou mais nós da rede. Já os neurônios brancos não foram ativados, e não participarão da etapa de localização. Pode-se perceber três grupos de neurônios contíguos. O primeiro, do lado esquerdo do mapa, é relativo a um ramal longo; no canto superior direito tem-se nós do tronco (corrente pós-falta igual a zero); e no canto inferior direito aparecem dois nós de outro ramal.

A Figura 5.6 apresenta os mapas componentes para a corrente pós-falta e a do curto-circuito monofásico-terra (1FT), a escala de cores ao lado do mapa indica o valor da corrente em ampères associado ao neurônio.

Figura 5.6 - Intensidade das correntes para o mapa treinado



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

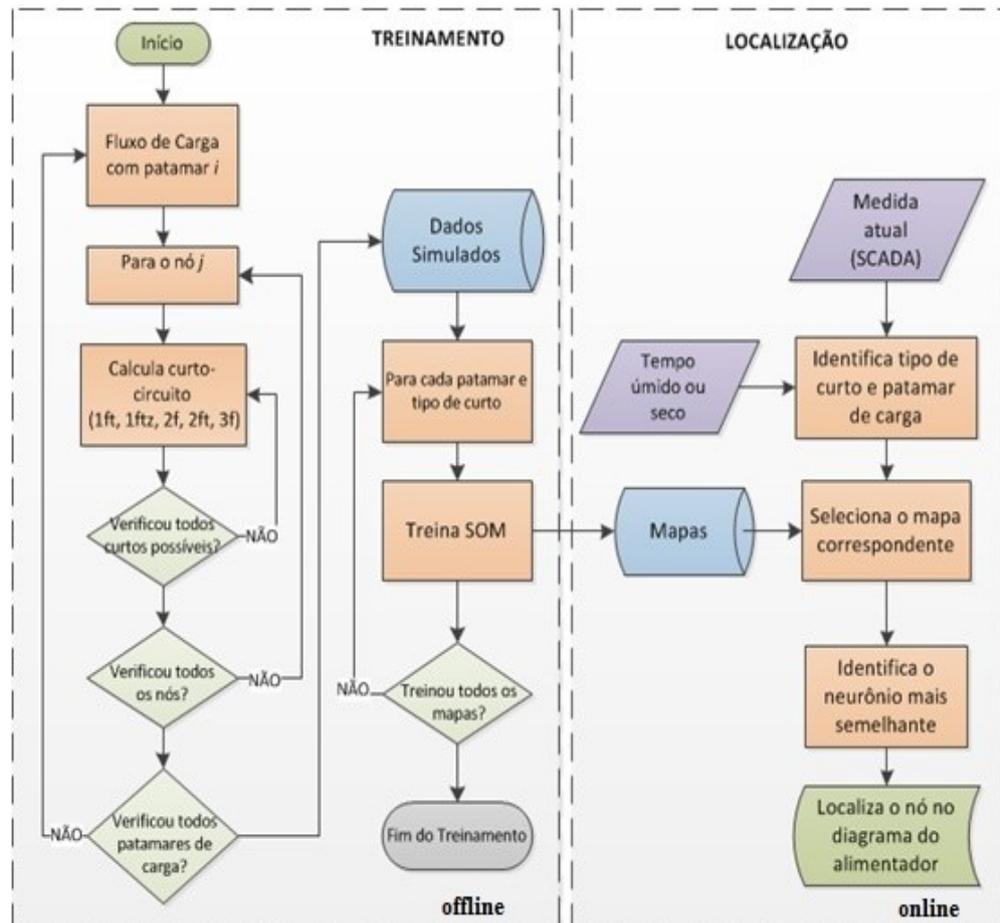
O sistema então armazena em um banco de dados estes mapas treinados, que serão consultados na ocorrência de um curto-circuito registrado pelo religador. Esse banco de dados será dividido por: Ramal e troncal, dias úteis, sábado, domingos e feriados, considerando que estes também serão divididos de acordo com seu patamar: (00:00-06:00), (07:00-11:00), (12:00-13:00), (14:00-17:00), (15:00-00:00), (18:00-20:00), (21:00-23:00) e por fim o patamar será dividido conforme o seu tipo de curto-circuito: Monofásico, monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico.

Assim, quando ocorrer um defeito na rede de distribuição, o sistema SCADA obtém as medidas das grandezas monitoradas via comunicação GPRS, e o programa de localização verifica os valores reais das variáveis de interesse. O patamar de carga é identificado a partir das correntes pré-falta, o tipo de curto-circuito é definido pelas fases que registraram corrente de falta, e após as tentativas de religamento, a corrente pós-falta indica se o problema é no tronco ou em um ramal. Foi considerado a atuação do religador para faltas permanentes na troncal das redes, assim a corrente pós-falta no religador é igual a zero, e a atuação de chaves fusíveis para faltas permanentes nos ramais das redes, assim a corrente pós-falta no religador é diferente de zero.

Esses dados então são usados para selecionar o mapa treinado mais compatível com a situação, e é feita a busca pelo neurônio que possui os padrões mais similares aos valores medidos, indicando o nó ou trecho com problema. Por fim, é feita a indicação do local de defeito na interface gráfica que apresenta a rede georeferenciada.

O fluxograma simplificado desta metodologia está representado na Figura 5.7:

Figura 5.7 - Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: RELATÓRIO FINAL DO PROJETO DE P&D; 2011

Como indica o fluxograma, o SOM é dividido em duas etapas: a primeira etapa é o treinamento (ocorre offline) e a segunda é a localização (ocorre online).

➤ **Treinamento:** Inicia-se o fluxo de carga de acordo com o seu patamar i (dia e hora) e seu nó j . Para este nó j é calculado o tipo de curto-circuito (monofásico, monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico), os cálculos de curto-circuito podem ser vistos passo a passo no capítulo 3 dessa pesquisa. Verificam-se todos os curtos-circuitos possíveis para o nó j ; caso não verificado todos, volta-se e se calcula novamente os curtos. Após isso, verifica-se os nós, ou seja, todos os curtos possíveis para os mesmos, caso essa verificação não aconteça, volta-se para nó j e se repete o processo. Verificados todos os nós, determinam-se todos os patamares de carga dos mesmos, caso contrário volta-se ao início do treinamento. Continuando o treinamento, simulam-se os dados e determina-se o patamar e o tipo de curto-circuito, que a partir daí dará origem aos mapas. Cada mapa será treinado conforme seu patamar de carga e tipo de curto, caso não aconteça todo esse processo, volta-se à fase da

determinação de cada patamar e tipo de curto-circuito. Realizado isso, ocorre o fim do treinamento e passa para a localização.

➤ **Localização:** Ocorre em tempo real (online) que a partir dos dados medidos em tempo real pelo SCADA, torna-se possível identificar o patamar de carga e o tipo de curto-circuito. Feita a identificação, seleciona-se o tipo de mapa correspondente às suas características de entrada, ou seja, o mapa é selecionado no banco de dados, onde ocorre o treinamento do SOM, cujo treinamento foi descrito anteriormente. Selecionado o mapa correspondente, identifica-se um neurônio mais semelhante, que localizará o nó com defeito na rede de distribuição.

Entretanto, a ferramenta computacional que será integrada ao sistema SCADA, irá permitir a localização de defeitos em tempo real, no qual o programa verifica os valores reais medidos a partir do sistema SCADA e os confronta com os valores usados no treinamento do SOM, identificando o neurônio que possui padrões mais similares aos valores medidos e, conseqüentemente, o trecho com problema.

O trecho com defeito é identificado pelo sistema, onde se identifica os defeitos permanentes na troncal quando ocorrer a abertura do religador.

Como neste trabalho foi definido que se o curto-circuito ocorrer na troncal, a corrente pós-falta no religador será igual a zero, sua identificação ocorre praticamente por comparação direta dos valores de curto-circuito simulados com os verificados em tempo real, como mostra as figuras 5.8 e 5.9.

Figura 5.8- Curto-circuito na troncal

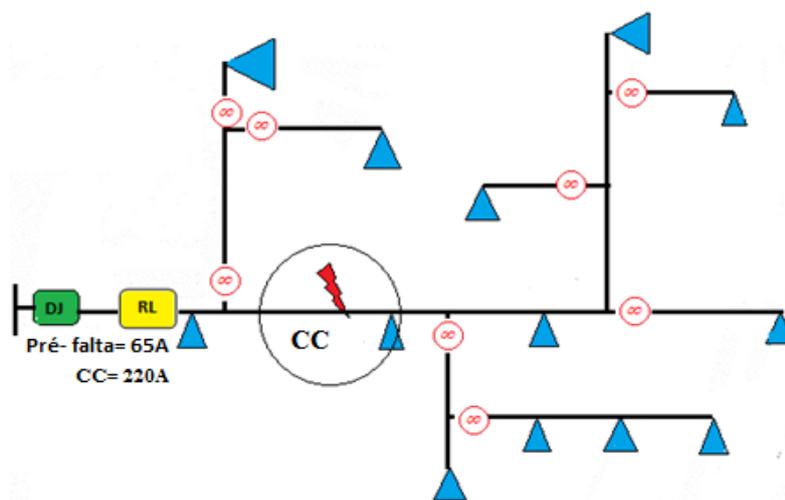
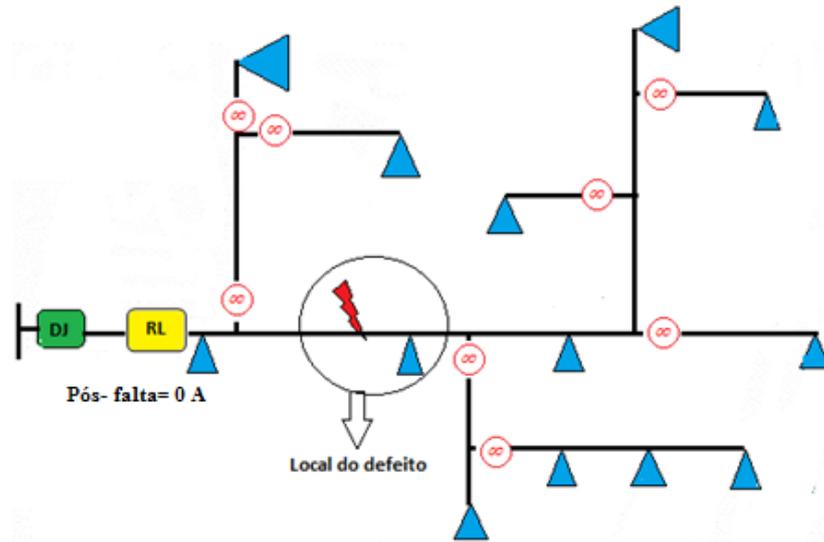


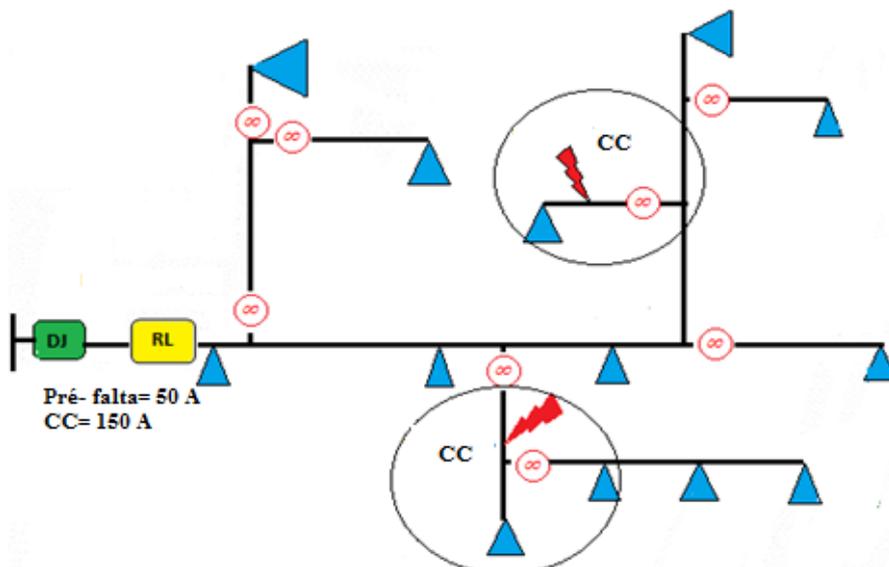
Figura 5.9 - Corrente de pós-falta igual a zero



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Já no caso de ocorrer um defeito nos ramos, foi considerada a abertura de chave fusível com corrente pós-falta diferente de zero no religador.

Figura 5.10- Curto-circuito em ramos

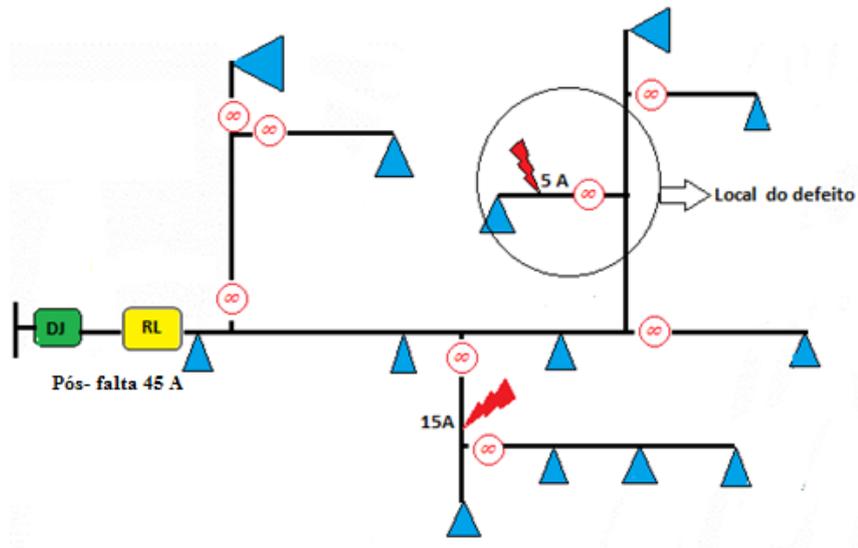


Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

No caso de faltas em ramos pode ocorrer o caso, que só a comparação de valores de curto-circuito não seja suficiente para indicar a localização do defeito, vistos que ramos

distantes podem apresentar a mesma impedância equivalente até o religador, conforme ilustrado na figura 5.10. Assim, este trabalho também usa a corrente pós-falta no religador para contribuir na distinção dos ramais com impedâncias similares, conforme ilustrado na figura 5.11.

Figura 5.11 - Local com defeito



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

De acordo com a figura 5.11, podemos distinguir o defeito através da corrente pós-falta. Com base na corrente pré-falta de 50A, podemos prever que o defeito ocorreu num ramal, pois houve o rearme do alimentador com corrente pós-falta de 45A. Neste caso, houve a abertura da chave fusível, isolando o ramal, com uma corrente estimada na diferença entre a corrente pré-falta e a pós-falta, isto é, o ramal com 5A.

Ressalta-se que essas análises são contempladas pelo SOM, sendo executada de forma automática.

6 ANÁLISES EXPERIMENTAIS

6.1 Formulação do Problema

Neste capítulo será apresentada a aplicação da metodologia desenvolvida para realização desta pesquisa, juntamente com dados simulados e verificados para a localização de falta na rede de distribuição, além da análise de sensibilidade envolvendo mudanças climáticas (seco e úmido) e análise usando a corrente de carga para os cálculos de curtos-circuitos.

As informações ou dados utilizados para a efetivação dessa pesquisa foram os valores coletados em tempo real pelo sistema de uma concessionária da região central do Rio Grande do Sul. Contudo, além desses valores obtidos em tempo real, foram utilizados valores dos dados históricos da rede elétrica, como os valores de patamar de carga e valores das correntes de curtos-circuitos (monofásico, monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico) para realização de simulações computacionais e análise de sensibilidades.

O desenvolvimento dessa metodologia foi implementado em uma ferramenta computacional em linguagem C, para o cumprimento e aplicação dessa pesquisa, através de suas simulações e análises computacionais.

A seguir serão apresentados resultados referentes a localização de falta, na qual será avaliada em três etapas:

- Primeira etapa será apresentada a aplicação da metodologia desenvolvida nessa pesquisa, que a partir dela será possível localizar o trecho com defeito na rede com maior precisão.
- Segunda etapa irá considerar uma análise de sensibilidade considerando mudanças climáticas para o caso de ocorrer curto-circuito monofásico-terra;
- Terceira etapa será feita outra análise de sensibilidade, sendo essa sobre o uso de corrente de carga nos cálculos de curtos-circuitos.

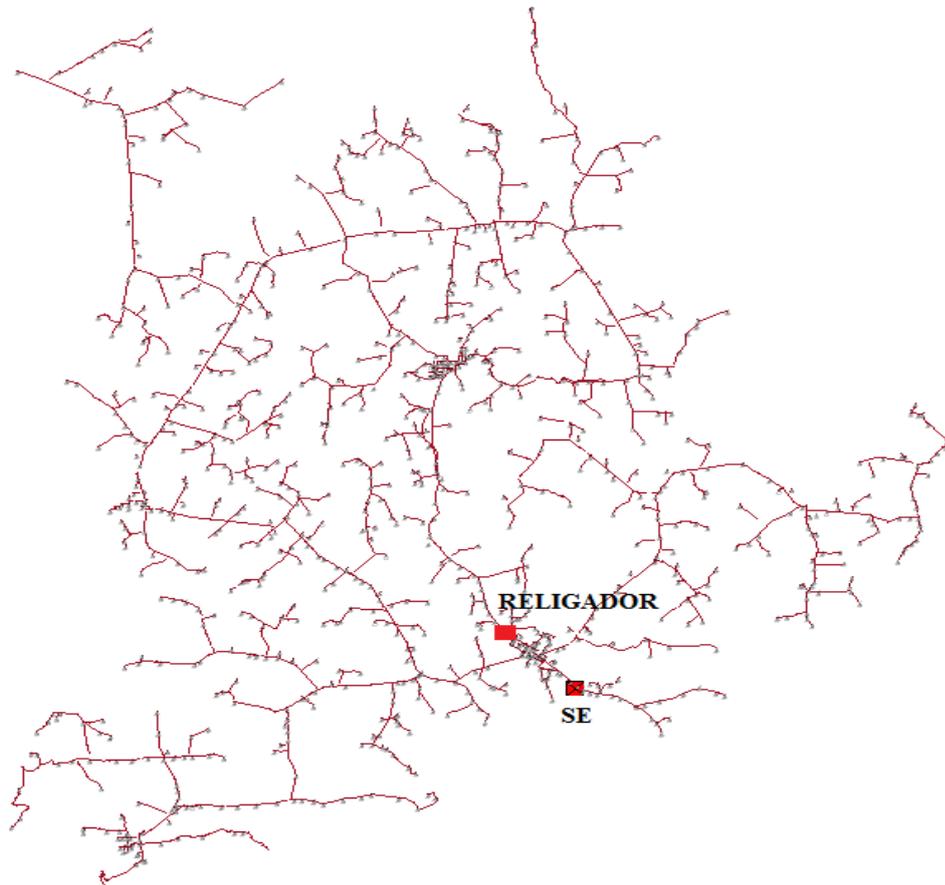
6.2 Localização de Falta

Conforme a metodologia desenvolvida, tem-se o objetivo de localizar a falta, ou seja, obter a distância do trecho ou nó com defeito com mais precisão se comparados com resultados de dados reais.

Com isso, também é possível analisar a execução dessa metodologia através de simulações computacionais usando os distintos tipos de curtos-circuitos e variando seu patamar de carga, além das condições climáticas.

Para testes, validações e aplicação do método proposto, foi escolhido o estudo de caso na concessionária da região central do Rio Grande do Sul, pelo fato que a mesma possui um alimentador com religador telecomandado (RL 452) e uma rede extensa com várias bifurcações, se enquadrando bem para a realização da pesquisa, conforme mostra a figura 6.1.

Figura 6.1 - Rede de distribuição do AL5



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Considerando que o SCADA passou a registrar os dados do religador no início do mês de maio na concessionária da região central. Foi disponibilizado para esta pesquisa dados que irão possibilitar a análise de resultados em um caso real.

Com base que no dia 08 de junho de 2011, às 15h11min, ocorreu o desarme do religador sinalizando curto-circuito monofásico, fase C, com as seguintes medições:

Tabela 6.1 - Variáveis medidas pelo RL 452

GRANDEZA ELÉTRICA	VALOR
Corrente Fase A	0 A
Corrente Fase B	0 A
Corrente Fase C	0 A
Corrente de Falta Fase A	44 A
Corrente de Falta Fase B	45 A
Corrente de Falta Fase C	297 A

Fonte: Dados disponibilizados pela concessionária piloto, 2011.

Aplicando a ferramenta computacional, para verificação dos dados.

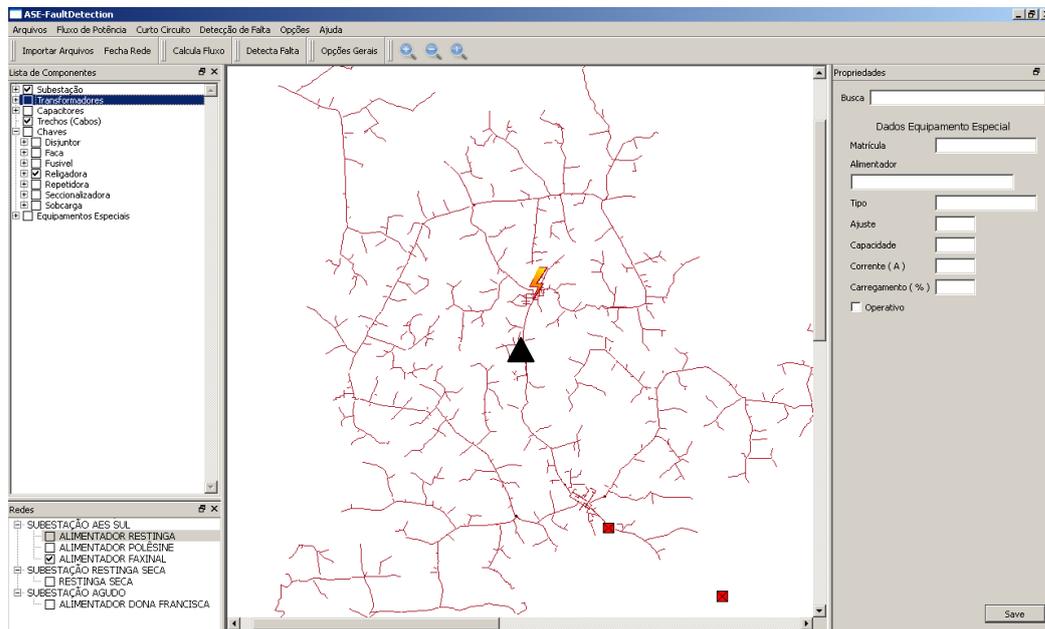
Figura 6.2 - Tela da ferramenta computacional aplicada para localização de defeitos.

The screenshot shows a software interface window titled "Dialogo de detecção de falta". At the top, there are two dropdown menus: "Tipo do Dia" set to "Dia útil" and "Patamar" set to "4 (14:00-17:00)". Below these are two columns of input fields. The left column, labeled "Correntes de CC", contains three rows: "Fase A" with the value 44, "Fase B" with the value 45, and "Fase C" with the value 297. The right column, labeled "Correntes Pós-falta", contains three rows: "Fase A" with the value 0, "Fase B" with the value 0, and "Fase C" with the value 0. Below the input fields is a section titled "Tipo de Curto Circuito" with four radio buttons: "Monofásico" (selected), "Bifásico", "Bifásico Terra", and "Trifásico". At the bottom left, there is a "Tempo" section with two radio buttons: "Úmido" (selected) and "Seco". At the bottom right, there are "OK" and "Cancel" buttons.

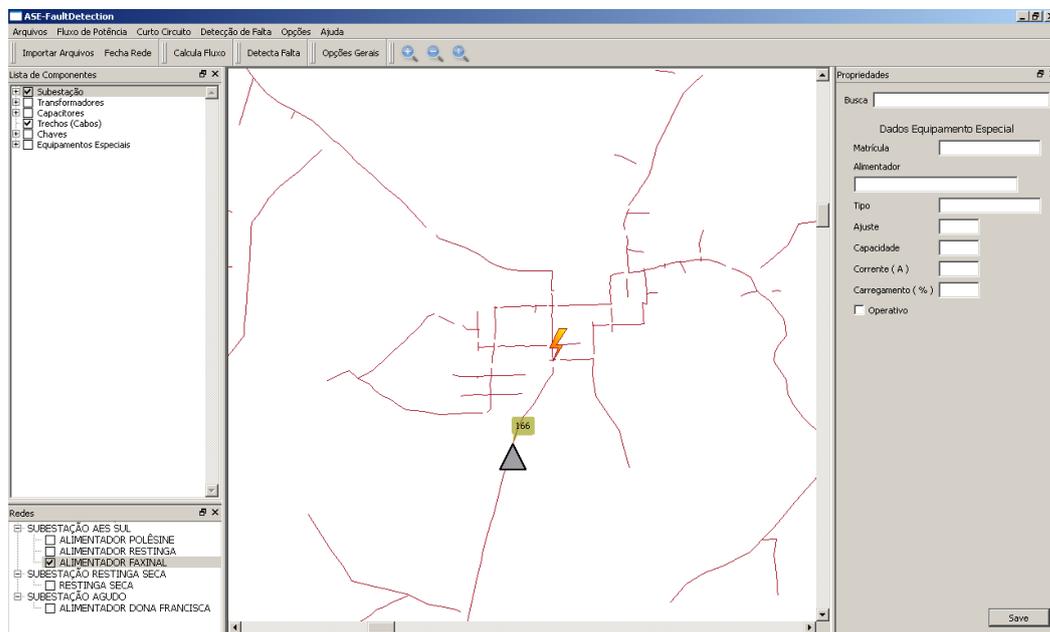
Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Como mostra a figura 6.2, os valores detectados pela ferramenta computacional são atualizados automaticamente pelo sistema SCADA, na qual a mesma identificou o local do defeito na troncal a uns 180 metros a jusante do transformador de distribuição 166.

Figura 6.3 - Localização do defeito na rede de distribuição. a) vista geral da topologia da rede; b) vista ampliada mostrando o transformador 166 como referência da falta na rede.



a)

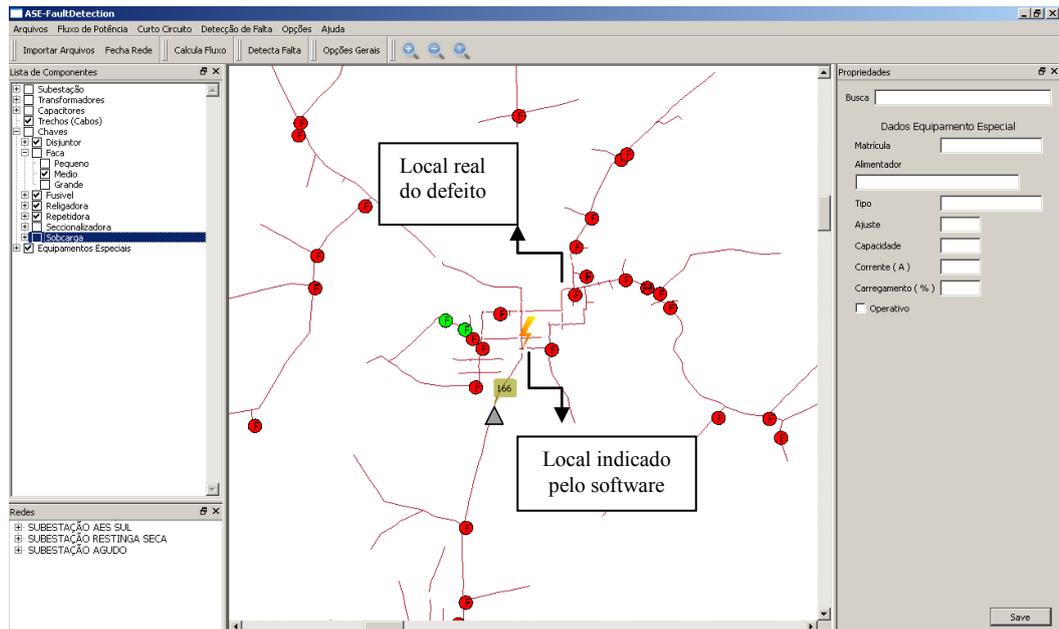


b)

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

No entanto, a figura abaixo mostra a localização real do local defeito e o indicado pelo sistema:

Figura 6.4 - Localização do defeito para CC monofásico de 297A.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Enfim, o resultado foi bastante satisfatório, visto que o defeito ocorreu a apenas uns 200 metros depois do local indicado pelo programa computacional. Considerando, que o defeito se encontrava aproximadamente 13 km do religador telecomandado, a diferença foi bastante pequena, em torno de 1,5%.

Como podemos observar as variáveis de entrada: corrente pré-falta, corrente de curto-circuito e corrente pós-falta, foram obtidas em tempo real pelo programa computacional integrado com o sistema SCADA. Na qual, a corrente pós-falta igual a zero que determinou que o curto se localizasse na troncal da rede, e o valor das correntes de fase que determinaram o tipo de curto-circuito, no caso curto monofásico de 297 A, que a diferenciou dos demais tipos de curtos, assim diferenciando também o local com defeito.

Para os Mapas Auto-Organizáveis, os valores medidos pelo SCADA em tempo real serão comparados com os valores dos dados históricos encontrados na ferramenta computacional. Com isso, podem ser gerados os mapas correspondentes às características de entrada, que denunciam um curto-circuito na rede. Através do estudo de caso real sinalizado pela concessionária e diagnosticado pelo software, seria possível determinar o patamar de carga através da corrente pré-falta e criar os mapas de corrente pós-falta. Este indicaria o ramal ou troncal e o mapa da corrente de curto-circuito correspondente à fase em que ocorreu. Por fim, seria possível analisar os mapas e determinar o neurônio mais semelhante, onde este neurônio indicaria o local da falta.

Entretanto, através da metodologia desenvolvida obteve-se bons resultados, embora a identificação do local do defeito possa ser ainda mais aproximada. Todavia, a diferença de 1,5% é muito pequena em relação á uma rede elétrica de distribuição, pois ela é muito extensa e possui muitos ramais com diferentes tipos de bitolas, o qual dificulta ainda mais o trabalho de localização.

Deste modo, a implementação de novas técnicas para localização de falta contribui muito para a melhoria da confiabilidade do sistema, embora o uso de um sistema inteligente ainda não esteja sendo abordado por todas as concessionárias de energia. Com o sistema indicando o possível local do defeito, a equipe de campo não perde tempo, procurando o defeito na rede, e sim ganha tempo indo diretamente ao trecho/ramal com essa falta, solucionando rapidamente o problema. Com isso, a concessionária não perde dinheiro, devido ao tempo de restabelecimento de energia rápido, além dessas grandes vantagens, também causa uma grande satisfação aos consumidores, além de ser uma metodologia eficiente e fácil de ser usada.

6.3 Análises de Sensibilidade Considerando Condições Climáticas (tempo úmido e seco)

O objetivo desta análise é mostrar as diferenças significativas que podem ocorrer na localização de defeitos de acordo com o valor da impedância de contato ao solo do curto-circuito monofásico-terra, que é em função das condições climáticas (tempo úmido e seco).

Ressalta-se que neste trabalho, este problema é amenizado visto que é considerada a informação da condição climática no momento da falta.

6.3.1 Simulações de curto-circuito monofásico-terra na troncal

Tabelas 6.2; 6.3; 6.4; 6.5; 6.6; 6.7; 6.8; 6.9; 6.10 - Valores da distância da falta em relação ao religador.

	CORRENTE DE CURTO	CORRENTE PÓS- FALTA	ÚMIDO	SECO
	IA=0A	0A	TR:155	TR:5
6.2	IB=0A	0A	12 km do RL	0,5 km do RL
	IC=310A	0A	*95,83%	

6.3	IA=60A	0A	TR:209	TR: 5
	IB=60A	0A	18,5 km do RL	0,5 km do RL
	IC=220A	0A	*97,29%	

6.4	IA=0A	0A	TR:155	TR : 5
	IB=0A	0A	13,5 km do RL	0,5 km do RL
	IC=297A	0A	*96,29%	

6.5	IA=45A	0A	TR:195	TR:5
	IB=45A	0A	17 km do RL	0,5 km do RL
	IC=248A	0A	*97,05%	

6.6	IA=50A	0A	TR:139	TR:5
	IB=50A	0A	3 km do RL	0,5 km do RL
	IC=590A	0A	*83,33%	

6.7	IA=50A	0A	TR:144	TR:5
	IB=50A	0A	7 km do RL	0,5 km do RL
	IC=423A	0A	*92,85%	

6.8	IA=0A	0A	TR:134	TR:5
	IB=0A	0A	5 km do RL	0,5 km do RL
	IC=520A	0A	*90%	

6.9	IA=65A	0A	TR:5	TR:5
	IB=65A	0A	0,5 km do RL	0,5 km do RL
	IC=710A	0A	*0%	

6.10	IA=40A	0A	TR:1529	TR:5
	IB=40A	0A	1,5 km do RL	0,5 km do RL
	IC=655A	0A	*66,66%	

*Indica a diferença (%) da distância da falta quando considerado o clima úmido em relação ao clima seco.

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

De acordo com as tabelas acima, foi realizadas simulações na ferramenta computacional, a fim de analisar o impacto das mudanças climáticas quando estas são variadas ou alteradas na localização de falta da rede de distribuição.

Foram apenas considerados curtos-circuitos monofásico-terra com o propósito de variá-los entre seco e úmido. O tipo seco é considerado uma resistência de contato padrão, usada pelas concessionárias de 40Ω e o tipo úmido é considerada uma resistência de 5Ω.

Variando as correntes de curto para a troncal, pode-se analisar a sensibilidade através da diferença da distância da sua localização em relação ao religador.

Relacionando a distância da localização do defeito encontrado para úmido e seco, pode-se encontrar a diferença (%) dada pela fórmula:

$$\%Sensibilidade\ da\ falta\ na\ troncal = \frac{\Delta S_{úmido} - \Delta S_{seco}}{\Delta S_{úmido}} \cdot 100\% \quad (52)$$

Considerando que o ΔS é a distância em km da localização do curto-circuito em relação ao Religador Telecomandado.

Com o objetivo de mostrar a diferença (%) da distância de quando ocorrer um CC monofásico-terra para clima seco em função da diferença (%) da distância de quando ocorrer um CC monofásico-terra para clima úmido. Assim será possível observar o quanto o CC para clima seco irá interferir na localização da falta, quando esta ocorrer.

Com base nos dados simulados, pode-se encontrar a % da sensibilidade da falta na troncal, em função da fórmula 52.

Tabela 6.11- Distância da falta (km) em função da diferença (%) climática.

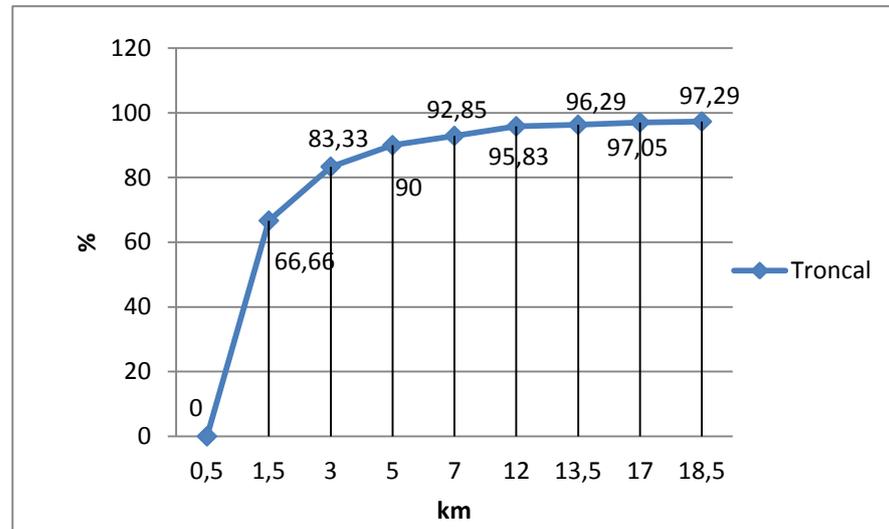
Km	0,5	1,5	3	5	7	12	13,5	17	18,5
%	0	66,66	83,33	90	92,85	95,83	96,29	97,05	97,29

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Ressalta-se que o religador serve como referencial, onde através na tabela 6.11, pode-se verificar os valores encontrados a partir das simulações, no qual estes são os valores da distância de ocorrência do curto monofásico-terra, ou seja, da falta para clima úmido. Já os valores dados em %, são a diferença da distância de ocorrência do curto monofásico-terra para clima seco.

De acordo com o gráfico, observa-se a diferença.

Figura 6.5 - Gráfico da distância da falta para clima úmido em função da diferença da distância da falta para clima seco



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Desta forma, analisando a curva do gráfico 6.5, pode-se destacar que a análise de sensibilidade tem o objetivo de mostrar o impacto causado na identificação do defeito quando considerada a variação climática (úmido e seco) para as simulações computacionais.

Considerado a variação de valores para correntes de $CC1\phi t$, obteve-se para cada simulação a distância ocorrida em relação ao religador telecomandado, na qual foram simuladas para as duas condições climáticas.

Interpretando o gráfico, temos a diferença (%) da distância do curto para clima seco em função da distância em km da falta para clima úmido, ou seja, podemos concluir que quando ocorrer uma falta para clima seco, esta irá provocar uma alteração muito grande na localização do trecho. Como nesse caso é considerada uma resistência de contato de 40Ω , é ela que irá provocar a alteração do local de defeito.

Avaliando umas das simulações da tabela 6.8, temos:

$$IA = 0A; IB = 0A; IC = 520A.$$

Para esse curto $1\phi t$ quando considerada resistência de contato de 5Ω , no caso para clima úmido, foi encontrada a distância na troncal de 5 km do religador. Já para esse mesmo curto, agora considerando resistência de contato de 40Ω , ou seja, pra clima seco, foi encontrada a distância de 0,5 km do religador.

Utilizando a fórmula 52, tem-se a diferença das distâncias de falta igual a 90%, ou seja, no caso da ocorrência dessa falta com resistência de contato do clima seco, a sua

localização terá uma diferença de 90% em relação a distância da falta se ocorrida com resistência de contato do clima úmido.

No entanto, foram realizadas várias simulações variando os valores de curto monofásico-terra (conforme a tabela), na busca de mostrar a diferença causada na localização da falta quando estas são influenciadas por mudanças climáticas.

6.3.2 Simulações de curto-circuito monofásico-terra nos ramais

Tabelas 6.12; 6.13; 6.14; 6.15; 6.16; 6.17; 6.18; 6.19 e 6.20 - Valores da distância da falta em relação ao religador.

	CORRENTE DE CURTO	ÚMIDO	SECO	CORRENTE PÓS-FALTA
6.12	IA=0A	TR:155	TR:5	40A
	IB=0A	10,5 km do RL	1 km do RL	40A
	IC=310A	*90,47%		40A
6.13	IA=60A	TR:1554	TR:5	55A
	IB=60A	22 km do RL	1 km do RL	55A
	IC=220A	*95,45%		55A
6.14	IA=0A	TR:156	TR:5	40A
	IB=0A	14 km do RL	1 km do RL	40A
	IC=297A	*92,85%		40A
6.15	IA=45A	TR:177	TR: 5	40A
	IB=45A	16,5 km do RL	1 km do RL	40A
	IC=248A	*93,93%		40A
6.16	IA=50A	TR :5	TR:5	45A
	IB=50A	2 km do RL	1 km do RL	45A
	IC=590A	*50%		45A
6.17	IA=50A	TR:135	TR:5	45A
	IB=50A	6 km do RL	1 km do RL	45A
	IC=423A	*83,33%		45A

6.18	IA=OA	TR:134	TR:5	60A
	IB=OA	4 km do RL	1 km do RL	60A
	IC=520A	*75%		60A

6.19	IA=65A	TR:5	TR:5	60A
	IB=65A	1 km do RL	1 km do RL	60A
	IC=710A	*0%		60A

6.20	IA=40A	TR:5	TR:5	35A
	IB=40A	1,5 km do RL	1 km do RL	35A
	IC=655A	*33,33%		35A

*Indica a diferença (%) da distância da falta quando considerado o clima úmido em relação ao clima seco.

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

De acordo com as tabelas acima, foram realizadas simulações na ferramenta computacional, mas desta vez para faltas em ramais, como podemos perceber a corrente pós-falta cujo valor é diferente de zero indica que a falta ocorreu em um ramal e não na troncal. Com o mesmo objetivo visto anteriormente para faltas na troncal, podemos analisar o impacto das mudanças climáticas quando estas são variadas ou alteradas na localização de falta encontradas nos ramais da rede de distribuição.

Usando os mesmos conceitos das simulações para faltas na troncal, serão usadas as mesmas correntes de CC monofásico-terra simuladas anteriormente, com o acréscimo da corrente pós-falta, esta responsável pela indicação da falta no ramal. Contudo, também será analisada a sensibilidade através da diferença das distâncias em relação ao religador, considerando a distância em km da falta quando estimado clima úmido e a distância em km quando considerado clima seco.

Com o mesmo objetivo de mostrar a diferença (%) da distância de quando ocorrer um CC monofásico-terra para clima seco em função da diferença (%) da distância de quando ocorrer um CC monofásico-terra para clima úmido.

Com isso será possível observar o quanto o CC para clima seco irá interferir na localização da falta, quando esta ocorrer.

Com base nas simulações, pode-se encontrar a % da sensibilidade da falta no ramal, em função da fórmula:

$$\%Sensibilidade\ da\ falta\ no\ ramal = \frac{\Delta S_{úmido} - \Delta S_{seco}}{\Delta S_{úmido}} \cdot 100\% \quad (53)$$

Tabela 6.21 - Distância da falta (km) em função da diferença (%) climática.

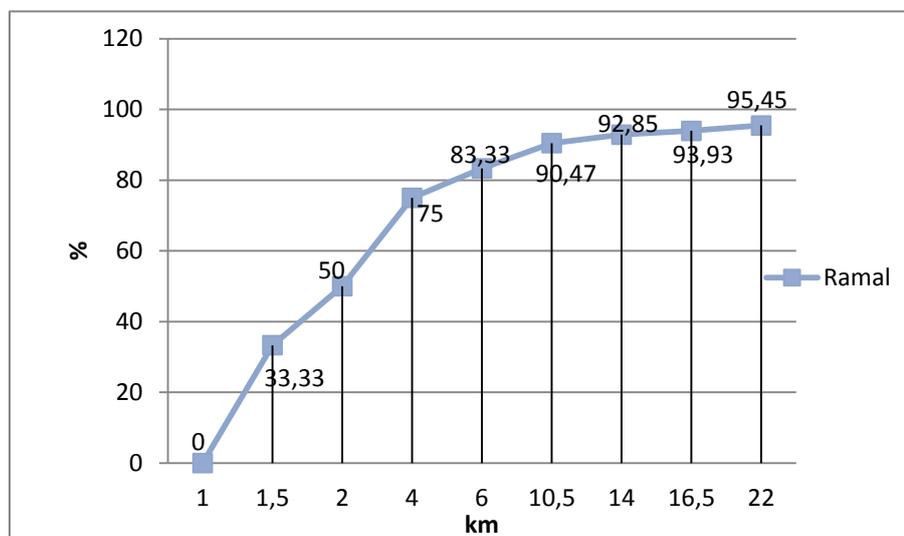
Km	1	1,5	2	4	6	10,5	14	16,5	22
%	0	33,33	50	75	83,33	90,47	92,85	93,93	95,45

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Lembrando que podemos verificar através da tabela 6.21 os valores encontrados em km, são os valores da distância da falta monofásica-terra localizada na rede em relação a distância do religador, considerando clima úmido. Logo os valores dados em % é a diferença da distância do ocorrido evento da falta monofásica, para clima seco.

De acordo com o gráfico, pode-se observar:

Figura 6.6 - Gráfico da distância da falta para clima úmido em função da diferença da distância da falta para clima seco.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Como já abordado o objetivo da análise de sensibilidade, ressalta-se que se obteve para cada simulação de curto-circuito em ramal, a distância ocorrida em relação ao religador telecomandado, na qual foram simuladas para as duas condições climáticas, úmido e seco.

Analisando o gráfico da figura 6.6, apresentamos a diferença (%) da distância da falta para clima seco em função da distância em Km da falta para clima úmido.

De acordo com a tabela 6.18, prevê-se a diferença do trecho com falta quando ocorrido no ramal.

$$I_A = 0A;$$

$$I_B = 0A;$$

$$I_C = 520A.$$

Com corrente pós-falta de $I_A=60A$, $I_B=60A$, $I_C=60A$

Consideradas as mesmas simulações para curtos-circuitos na troncal e nos ramais, entretanto, nota-se uma pequena diferença na sua localização, principalmente quando considerado as mudanças climáticas.

Para esse curto $1\phi t$ de 520A, considerada resistência de contato de 5Ω , no caso para clima úmido, se encontrou no ramal a uma distância de 4 km em relação ao religador. Já para esse mesmo curto $1\phi t$, agora considerando resistência de contato de 40Ω , ou seja, clima seco, foi encontrada a distância de 1 km do religador.

Utilizando a fórmula 53, achou-se a diferença da distância de localização da falta igual a 75%, ou seja, no caso da ocorrência dessa falta com resistência de contato (clima seco), a sua localização terá uma diferença de 75% em relação a distância da localização da falta se ocorrida com resistência de contato para clima úmido.

Foram realizadas várias simulações de curto-circuito monofásico-terra para clima seco e clima úmido, com o objetivo de mostrar as diferenças significativas que podem ocorrer na localização de defeitos de acordo com o valor da impedância de contato ao solo do curto-circuito monofásico-terra, que é em função das condições climáticas (tempo úmido e seco).

Por isto, a metodologia proposta contempla isto, onde se tem a informação da condição climática (tempo bom ou chuvoso) que se encontrava no período do defeito.

6.4 Análises de Sensibilidade Considerando a Corrente de Pré-falta no Cálculo das Correntes de Curtos-Circuitos

Adicionalmente, o objetivo desta análise é mostrar as diferenças significativas que podem ocorrer na localização de defeitos caso não seja considerada a corrente de carga (pré-carga) nos cálculos das correntes de curto-circuito. Normalmente, tal grandeza é desprezada

para sistemas de transmissão, porém os de distribuição possuem relevância. Assim, o sistema proposto contempla esta informação.

Para esta análise será considerada as simulações para curto-circuito, monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico, na qual serão avaliadas duas situações para cada tipo de curto: a primeira situação será usada a corrente de carga (pré-falta) para os cálculos de curto-circuito, a segunda situação não será usada a corrente de carga (pré-falta) para os mesmos cálculos.

Através dessas simulações será possível ver o comportamento dos valores de CC com a corrente pós-falta e sem a corrente pós-falta, fazendo-se uma análise semelhante à análise de sensibilidades considerando mudanças climáticas (seco e úmido). Neste caso pode-se calcular a diferença (%) para cada tipo de curto-circuito, de acordo com a fórmula:

$$\% \text{ Sensibilidade de CC} = \frac{CC_{\text{com corrente de carga}} - CC_{\text{sem corrente de carga}}}{CC_{\text{com corrente de carga}}} \cdot 100\% \quad (54)$$

Onde:

CC: Curto Circuito.

Deste modo, sabendo que a corrente de carga varia de acordo com o seu patamar, será analisado alguns relatórios de dados históricos referentes a informações reais de uma rede elétrica. Entretanto, serão considerados os valores de curtos-circuitos com corrente de carga e os valores de curtos sem a corrente de carga para os diferentes patamares de dias e horas, na forma de mostrar a diferença % entre esses valores para as distintas situações.

6.4.1 Cálculo das correntes de curto-circuito considerando corrente pré-falta

Através de simulações de curtos-circuitos com corrente de carga rodados para os diferentes tipos patamares, foi possível gerar um relatório de dados históricos referentes às várias simulações.

Será analisado o mesmo nó da rede para todos os tipos de curtos e patamares, de acordo com a tabela abaixo se obteve:

Tabela 6.22 - Relatório dos valores de curtos-circuitos simulados para os diferentes patamares.

Patamar	Corrente pré-falta(A)	3L(A)	2LG(A)	2L(A)	1LG(A)	Corrente Pós-falta(A)
Útil- 0	40,7	144,9	121	129,1	137,8	40,7
Útil- 1	44,7	138,8	117,4	124,4	134	39,9
Útil- 2	64,8	147,8	129,3	134,8	147,8	51,6
Útil- 3	49,2	140,4	119,7	126,4	136,6	42,3
Útil- 4	61,2	146	127	132,7	145,1	49,4
Útil- 5	73,4	152,5	135,1	140	154,1	57,1
Útil- 6	55,6	143,4	123,6	129,7	141,3	46,1
Sábado-0	40,7	144,9	121	129,1	137,8	40,7
Sábado-1	44,7	138,9	117,4	124,4	134	39,9
Sábado-2	53,9	142,5	122,4	128,7	140	45
Sábado-3	48,1	140,1	119,1	125,9	136,1	41,7
Sábado-4	52	141,7	121,4	127,8	138,7	44
Sábado-5	64,4	150,3	132,4	137,5	151,1	54,5
Sábado-6	61,2	146	127	132,7	145,1	49,4
Domingo- 0	40,7	144,9	121	129,1	137,8	40,7
Domingo- 1	45,1	139	117,6	124,6	134,2	40,2
Domingo- 2	46,1	139,3	118,1	125	134,8	40,7
Domingo- 3	43,8	138,6	116,9	124,1	133,4	39,5
Domingo- 4	50,3	141	120,4	126,9	137,6	43
Domingo- 5	69,4	150,3	132,4	137,5	151,1	54,5
Domingo- 6	50,3	141	120,4	126,9	137,6	43

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

6.4.2 Cálculo das correntes de curto-circuito não considerando corrente pré-falta

Continuando as simulações de curto-circuitos, serão rodados os curtos sem a corrente pré-falta, na qual será rodada para os diferentes tipos de patamares, assim gerar um relatório de dados históricos referentes às essas simulações, verificando os novos valores de curto-circuito sem corrente pré-falta.

Também será analisado o mesmo nó da rede para todos os tipos de curtos e patamares, de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 6.23 - Relatório dos valores de curtos-circuitos simulados para os diferentes patamares.

Patamar	Corrente pré-falta(A)	3L(A)	2LG(A)	2L(A)	1LG(A)	Corrente Pós-falta(A)
Útil- 0	0	122	94,5	105,6	102,2	40,7
Útil- 1	0	113	87,5	97,8	94,7	39,9
Útil- 2	0	106,9	82,8	92,6	89,6	51,6
Útil- 3	0	111,4	86,3	96,5	93,3	42,3
Útil- 4	0	107,9	83,6	93,4	90,4	49,4
Útil- 5	0	104,7	81,1	90,7	87,8	57,1
Útil- 6	0	109,4	84,7	94,7	91,7	46,1
Sábado-0	0	122	94,5	105,6	102,2	40,7
Sábado-1	0	113	87,5	97,8	94,7	39,9
Sábado-2	0	109,9	85,2	95,2	92,1	45
Sábado-3	0	111,7	86,6	96,8	93,6	41,7
Sábado-4	0	110,5	85,6	95,7	92,6	44
Sábado-5	0	105,7	81,9	91,6	88,6	54,5
Sábado-6	0	107,9	83,6	93,4	90,4	49,4
Domingo- 0	0	122	94,5	105,6	102,2	40,7
Domingo- 1	0	112,8	87,4	97,7	94,5	40,2
Domingo- 2	0	112,4	87,1	97,4	94,2	40,7
Domingo- 3	0	113,3	87,8	98,1	95	39,5
Domingo- 4	0	111	86	96,1	93	43
Domingo- 5	0	105,7	81,9	91,6	88,6	54,5
Domingo- 6	0	111	86	96,1	93	43

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Como não foi considerado a corrente pré-carga para as simulações da tabela 6.23 pode-se verificar que a corrente pré-falta consta no relatório como zero, com isso as correntes dos curtos também diminuiram, em função do valor da corrente de carga.

6.4.3 Cálculo Percentual das Diferenças

De acordo com os valores simulados e obtidos no relatório do curto-circuito com corrente pré-falta e sem corrente pré-falta, podemos analisar a diferença % dos seus valores simulados em relação ao dia e tipo de patamar.

Considerando para os cálculos de sensibilidade a fórmula 54:

$$\% \text{ Sensibilidade de CC} = \frac{CC_{\text{com corrente de carga}} - CC_{\text{sem corrente de carga}}}{CC_{\text{com corrente de carga}}} \cdot 100\%$$

Obtiveram-se os seguintes valores para dia útil:

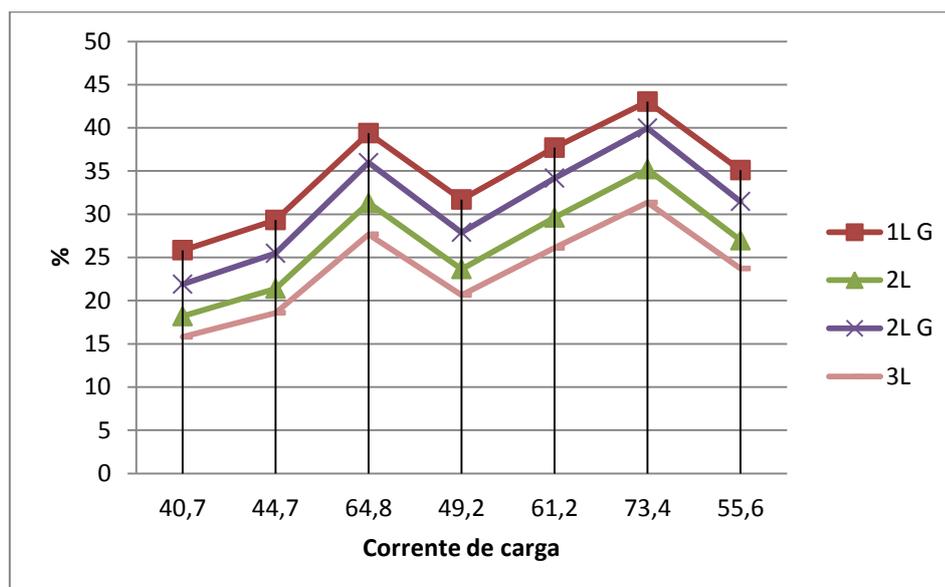
Tabela 6.24 - Valores calculados em % da diferença das correntes de CC com corrente de carga em função das correntes de CC sem corrente de carga

Patamar	Corrente pré-falta	3L	2LG	2L	1LG
útil 0	40,7A	15,80%	21,90%	18,20%	25,83%
útil 1	44,7A	18,58%	25,46%	21,38%	29,32%
útil 2	64,8A	27,67%	35,96%	31,30%	39,37%
útil 3	49,2A	20,65%	27,90%	23,65%	31,69%
útil 4	61,2A	26,09%	34,17%	29,61%	37,69%
útil 5	73,4A	31,34%	39,97%	35,21%	43,02%
útil 6	55,6A	23,70%	31,47%	26,98%	35,10%

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Em função dos valores da tabela 6.24, obteve-se o gráfico:

Figura 6.7 - O gráfico mostra os valores da diferença de CC calculados da tabela para dias úteis.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Para o sábado, obteve-se os seguintes valores:

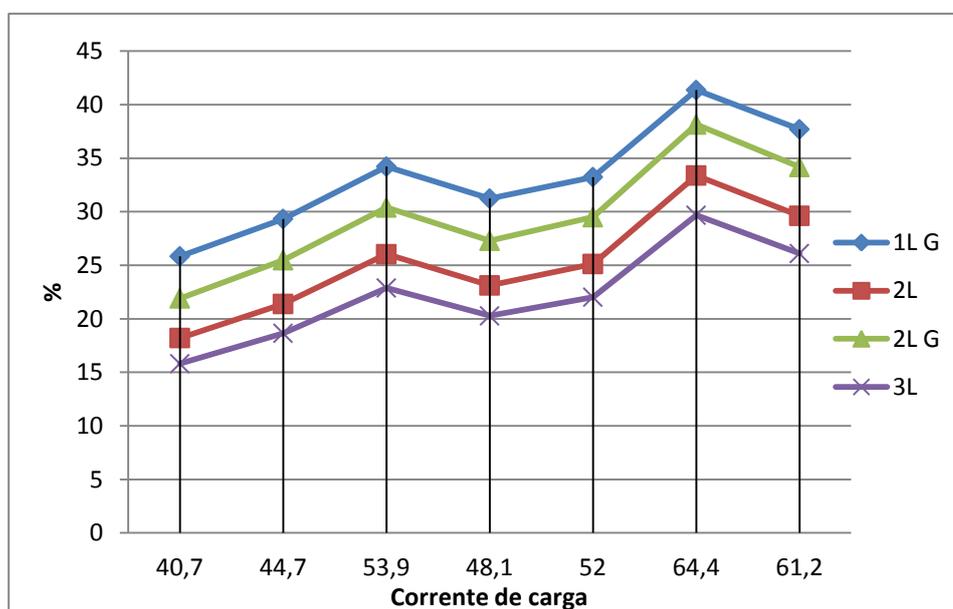
Tabela 6.25 - Valores calculados em % da diferença das correntes de CC com corrente de carga em função das correntes de CC sem corrente de carga

Patamar	Corrente pré-falta	3L	2LG	2L	1LG
sábado 0	40,7A	15,80%	21,90%	18,20%	25,83%
sábado 1	44,7A	18,64%	25,46%	21,38%	29,32%
sábado 2	53,9A	22,87%	30,39%	26,02%	34,21%
sábado 3	48,1A	20,27%	27,28%	23,11%	31,22%
sábado 4	52A	22,01%	29,48%	25,11%	33,23%
sábado 5	64,4A	29,67%	38,14%	33,38%	41,36%
sábado 6	61,2A	26,09%	34,17%	29,61%	37,69%

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Com os valores encontrados na tabela, temos o gráfico:

Figura 6.8 - O gráfico mostra os valores da diferença de CC calculados da tabela para o sábado.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Para os domingos e feriados, tem-se os seguintes resultados:

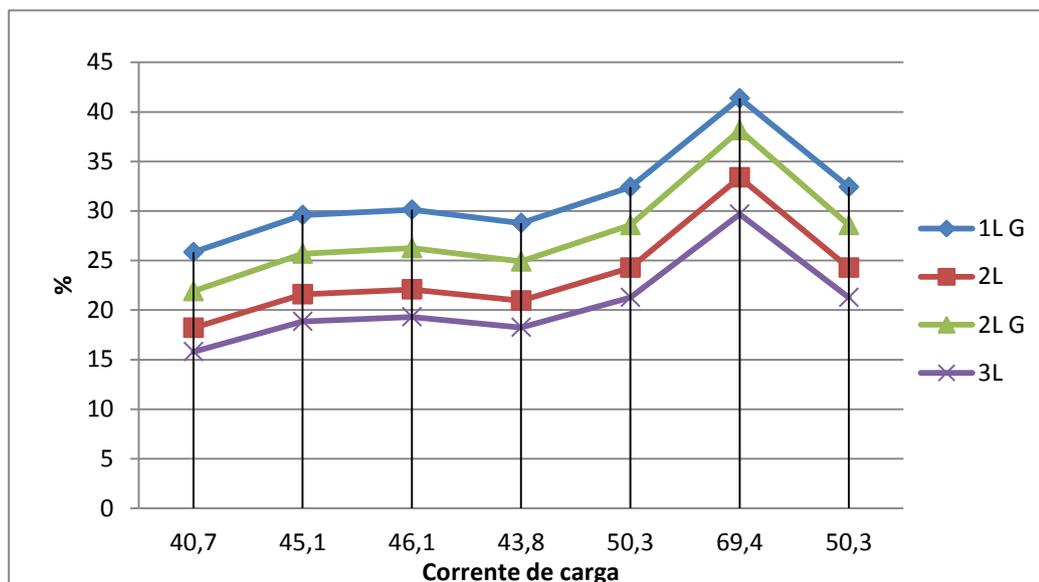
Tabela 6.26 - Valores calculados em % da diferença das correntes de CC com corrente de carga em função das correntes de CC sem corrente de carga.

Patamar	Corrente pré-falta	3L	2LG	2L	1LG
domingo 0	40,7A	15,80%	21,90%	18,20%	25,83%
domingo 1	45,1A	18,84%	25,68%	21,58%	29,58%
domingo 2	46,1A	19,31%	26,24%	22,08%	30,11%
domingo 3	43,8A	18,25%	24,89%	20,95%	28,78%
domingo 4	50,3A	21,27%	28,57%	24,27%	32,41%
domingo 5	69,4A	29,67%	38,14%	33,38%	41,36%
domingo 6	50,3A	21,27%	28,57%	24,27%	32,41%

Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Contudo, através do gráfico é possível analisar os valores da tabela em relação a sua diferença:

Figura 6.9 - O gráfico mostra os valores da diferença de CC calculados da tabela para os domingos e feriados.



Fonte: CAVALHEIRO, 2012.

Ressalta-se que o objetivo desta análise é mostrar as diferenças significativas que podem ocorrer na localização de defeitos caso não seja considerada a corrente de carga (pré-carga) nos cálculos das correntes de curto-circuito. Normalmente, tal grandeza é desprezada para sistemas de transmissão, porém os de distribuição possuem relevância.

No entanto, a metodologia desenvolvida considera os valores de pré-falta nos cálculos de curtos-circuitos, possibilitando fazer a localização mais assertiva do defeito na rede, de acordo com as informações e variáveis usadas para o cenário da pesquisa.

6.5 Análise Geral

Com base na análise dos resultados, percebe-se que o objetivo dos resultados é aumentar a probabilidade da localização de falta em redes de distribuição de energia elétrica. As simulações mostram bons resultados, por isso é possível melhorar os índices de confiabilidade da rede e a satisfação dos consumidores.

Através da análise de sensibilidades, pode-se simular curtos-circuitos, variando as mudanças climáticas e alterando o uso da corrente de pré-falta para os cálculos de curto-circuito, no qual obteve-se a diferença % na localização da falta na rede, quando estas são alteradas ou não.

Foram feitas várias simulações para análise de sensibilidades para evidenciar o seu impacto quando são variadas ou alteradas nos valores dos curtos-circuitos.

Entretanto, a ferramenta computacional mostrou-se bastante eficiente em relação aos resultados obtidos. Destacando que essas simulações servem de base para as concessionárias elétricas, para o caso da mesma não usar uma metodologia para localização de faltas, ou seja, o método abordado nesse trabalho, evita que ocorra essas diferenças de localização da falta, por isso, através das análises de sensibilidades, pode-se prever o que ocorreria na rede sem o uso de um sistema inteligente. Onde para este trabalho, o problema é amenizado visto que é considerada a informação da condição climática e da corrente de carga para os cálculos das correntes de curtos-circuitos no momento da falta.

Por isso, o método de localização de falta mostrou-se bastante eficiente e prático, assumindo grande importância para cumprimento desta pesquisa.

7 CONCLUSÕES

7.1 Sobre a Localização de Falhas

Na dissertação, apresentou-se uma metodologia para Localização de Falhas em Redes de Distribuição desenvolvida a partir do monitoramento remoto dos dispositivos de proteção, na qual foram usadas variáveis de entradas obtidas a partir do SCADA em tempo real e comparadas de acordo com os dados históricos armazenados pelo aplicativo atribuído para esta pesquisa, onde essa comparação resulta em um mapa histórico (SOM) correspondente aos dados de entrada, no qual o mapa irá nos fornecer o trecho da rede com defeito. Ressaltando que o estudo e aplicação do método se dará a partir do momento da ocorrência de uma falta na rede elétrica.

Essa aplicação metodológica proporciona maior redução no tempo de restabelecimento de energia, pois dará o local aproximado com defeito na rede, melhorando os índices de confiabilidade do sistema e aumentando a satisfação das concessionárias e dos próprios consumidores.

Além da aplicação dessa metodologia para localização de faltas, também foi feita análise de sensibilidades, considerando as variáveis climáticas: Tempo úmido e seco, para o curto-circuito monofásico-terra, onde é possível prever a diferença da distância do local da falta quando estas mudanças ocorrem no sistema. Na outra análise considera-se ou não a corrente de carga (corrente pré-falta) para o cálculo dos tipos de curtos-circuitos, onde também é possível prever essa diferença da distância, quando considerada ou não a corrente de carga.

Destacando que os dados obtidos a partir das simulações para as análises de sensibilidades servem de base para o caso da concessionária não possuir um sistema inteligente para localização de faltas. No caso desta pesquisa, viu-se que o método abordado, o qual foi inserido na ferramenta computacional, foi de grande auxílio e precisão para a identificação do defeito na rede de distribuição.

Enfim, a partir dessa metodologia obteve-se resultados bastante satisfatórios, no qual os dados em tempo real fornecidos pela concessionária comprovarão a eficiência desta, aplicada para localização de faltas.

Assim, pode-se concluir que este método é bastante eficiente, capaz de localizar o trecho com defeito na rede elétrica de distribuição.

7.2 Contribuições Originais

Acredita-se serem originais as seguintes contribuições:

➤ O desenvolvimento de uma metodologia inovadora para localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica, a partir do tratamento combinado de simulações computacionais, supervisão e controle de equipamentos telecomandados;

➤ Cumprimento do método a partir dos valores das variáveis de entrada: corrente pré-falta, corrente de curto-circuito e corrente pós-falta, obtidas em tempo real na integração com o SCADA;

➤ A partir das variáveis de entrada consideradas, foram obtidos os Mapas Auto-Organizáveis (SOM) respectivos para agrupar os dados de entrada, o qual pode ser visualizado na metodologia;

➤ Análise de sensibilidades, uma considerando as mudanças climáticas (úmido e seco) e a outra considerando ou não a corrente de carga para os cálculos de curtos-circuitos. Essa análise comprovou em ambos os casos que alterando um dos fatores, como o tipo de clima, ocorre-se uma grande alteração na localização do trecho com falta, ocorrendo o mesmo para o caso de não usar a corrente de carga para o cálculo de curto-circuito;

➤ Tanto as simulações computacionais, como a análise de sensibilidades mostraram-se bastante satisfatórias, comprovando a metodologia neste trabalho abordada como um método eficiente e preciso para Localização de Faltas em redes de distribuição.

7.3 Artigos Publicados

SPERANDIO, M.; CAVALHEIRO, F. C.; SECHI, D. L.; BERNARDON, D. P. ; GARCIA, V. J. **Fault Location in Distribution Networks by Combining Studies of the Network and Remote Monitoring of Protection Devices.** In: 46th International Universities Power Engineering Conference, 2011, Soest. UPEC, 2011.

BERNARDON D. P.; CAVALHEIRO, F. C.; SPERANDIO, M.; PFITSCHER, L. L.; GARCIA, V. J. **Localização de Faltas em Redes de Distribuição a partir de Equipamentos Supervisionados e Análises Computacionais.** In: IX CLAGTEE, 2011, Mar del Plata. THE 9th LATIN- AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2011.

SPERANDIO, M.; SECHI, D. L.; CAVALHEIRO, F. C.; BERNARDON, D. P. **Método de Distinção de Ramais de Distribuição em Curto-Circuito a partir de Medidas de Religadores Monitorados.** In: VII CIERTEC, 2011, Porto Alegre. Seminário Internacional sobre Novas Práticas e Tecnologias para um Futuro Sustentável do Setor de Energia: Qualidade de Energia e Gestão Comercial, 2011.

7.4 Sugestões para Futuros Trabalhos

Pode-se melhorar a metodologia a partir da:

- Análise de novas variáveis para construção dos Mapas Auto Organizáveis (SOM);
- Consideração de mais valores de resistências de contato ao solo em função das condições climáticas;
- Localização de falta considerando redes de distribuição com Geração Distribuída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. R de, et. al. **Experiência da CFLCL, na utilização de sistema de detecção e localização de faltas em redes de distribuição rurais**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 13., 2008, Olinda. **Anais...** Olinda, 2008.

ANDRADE, F. J. de. et. al. Redução no tempo médio de atendimento a ocorrência emergenciais aplicando o sinalizador de faltas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau: UFSC, 2008. Disponível em:
<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBQEE_VIII_2009/web/docs/039.pdf>. Acesso em: 10 set. de 2012.

ARRUDA, R. P. N. de. **Sistemas para detecção de falta de alta impedância e de rompimento de condutores em redes de distribuição de energia elétrica**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em:
<<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/tese/011.pdf>>. Acesso em: 09 ago. de 2012.

BERNARDON, D. P. **Desenvolvimento de algoritmos e sistema computacional para estimação de estados em redes de distribuição**. 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BORGHETTI, A. et. al. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 28, p. 608-617, mar. 2006.

CARDOSO, E. P. **Sistema de localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica baseado em sequencia de eventos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CAVALHEIRO, F. C. **Emprego de mapas auto-organizáveis para localização de faltas em redes de distribuição**. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2012.

CHEN, Y. Y., YOUNG, Y. K. **Applying SOM as a search mechanism for dynamic system**. In: IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, 44., 2005, Seville, Spain. **Proceedings...** Seville, 2005. p. 4111- 4116.

COMASSETTO, L. **Desenvolvimento de algoritmos para otimização da confiabilidade de redes de distribuição**. 2004. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

_____. **Algoritmos heurísticos de otimização da proteção e manobra em redes de distribuição**. 2008. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

COTTRELL, M., FORT, J.C., PAGES, G. Two or three things that we know about the kohonem algorithm. In: THE EUROPEAN SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ESANN), Brussels, Belgium, 1994. **Proceedings...** Brussels, 1994.

DECANINI, J. G. M. S., MINUSSI, C. R. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica FUZZY. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2008, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora, 2008.

DING, M., TELLEZ, R. D., HU, K. **Mapping vulnerability to debris flows based on SOM method**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND AUTOMATION ENGINEERING (ICCAE), 2., 2010, v. 1, p. 393-398, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5451928>>. Acesso em 16 set. 2012.

ELETROBRÁS. **Proteção de sistemas aéreos de distribuição**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1982. 223 p.

FERRAREZI, J. C., HIGA, A. **Utilização de corrente de falta para a localização de defeitos da rede de distribuição**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE OPERADORES DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., 2010, Florianópolis **Anais...** Florianópolis, 2010.

GEORGILAKIS, P. et. al. Managing MV networks for quality of service. **IEEE Computer Applications in Power**, New York, v. 15, n. 3, p. 44-49, Jul. 2002. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=1018822>>. Acesso em: 16 set. de 2012.

GIGUER, S. **Proteção de sistemas de distribuição**. Porto Alegre: Sagra, 1988. 344 p.

GIRGIS, A. A. e FALLON, C. M. Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 7, n. 4, p. 1936–1945, 1992. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=156997>. Acesso em: 21 ago. de 2012.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power system relaying**. Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press LTD, 1995. 319 p.

HUSSAIN, S. A. et. al. A self organizing map based urdu nasakh character recognition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES, Islamabad, 2009. **Proceedings...** Islamabad: ICET 2009. p. 267- 273, oct. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5353161>>. Acesso em: 21 ago. de 2012

JIRAYUSAKUL, A. Improve the SOM classifier with the Fuzzy integral technique. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ICT AND KNOWLEDGE ENGINEERING, 9., 2011, Bangkok. **Anais...** Bangkok: IEEE, 2011. p. 1-4. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6152395>>. Acesso em: 30 ago. de 2012.

KHOSRAVI, A. et. al. A hybrid method for fault detection and modelling using modal intervals and ANFIS. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, New York, USA, 2007. **Proceedings...** New York: Conference Publications, 2007. p. 3003-3008. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4283035>. Acesso em: 05 set. de 2012.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1.ed., v.1, Florianópolis: Labplan, UFSC, 1991.

_____. **Curto-circuito**. 2.ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. 214 p.

KOHONEN, T. **Self-organizing maps**. 3.ed. New York: Springer-Verlag, 2001.

KOHONEN, T.; SIMULLA, O. Engineering applications of the SOM. In: **Proceedings of the IEEE**, v.84, n. 10, 1996. p.1358-1384, oct 1996. Disponível em : <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=537105>>. Acesso em: 05 de set. de 2012.

LEE, S. J. et al. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**,v.19, n.2, p. 524–532, 2004. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1278404&tag=1>. Acesso em: 30 jul. de 2012.

LEHTONEN, M. et. al. **Automatic fault management in distribution networks**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, CIRED, 16., v. 3, 2001. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=942935>. Acesso em: 20 jul. de 2012.

LEHTONEN, M., PETTISSALO, S. e ETULA, J. H. Calculational fault location for electrical distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM MONITORING AND CONTROL, 3., 1991. **IEEE Proceedings...** IEEE, 1991.p. 38–43. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=151748>. Acesso em: 20 jul. de 2012.

LI, C. et. al. A new pattern recognition model based on heuristic SOM network and rough set theory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VEHICULAR ELECTRONICS AND SAFETY, 2006. **IEEE Proceedings...** IEEE, 2006. p. 45-48. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4233987>. Acesso em: 02 de set. de 2012.

LIAO, Y. Algorithms for power system fault location and line parameter estimation. In: SOUTHEASTERN SYMPOSIUM ON SYSTEM THEORY, 39., Macon, GA, 2007. **Proceedings...** Macon: Mercer university, 2007. p. 189-193. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=4160832>>. Acesso em: 20 jun. de 2012.

MIN, L., DONGLIANG, W. Anomaly intrusion detection based on SOM. In: WASE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION ENGINEERING, 2009. **Proceedings...** IEEE Computer Society, 2009. p. 40-43. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5211153>. Acesso em: 30 jul. de 2012.

MIRZAEI, M. et. al. **Review of fault location methods for distribution power system**. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v. 3, n. 3, 2009. p. 2670- 2676.

MOKHLIS, H. and LI, H.Y. **Fault location estimation for distribution system using simulated voltage sags data**. In: 42nd International UPEC 2007. Universities Power Engineering Conference, 2007. p. 242-247, sept. 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4468953>>. Acesso em : 15 de set de 2012.

MORA, F. J., et. al. **K-means algorithm and mixture distributions for locating faults in power systems**. Electro Power System. Res. n. 79, 2009. p. 714-721.

MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia:** uma metodologia baseada em redes neurais artificiais. 2005. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

OLIVEIRA, A. V. da C., et.al. **Simulação de faltas em relés de proteção utilizando o ATP.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2008, Olinda, Pernambuco. **Anais...** Olinda, 2008.

OLIVEIRA, K. R. C., SALIM, R. H., SHUNCK, A. JR., BRETAS, A. S. **Identificação da seção faltosa em sistema de distribuição desequilibrados utilizando o princípio das ondas viajantes.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2008, Juiz de Fora, MG. **Anais...** Juiz de Fora, 2008.

PAMPALK, E., RAUBER, A., MERKL, D. **Using smoothed data histograms for cluster visualization in self-organizing maps.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, 2002, Madrid, Spain. **Proceedings...** Madrid: Springer Lecture Notes in Computer Science, 2002.

PEREIRA, D. R., et.al. **Um sistema de software para execução de estudos de coordenação e seletividade da proteção de sistemas elétricos de distribuição.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2008, Olinda, Pernambuco. **Anais...** Olinda, 2008.

PEREIRA, J. L. R., et.al. **Desenvolvimento de metodologia e programa para cálculo de faltas e para estudo de sistemas reticulados.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 13., 2008, Olinda, Pernambuco. **Anais...** Olinda, 2008.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying power system relaying.** Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press LTD, 1988. 289 p.

PINHEIRO, J. R. G., ULSON, J. A. C., CAMPOS, F. de. S. **Sistema de mediação para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica baseado em redes de sensores sem fio padrão IEEE 802.15.4.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATION, 9., 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEEE, 2010.

RIANI, L. M., et. al. **Análise de defeitos em coordenadas de fase utilizando modelagem a quatro fios e fluxo de potência continuado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2008, Juiz de Fora, MG. **Anais...** 2008.

ROBERTS, J.; SCHWEITZER, E. O. **Analysis of event reports**. In: ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 16., Spokane, Washington. **Proceedings...** Spokane: s.n,1989.

SALIM, R. H. **Detecção de faltas em sistemas de distribuição utilizando a transformada wavelet**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS. Porto Alegre, 2006.

SALIM, R. H. et. al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 4, out. 2008. p. 1846-1851. Disponível em:
< <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4558162>> . Acesso em: 10 de set. de 2012.

SANTOS, V. M. dos. **Estudo de caso de curto-circuito em um sistema elétrico industrial**. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, 2009. 131p.

SCHWEITZER, E. O.; SCHEER, G. W.; FELTIS, M. W. **A fresh look at distribution protection**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DISTRIBUTION AUTOMATION AND DEMAND SIDE MANAGEMENT, 2.,1992, Fort Lauderdale, Florida. **Proceedings...**Washington: Schweitzer Engineering Laboratories, 1992.

SENGER, E. C., MANASSERO, G. Jr., GOLDEMBERG, C. , PELLINI, E. L. Automated fault location system for primary distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1332-1340, abr. 2005. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1413397>>. Acesso em: 10 de set. de 2012.

SPERANDIO, M. **Classificação de conjuntos consumidores de energia elétrica via mapas auto-organizáveis e estatística multivariada**. 2004. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SPERANDIO, M.; CAVALHEIRO, F. C.; SECHI, D. L.; BERNARDON, D. P. ; GARCIA, V. J. Fault location in distribution networks by combining studies of the network and remote monitoring of protection devices. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 46., 2011, Soest. **Proceedings...** Soest: UPEC, 2011.

TANG, Y. et. al. **Fault indicators in transmission and distribution systems**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2000. **Proceedings...** 2000.

THOMAS, D., CARVALHO, R. and PEREIRA, E. **Fault location in distribution systems based on traveling wave.** In: Proceedings of Power Technology Conference, 2., 2003. p. 468-472.

ULTSCH, A. **Self organizing neural networks perform different from statistical k-means clustering.** In: M. van der Meer, R. Schmidt, G. Wolf, (Eds.): BMBF Statusseminar Künstliche Intelligenz, Neuroinformatik und Intelligente Systeme, München, Deutschland, 1996. p. 433-443

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA. **Relatório final de pesquisa e desenvolvimento: desenvolvimento de algoritmo e software para localização de faltas nas redes de distribuição da UHENPAL.** Projeto UHENPAL- UNIPAMPA, 2011. 81p.

VESANTO, J., HIMBERG, J., ALHONIEMI, E., PARHANKANGAS, J. **Self-organizing map in Matlab: the SOM Toolbox.** Proc. of the Matlab DSP Conference, Espoo, Finland, 1999. p. 35-40.

ZHU, J., LUBKEMAN, D. L., GIRGIS. A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 2, abr. 1997. p. 801-809. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=584379>>. Acesso em: 10 de set. de 2012.