

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Detecção e Classificação de Falhas de Alta Impedância em
Sistemas Elétricos de Potência Usando Lógica *Fuzzy*”**

ANA CLAUDIA BARROS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação

Ilha Solteira – SP
maio/2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

B277d Barros, Ana Claudia.
Detecção e classificação de faltas de alta impedância em sistemas elétricos de potência usando lógica *Fuzzy* / Ana Claudia Barros. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.
89 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2009

Orientador: Carlos Roberto Minussi
Bibliografia: p. 78-81

1. Detecção de faltas. 2. Classificação de faltas. 3. Alta impedância.
4. Lógica difusa.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

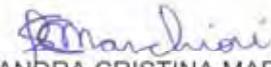
TÍTULO: Detecção e classificação de faltas de alta impedância em sistemas elétricos de potência usando lógica Fuzzy

AUTORA: ANA CLAUDIA BARROS
ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. SANDRA CRISTINA MARCHIORI DE BRITO
Departamento de Matemática e Estatística / Universidade Federal do Mato Grosso do Sul -
Campus de Chapadão do Sul

Data da realização: 18 de maio de 2009.

Dedicatória

*Aos meus pais, Tereza e Benedito,
pelo apoio durante todo o processo deste
trabalho.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por sempre me servir de conforto nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Tereza e Benedito, à minha irmã, Angela Cristina, à minha sobrinha, Gabrieli, e ao meu cunhado, José Carlos, agradeço por sempre estarem ao meu lado.

Agradecimentos ao meu namorado, João Roberto, pelo carinho, compreensão e ajuda em diversos momentos deste trabalho.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi, e ao meu co-orientador, Prof. Dr. Francisco Villareal Alvarado, pela dedicação ao longo do trabalho.

Aos meus amigos, Patrícia, Mara Lucia, Meire, Jadiel, Alessandra, Elisabete, Denise, Fernando, pelo apoio e ajuda em momentos difíceis.

Agradeço ao CNPq pela ajuda financeira proporcionada durante boa parte do período de estudos, pesquisa, implementação e elaboração desta dissertação.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia, para detecção e classificação de faltas de curto-circuito, direcionada para os eventos de alta impedância em subestações de energia elétrica. A detecção é executada por um cálculo algébrico simples via observação da diferença absoluta entre o valor eficaz médio estimado e o valor eficaz medido a partir da oscilografia das correntes trifásicas. Caso seja detectada a anomalia de corrente, procede-se a sua classificação baseada na lógica *fuzzy*. Trata-se de um problema que apresenta maiores dificuldades de identificação e classificação, tendo em vista que tais perturbações são sutis, o que se diferenciam em relação aos eventos caracterizados como de baixa e ou de média impedância. Os distúrbios de alta impedância, muitas vezes, não são detectados pelo sistema proteção. Neste caso, o sistema de proteção considera-os como uma operação em regime permanente, não distinguindo entre uma falta de alta impedância e um aumento/diminuição da corrente elétrica em decorrência das variações da demanda solicitada pelos consumidores. Ressalta-se que a metodologia, aqui proposta, segue os princípios formulados na referência Decanini (2008), com as devidas adaptações ao problema associado às faltas de alta impedância. A metodologia, proposta neste trabalho, usa dados oscilográficos que são processados de modo que a detecção e classificação das faltas possam ser estimadas através de um conjunto de características extraídas dos sinais de correntes. Este conjunto de característica é classificado pela lógica nebulosa e sua saída resulta na indicação do tipo da falta. Deve-se ressaltar que este algoritmo além de ser eficiente na detecção e classificação de faltas de alta impedância, sua eficiência destaca-se também na localização e detecção de faltas de baixa impedância. Os dados necessários para os diagnósticos de faltas foram obtidos através de simulações de um modelo de alimentador radial no *software* ATP. Os resultados foram satisfatórios e demonstram viabilidade da metodologia proposta, em destaque, pela rapidez do algoritmo na obtenção das soluções que, a princípio, habilita o sistema para detecção classificação de faltas no contexto da operação em tempo real. Como subproduto desta pesquisa, pode-se adaptá-la para funcionar, também, como um filtro “passa normalidade”, armazenando, na base de dados históricos, somente as oscilografias representativas de distúrbios, evitando operações e armazenamento de informações desnecessariamente.

Palavras-Chave – Sistemas Elétricos de Potência, Detecção de Faltas, Classificação de faltas, Alta Impedância, Lógica *Fuzzy*.

Abstract

This work presents a methodology to detect and classify short circuit faults principally for high impedance occurrences in electrical power systems. The detection is executed by a simple algebraic calculus observing the absolute difference with the efficient medium estimated value and the efficient value measured from the oscillogram of the three-phase currents. When a current anomaly is detected the classification is based on the fuzzy logic. It is a problem that presents some difficulties in identification and classification, considering that these perturbations are little which are different from the events characterized as low or medium impedance. The high impedance perturbations sometimes are not detected by the protection system. In this case, the protection system considers as one operation in steady state, and do not distinguish with a high impedance fault or an increasing/ decreasing of the electrical current due to the demand variation requested by the users. It is emphasized that the proposed methodology follows the fundamentals according the reference Decanini (2008), with the adaptations to the associated problem to the high impedance faults. The proposed methodology use oscillogram data that are processed in a way that the detection and classification of the faults are estimated by a set of characteristics from the current signals. This set is classified by logic fuzzy and the output results on the type of the fault. It is emphasized that this algorithm besides being efficient is detecting and classifying high impedance faults, is also efficient in localizing and detecting low impedance faults. The necessary data for the diagnosis of the faults were obtained by simulation of a radial feeder model with the ATP software. Results are satisfactory and show the viability of the proposed methodology that is faster for obtaining the solutions and is able to detect and classify faults in real time. As a sub product of this research, it can be adapt to work as a normal-pass filter, filing on the historical data only the oscillogram that represent disturbs avoiding operations and files of not necessary information.

Keywords – Electrical Power Systems, Detection and Classification faults, High Impedance, Fuzzy Logic.

Lista de Figuras

3.2.1	Subestação e seus componentes	27
4.2.5.1	Diagrama de blocos de um relé digital	37
5.3.1	Função de Pertinência Triangular	41
5.4.1	Sistema Nebuloso	42
6.3.1	Diagrama de blocos simplificados da metodologia proposta	46
6.3.1.1	Forma de onda discretizada, considerando-se uma taxa de amostragem m	47
6.4.1	Correntes trifásicas para o sistema em operação normal	54
6.4.2	Correntes associadas a um curto-circuito trifásico	55
6.4.3	Correntes trifásicas para curto-circuito <i>fase a – terra</i> de baixa impedância	56
6.4.4	Correntes trifásicas para curto-circuito <i>fase a – terra</i> de alta impedância	57
6.5.1	Conjunto nebuloso destacados	58
6.5.2	Representação de um conjunto <i>fuzzy</i> triangular R definido pelos parâmetros $(R_{\text{mim}}, R_{\text{médio}}, R_{\text{máx}})$	59
6.6.1	Sistema <i>fuzzy</i> de análise (detecção / classificação de faltas) proposto.	61
6.7.1	Registro do trecho de interesse do oscilograma (referente a falta) na base de dados	64
7.3.1	Diagrama unifilar do alimentador radial	66
7.5.1	Conjunto nebuloso para o “MCCDNI”	69

Lista de Tabelas

3.2.1	Comparação entre os diferentes tipos de arranjos	29
7.3.1	Dados do alimentador radial	67
7.5.1	Ilustração do comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 no MCCDNI	70
8.2.1	Percentual de acerto do “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” para faltas de alta impedância	74
8.2.2	Capacidade de identificação do sistema em operação normal pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”.	75
8.2.3	Percentual de acerto do “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” para faltas de baixa impedância	76
A.1	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 60% do carregamento – Barra A.	84
A.2	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 60% do carregamento – Fim do alimentador.	85
A.3	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 60% do carregamento – Meio do alimentador	86
A.4	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 80% do carregamento – Fim do alimentador.	87
A.5	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 80% do carregamento – Início do alimentador.	88
A.6	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 80% do carregamento – Meio do alimentador.	89
A.7	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Barra 4.	90

- A.8 Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Barra 11. 91
- A.9 Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Fim do alimentador. 92
- A.10 Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Início do alimentador. 93
- A.11 Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Meio do alimentador. 94

Lista de Símbolos

$\mu A(x)$	=	Valor da função de pertinência do conjunto nebuloso A correspondente ao elemento x
U	=	Universo de discurso
x	=	Variável de entrada
y	=	Variável de saída
A e B	=	Termos lingüísticos associados aos conjuntos nebulosos
I_a, I_b e I_c	=	Corrente elétrica das fases a, b e c , respectivamente
σ	=	Parâmetro similar à corrente de seqüência zero
$\sigma_{m\acute{a}x}$	=	Valor estabelecido a partir de simulações e medidas considerando-se faltas de curto-circuito
w	=	Velocidade da onda
k	=	Tempo discreto
m	=	Número de amostragem por ciclo
L	=	Número de amostras para cálculo de anormalidade
$X_{méd}$	=	Média aritmética dos L valores (eficazes da forma de onda)
$X_{referênci\grave{a}l}$	=	Valor eficaz de referência
Γ^a, Γ^b e Γ^c	=	Índices calculados para as fases a, b e c
ρ	=	Índice de anormalidade da forma de onda
$\Delta Im\acute{a}x$	=	Parâmetro a ser especificado em função da experiência
d_1, \dots, d_5	=	Índices que definem as características do estado do sistema
R, S e T	=	Conjuntos Nebulosos

R_f	=	Resistência de falta
θ_f	=	Ângulo de inserção de falta
S_o	=	Carregamento do sistema
g	=	Indica conexão a terra
Z_f	=	Impedância de falta definida por categoria de valores (baixa ou alta)

Lista de Abreviaturas

IED	=	Intelligent Eletronic Design
RTU	=	Remote Terminal
SCADA	=	Supervisory Control And Data
ATP/EMTP	=	Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program
SÉS	=	Subestações
DEC	=	Duração Equivalente de Interrupção Por Consumidor
FEC	=	Frequência Equivalente de Interrupção Por Consumidor
DIC	=	Duração de Interrupção Individual
FIC	=	Frequência de Interrupção Individual
DMIC	=	Duração Máxima de Interrupção Contínua
CPU	=	Unidade Central de Processamento
MCCDNI	=	Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância
NG	=	Negativo Grande
NP	=	Negativo Pequeno
ZE	=	Negativo Zero
PP	=	Positivo Pequeno
PG	=	Positivo Grande

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivo	18
1.3	Proposta	19
1.4	Justificativa	20
1.5	Organização do trabalho	20
2	Estado da arte	22
2.1	Introdução	22
2.2	Análise das Principais Referências Bibliográficas	22
2.3	Conclusão	24
3	Subestações de Distribuição de Energia Elétrica	26
3.1	Introdução	26
3.2	Subestações	26
3.3	Automação de Subestação	30
3.4	Conclusão	31
4	Proteção de Sistemas Elétricos	32
4.1	Introdução	33

4.2	Dispositivos de Controle e Proteção	33
4.2.1	Elos Fusíveis	33
4.2.2	Religadores Automáticos	34
4.2.3	Seccionalizadores Automáticos	35
4.2.4	Disjuntores Associados com Relés	35
4.2.5	Relés Digitais	36
4.3	Conclusão	38
5	Lógica <i>Fuzzy</i>	39
5.1	Introdução	39
5.2	Conjuntos <i>Fuzzy</i>	39
5.3	Função de Pertinência	40
5.4	Sistema <i>Fuzzy</i>	41
5.5	Conclusão	43
6	Metodologia Proposta	44
6.1	Introdução	44
6.2	Visão geral	44
6.3	Extração da Característica do Estado do Sistema	45
6.3.1	Detecção	47
6.3.2	Classificação	50
6.4	Análise Comportamental dos Índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5	53
6.5	Classificação do Estado do Sistema	57

6.6	Detecção e Classificação de Faltas de Alta Impedância	60
6.7	Filtro Passa – Normalidade	62
6.8	Conclusão	64
7	Implementação da Metodologia Proposta	65
7.1	Introdução	65
7.2	Programas Computacionais Empregados	66
7.3	Sistema de Distribuição Utilizado	66
7.4	Simulações no <i>Software</i> ATP	68
7.5	Concepção do Módulo Classificador	68
7.6	Conclusão	72
8	Resultados e conclusões da Metodologia proposta	73
8.1	Introdução	73
8.2	Modulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância	73
8.3	Conclusão	77
9	Conclusão e Sugestão	78
9.1	Conclusão	78
9.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	79
	Referencias	80
	Apêndice A	84

Capítulo 1

Introdução

Esta pesquisa de mestrado é dedicada ao desenvolvimento de uma metodologia para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas elétricos de potência, em especial às aplicações em ambiente de subestações de distribuição de energia elétrica. A maior ênfase será dada às faltas de alta impedância.

Nos dias atuais, cresce, cada vez mais, a exigência pelo aumento da confiabilidade e segurança dos sistemas de energia elétrica, principalmente, nas subestações agregadas aos sistemas de distribuição. Em face desta situação, surge a necessidade de automatizar as operações relacionadas a este tão importante setor.

Para que essas exigências sejam atendidas, é necessário o desenvolvimento de um sistema integrado, unindo a tecnologia digital e a tecnologia da informação. Este sistema deverá ser provido de ferramentas eletrônicas que proporcionarão uma completa coleta de dados. Tais valores, após serem, pertinentemente, processados e analisados, serão de grande auxílio na execução de ações em subestações de distribuição de energia elétrica, especialmente, nos momentos quando ocorrerem problemas.

1.1. Motivação

O diagnóstico de falhas, nos sistemas de energia elétrica, é, fortemente, vinculado à experiência de operadores humanos. Através dos sinais, também conhecidos como bandeiras,

presentes em painéis de controle e telas de computadores, decisões devem ser tomadas o mais rápido e eficiente possíveis, sempre buscando a eliminação da falta.

Deve-se ressaltar, porém, que tais ações são, praticamente, impossíveis de serem baseadas, totalmente, apenas na experiência e percepção dos operadores: torna-se necessária a automatização do processo de análise dados, propiciando uma melhor apresentação do *status* do sistema de energia elétrica.

Neste sentido, buscam-se, através de metodologias baseadas em inteligência artificial, *e.g.*, sistemas especialistas (PINHEIRO, 1995), redes neurais artificiais (CARPENTER, 1992), lógica *fuzzy* (ZADEH, 1965), etc., técnicas para combinar a experiência do operador e a habilidade de executar rotinas com a máxima rapidez e segurança. Desta forma, esta técnica poderá produzir um eficiente diagnóstico de detecção, classificação e localização de anormalidades nos ambientes de subestação automatizadas.

1.2. Objetivo

Esta dissertação tem por objetivo apresentar uma metodologia para detecção e classificação de faltas com um enfoque especial dedicado à resolução do problema referente aos distúrbios de alta impedância, usando-se os conceitos da lógica *fuzzy* (ZADEH, 1965). Trata-se de situações mais complexas, se comparadas ao caso em que tais faltas são caracterizadas como de baixa e média impedância. O problema associado à baixa, média e alta impedância tem sido abordado na dissertação de mestrado (DECANINI, 2008, MINUSSI, 2007). Contudo, o algoritmo proposto apresentou dificuldades de classificar falta de alta impedância, principalmente por ser um problema cujas variações de correntes são mais suaves, muitas vezes sendo confundidas com variações procedentes em decorrência do aumento ou diminuição da carga em atenção ao atendimento dos consumidores. Através deste recurso, o esquema proposto destina-se a automação deste processo de segurança, viabilizando maiores rapidez e eficiência no que se refere à detecção e classificação desta modalidade de defeito (de alta impedância).

1.3. Proposta

O algoritmo proposto é baseado nos conceitos de lógica *fuzzy*. Através deste algoritmo será desenvolvida uma metodologia para detecção e classificação de defeitos em ambientes de subestações. Este processo é executado com base nos valores de correntes coletados na saída do alimentador da subestação. Desta forma, para cada tipo e nível de impedância de curto-circuito haverá uma característica (assinatura) associada, a qual será diagnosticada, através dos conceitos da lógica *fuzzy* (DECANINI, 2008).

Para que a proposta sugerida, neste trabalho, seja implementada nas subestações, a mesma deverá ser dotada de tecnologia em *hardware*, envolvendo instalações de IED's (*Intelligent Electronic Designs*). Novas gerações de IED's estão sendo disponibilizadas pela indústria, incorporando novas habilidades que podem eliminar parcial ou integralmente a necessidade das RTU's (*Remote Terminal Units*) no controle supervisão e nos sistemas de aquisição de dados (SCADA) (KEZUNOVIC; ABUR, 2005).

Na proposta apresentada neste trabalho, buscar-se-á a concepção de algoritmos que podem ser modificados facilmente, para atender a permanente evolução das tecnologias das subestações. Para melhorar o desempenho do sistema basta aumentar os módulos por outros mais eficientes.

1.4. Justificativa

A crescente utilização de sofisticados sistemas de informação para supervisão e controle dos sistemas elétricos tem contribuído para o aumento da segurança e da confiabilidade dos sistemas de energia elétrica. No entanto, análise e diagnósticos de faltas têm sido tarefas difíceis e estressantes, tendo em vista que, a análise e o diagnóstico de faltas dependem basicamente da experiência do operador. O profissional deve analisar e identificar as possíveis causas da falta, além de tomar a decisão de restabelecer o sistema elétrico com segurança e tempo hábil, pois o

tempo ocorrido entre a ocorrência da falta e o restabelecimento do sistema implica em sérios danos a empresas, *i.e.*, prejuízo e degradação da imagem da distribuidora, etc.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em subestações de energia elétrica, baseados nos conceitos de lógica *fuzzy*. Através deste recurso, este projeto tem por finalidade a automação deste processo de segurança, viabilizando maiores rapidez e eficiência no que se refere à detecção e classificação de faltas de curto-circuito.

O uso de um sistema automatizado dará maior confiança, pois evitará, ou mesmo, contornará possíveis falhas que poderiam ser reflexos de ações puramente humanas. Deve-se ter em mente que uma eficaz detecção/classificação de falhas é de grande importância em qualquer sistema, ainda mais em uma subestação, onde certos problemas podem gerar situações catastróficas.

1.5. Organização do Trabalho

Este texto está assim organizado:

- Capítulo 2.* são analisadas as principais referências disponíveis na literatura especializada que abordam o problema associado à detecção e classificação de faltas em sistemas elétricos de potência;
- Capítulo 3.* abordam-se os principais conceitos sobre subestações, as principais configurações, suas características e a importância de uma subestação automatizada;
- Capítulo 4.* apresenta-se uma revisão dos dispositivos de proteção;
- Capítulo 5.* é elaborado um estudo sobre lógica *fuzzy* ajustado ao problema abordado neste trabalho;
- Capítulo 6.* a metodologia proposta para detecção e classificação de faltas de curto-circuito de alta impedância é apresentada;

Capítulo 7. apresenta-se a implementação do procedimento proposto considerando um alimentador radial;

Capítulo 8. apresenta-se a análise crítica dos resultados;

Capítulo 9. finalmente, são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1. Introdução

Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte em relação ao problema associado à detecção e à classificação de faltas de alta impedância de sistemas elétricos de potência. Neste contexto, são abordadas as publicações sobre métodos de análise baseados em várias técnicas usais na literatura especializadas. Tratam-se das técnicas clássicas, bem como daquelas inseridas no contexto da inteligência artificial, *e.g.*, redes neurais, lógica *fuzzy*, etc.

2.2. Análise das Principais Referências Bibliográficas

Considerando-se que, neste trabalho, será abordado o problema da detecção e da classificação de faltas de alta impedância. A análise restringir-se-á às principais referências que fazem uso de conceitos e métodos associados a esta modalidade de estudo.

A presente pesquisa iniciou-se com um estudo sobre subestações de energia elétrica, abrangendo a estrutura, disposição, novas técnicas de integração, equipamentos empregados e automação de subestação. Este assunto é abordado em:

- ✓ McDonald, J. D. “Electric power substations engineering”, CRC Press, 2003.

Nas referências mencionadas abaixo são abordadas diferentes metodologias para diagnósticos de faltas. Estas obras abordam, de forma sucinta, ferramentas de apoio à análise de sinais, por exemplo, Transformada de Fourier de Tempo Limitado, Transformada Wavelet (LITTLER, 1999), etc., e a classificação de faltas, por exemplo, sistemas inteligentes (lógica *fuzzy* (ZADEH, 1992), redes neurais artificiais (CARPENTER, 1992), sistemas especialistas (PINHEIRO, 1995), algoritmos genéticos (MITCHELL, 1996), etc.), freqüentemente utilizados na análise de distúrbio em sistemas de energia elétrica, além de expor a importância de utilizá-las.

- ✓ Decanini, S. M. G. J. e Minussi, R. C. “Detecção e Classificação de Faltas de Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Lógica Nebulosa” Departamento de Engenharia Elétrica, FEIS, UNESP, 2008. Esta pesquisa foi desenvolvida visando contemplar todo o espectro de variações da impedância (baixa, média e alta impedâncias). Porém, constataram-se dificuldades para analisar falta de alta impedância.
- ✓ Kezunovic, M. “Intelligent Applications in Substations: Disturbance Analysis”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, pp. 719-723, June 2004.
- ✓ Littler, T. B. and Morrow, D. J. “Wavelets for the Analysis and Compression of Power System Disturbances”, Vol. 14, Issue 2, pp. 358-364, April 1999.

Em seguida, a tônica do trabalho foi desenvolver metodologias que fizessem com que o estado do sistema (KEZUNOVIC, 2004, MAHANTY, 2007) apresentasse características (assinaturas) importantes a um funcionamento satisfatório. Tais características foram mais centradas em formas robustas (baixa sensibilidade ao dinamismo dos sistemas de energia elétrica) e eficiente diagnóstico de defeitos. Estes métodos foram encontrados na seguinte bibliografia:

- ✓ Mahanty, R. N. and Dutta Gupta, P.B. “A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only”, Electric Power Systems Research, Vol. 77, Issues 6-7, pp. 501 – 507, April 2007.

Para simular os dados de curto-circuito utilizou-se o *software* de domínio público ATP/EMTP (*Alternative Transients Program*) (MEYER, 2000), (USER'S MANUAL, 2002), este *software* é muito usado na análise de transitórios em sistema de energia elétrica. As referências a seguir apresentam as devidas instruções para a manipulação do referido *software*:

- ✓ *Alternative Transients Program (ATP) RuleBook.*
- ✓ *Users' Manual, ATPDRAW, versão 3.5, 2002.*

Para avaliar os dados pré-processados, utilizar-se-ão de sistemas inteligentes. Para a realização deste trabalho estudou-se lógica *fuzzy* (ZADEH, 1992):

- ✓ Zadeh, L. A. "Fuzzy sets", *Information and Control*, Vol. 8, No. 3, pp.338-353, 1965.

2.3. Conclusão

Neste capítulo, apresentou-se, de forma sucinta, a análise dos principais livros e artigos usados para a realização deste trabalho. Também, foram analisadas as principais referências disponibilizadas na literatura com vistas a situar a proposta da metodologia desenvolvida nesta dissertação de mestrado. Ressalta-se que na grande parte destas metodologias, o processo de análise é fundamentado no uso de sofisticados métodos e que demandam razoável tempo de processamento. Ou seja, a análise das formas de onda é tratada como um procedimento convencional de processamento de sinais (análise de Fourier, *wavelets*, etc.) combinando com a análise de circuitos elétricos (NILSSON; RIEDEL, 2008), teoria da propagação de ondas, entre outros recursos. Assim, neste trabalho, será apresentada uma metodologia robusta e rápida para a detecção e a classificação de faltas de curto-circuito. Esta metodologia é uma extensão dos trabalhos desenvolvidos por Minussi (2007), Decanini e Minussi (2008) e por Decanini (2008). Neste trabalho, será dado maior destaque às faltas de alta impedância que, em regra, constituem-se num problema mais complexo e de difícil diagnóstico em sistemas elétricos de potência. Trata-se, portanto, de um procedimento bastante simples, robusto e de baixíssimo custo computacional,

o qual emprega conceitos e recursos simples da teoria de conjuntos *fuzzy*. A metodologia proposta será discorrida no Capítulo 6.

Capítulo 3

Subestações de Distribuição de Energia Elétrica

3.1. Introdução

Uma subestação de energia elétrica é um conjunto de equipamentos usados para controlar, modificar, comandar, distribuir e direcionar o fluxo de energia elétrica em um sistema elétrico.

As transformações a que o setor elétrico está sendo submetido exigem que os sistemas elétricos estejam aptos a atuar em ambientes cada vez mais dinâmicos e em permanente evolução, para que possam oferecer energia com maior confiabilidade e qualidade. Sendo assim, as subestações agregadas aos sistemas elétricos vêm automatizando suas operações.

3.2. Subestações

Uma subestação de energia elétrica pode estar associada a uma usina geradora de energia elétrica, ou ainda, controlar, diretamente, o fluxo de potência na rede. Pode, também, estar ligada aos transformadores de potência, que convertem a tensão de fornecimento para um nível superior, podendo, ainda, ser utilizada para chavear diferentes rotas de fornecimento de energia, de mesmo nível de tensão (SILVA, 2002).

Existem, praticamente, quatro tipos de subestação de energia elétrica:

- Subestação de Geração;
- Subestação de Transmissão;
- Subestação de Distribuição;
- Subestação de Utilização.

O enfoque desta pesquisa está relacionado às subestações de distribuição de energia elétrica.

Uma subestação é composta por vários equipamentos:

- **Transformadores** – responsáveis pela alteração do nível de tensão;
- **Transformadores de correntes** – responsáveis pela medição da corrente elétrica, dentro de uma subestação;
- **Transformadores de potência** – medem a tensão;
- **Disjuntores e Religadores** – sua principal função é a proteção contra correntes de curto-circuito (abrem, automaticamente, nesses casos).

Na Figura 3.2.1 ilustra-se uma subestação e seus componentes (PINHEIRO, 1995).

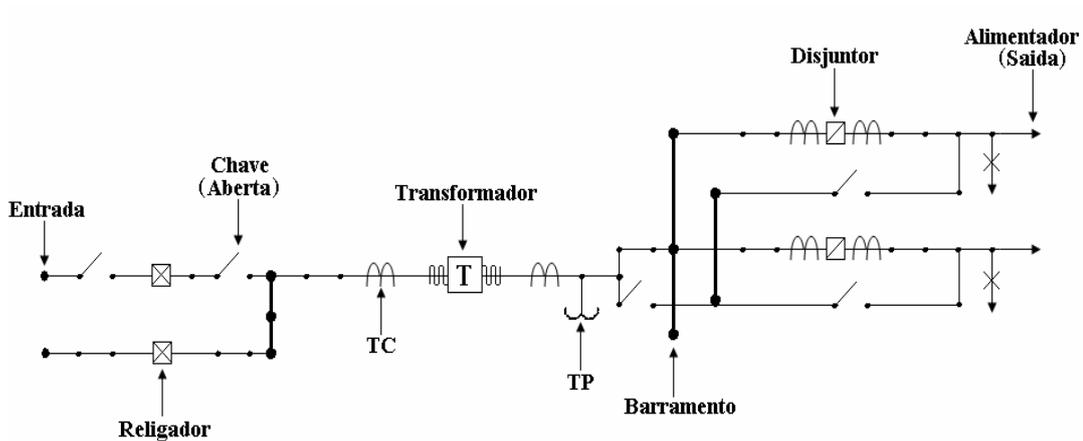


Figura 3.2.1. Subestação e seus componentes.

As subestações também são compostas por uma quantidade variada de chaves, linhas e barramentos.

O modo como os equipamentos, linhas e barramentos são interligados para prover a funcionalidade necessária a uma subestação de energia elétrica é chamado Arranjo de Barramento (SILVA, 2002).

O Arranjo de Barramentos e os equipamentos constituintes das subestações são determinados em função de (SILVA; CARVALHO, 2002):

- Flexibilidade requerida em termos de facilidade de manobras;
- Continuidade e confiabilidade operacionais;
- Manutenções;
- Custo de implantação.

Os Arranjos de Barramentos mais utilizados em subestações são:

- Barramento Simples;
- Barramento Principal e de Transferência;
- Barramento Duplo com Disjuntor Simples;
- Barramento Duplo com Disjuntor Duplo;
- Barramento Duplo com Disjuntor e Meio;
- Barramento em Anel.

Na Tabela 3.2.1 mostra-se a comparação entre os diferentes arranjos das subestações [www.pme llovix.xpg.com.br, 19/11/2008].

Tabela 3.2.1. Comparação entre os diferentes tipos de arranjos.

Arranjo	Confiabilidade	Custo	Área Disponível
Barramento simples	Menor confiabilidade Falhas simples podem ocasionar o desligamento completo da SE.	Menor custo Menor número de componentes	Menor área Menor número de componentes
Barramento principal e de transferência	Baixa confiabilidade Semelhante aos barramentos simples, porém, uma melhor flexibilidade na operação e manutenção.	Custo moderado Poucos componentes	Pequena área Poucos Componentes
Barramento Duplo Disjuntor Simples	Confiabilidade Moderada	Custo Moderado Número de componentes um pouco maior	Área Moderada Número de componentes um pouco maior
Barramento Duplo Disjuntor Duplo	Alta confiabilidade Falhas simples isolam apenas um circuito	Custo Elevado Número de componentes duplicado	Grande Área Dobro do número de componentes
Barramento Duplo Disjuntor e Meio	Alta confiabilidade Falhas simples isolam apenas um circuito	Custo Moderado Número de componentes um pouco maior	Grande Área Maior número de componentes por circuito
Barramentos em Anel	Alta confiabilidade Disjuntores alternativos devem ser dimensionados para os casos de manutenção dos principais disjuntores	Custo Moderado Número de componentes um pouco maior	Área Moderado Aumenta com o número de circuitos

3.3. Automação de Subestação

A subestação automatizada é dotada de equipamentos para proteção, controle, monitoração, medição e comunicação (equipamento secundário que pode ser conectado, utilizando uma porta serial de comunicações de forma consecutiva para, desta maneira, trabalhar conjuntamente) (ACKERMAN, 1999).

As subestações de energia elétrica vêm enfrentando um grande desafio para manter o fornecimento e a qualidade da energia entregue, da melhor maneira possível.

A qualidade de fornecimento de energia é de suma importância, sendo caracterizada pela manutenção de tal fornecimento de uma forma constante, além de apresentar alto grau de confiabilidade. Este aspecto torna necessária a existência de um sistema de controle, monitoração e proteção capaz de atuar de forma rápida e eficiente. Além disso, este sistema permitirá o imediato restabelecimento do fornecimento de energia no menor período de tempo.

Entretanto, a idéia de qualidade de energia refere-se, a partir de uma visão mais global, testes, análises, avaliações e procura de prováveis soluções aos problemas dos usuários, sendo eles residenciais, comerciais e industriais. Desta forma, as empresas distribuidoras de energia elétrica apresentam a necessidade de automatizar suas operações.

Vários são os motivos que levam à necessidade de automatizar os sistemas elétricos, dentre eles, podemos mencionar (SILVA, 2002).

- Melhoria da qualidade no fornecimento de energia elétrica, com redução da quantidade e do tempo de interrupções, por meio da supervisão direta e em tempo real do sistema elétrico;
- Melhoria da qualidade de informação para a operação local;
- Redução da incidência de ocorrências no sistema elétrico em razão de erros humanos de operação;
- Implementação de novas funções para controles sistêmicos e de comandos de equipamentos;

- Operação remota de SE's com base no centro de operação do sistema, padronizando os relatórios;
- Redução do custo operacional, com a automação de tarefas e centralização de ações operativas;
- Redução dos investimentos com a modelagem da curva de carga que possibilita aproveitar melhor a capacidade dos equipamentos;
- Melhoria dos níveis de tensão, de segurança operacional e dos índices de “Duração equivalente de interrupção por consumidor” (DEC) e “Frequência equivalente de interrupção por consumidor” (FEC);
- Otimização do quadro de operadores.

3.4. Conclusão

Neste capítulo, foram abordados, de forma sucinta e clara, os principais conceitos sobre subestações, as principais configurações, assim como suas características e a importância de uma subestação automatizada.

Capítulo 4

Proteção de Sistemas Elétricos

4.1. Introdução

As subestações de distribuição de energia elétrica e o sistema de distribuição, em si, são os responsáveis pelo fornecimento de energia ao consumidor final. Esta energia deve ser entregue ao consumidor respeitando parâmetros de qualidade, *e.g.*, frequência e tensão constantes, DIC (Duração de Interrupção Individual), FIC (Frequência de Interrupção Individual), DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua) (DECANINI, 2008). No entanto, os sistemas de energia elétrica estão sujeitos a várias perturbações, causadas por vários fatores: acréscimos de cargas, faltas ocasionadas por fatores naturais, falhas de equipamentos, etc. Desta forma, aparece a necessidade de inserir, nos sistemas de energia elétrica, um sistema de proteção eficiente.

O sistema de proteção tem, como funções, reduzir os danos no sistema elétrico e fornecer energia para os consumidores de forma confiável, segura e com qualidade.

De modo a manter a qualidade do fornecimento de energia elétrica ao consumidor, os sistemas de proteção devem atender aos seguintes requisitos (GIGUER, 1988):

1. Seletividade: somente deve ser isolada a parte defeituosa do sistema, mantendo, em funcionamento, as demais partes;
2. 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;
3. Sensibilidade: a proteção deve ser sensível aos defeitos que possam ocorrer no sistema;

4. Segurança: a proteção não deve atuar de forma errônea em casos onde não houver falta, bem como deixar de atuar em casos faltosos;
5. Economia: a implementação do sistema de proteção deve ser, economicamente, viável.

Em uma linha de distribuição, - geralmente, chamada de alimentador - encontram-se diversos dispositivos de proteção. Desta forma, é necessário realizar a coordenação dos mesmos, para que somente o dispositivo de proteção mais próximo da falta atue, isolando este do resto do sistema, satisfazendo o requisito de seletividade e proporcionando ao sistema maior confiabilidade.

4.2. Dispositivos de Controle e Proteção

Nesta seção, serão descritos os principais equipamentos de controle e proteção empregados nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

4.2.1. Elos Fusíveis

Os elos fusíveis são dispositivos de proteção, largamente, utilizados em sistemas de distribuição. Estes são utilizados junto com chaves mecânicas (ou chaves fusíveis), que abrem os contatos em casos de rompimentos do fusível, permitindo sua troca e o religamento do circuito.

O elo fusível atua quando uma corrente superior a sua capacidade de condução circula pelo elemento fusível, a qual fundirá, interrompendo a circulação de corrente pelo circuito.

Os elos fusíveis possuem dois fatores de extrema importância, que são (DECANINI, 2008):

- Tempo de interrupção: depende da intensidade de corrente que circula pelo fusível, do tipo de material do elemento fusível, do tipo de material envolvente, etc.;
- Capacidade máxima de interrupção: dependente da capacidade de produção de gases do cartucho, pressão interna do cartucho, força de corrente da expulsão dos gases e capacidade térmica dos contatos.

Os elos fusíveis podem ser classificados em:

- Elo-fusível protegido: instalado do lado da fonte,
- Elo-fusível protetor: instalado do lado da carga.

4.2.2. Religadores Automáticos

Os religadores automáticos são, amplamente, utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia. Seu uso tem aumentado em consequência do maior faturamento, quando comparado à utilização de elos fusíveis, pois estes são capazes de diferenciar uma falta permanente de uma falta transitória. Se uma falta for transitória (característica instantânea), o religador deverá tentar “limpá-la”. Caso a falta seja permanente (característica temporizada), o religador deverá permitir a atuação do dispositivo de proteção mais próximo da falta.

Os religadores automáticos apresentam as seguintes vantagens (GIGUER, 1988):

- Menor número de queima de elos fusíveis;
- Menor deslocamento de equipes de manutenção para sua troca;
- Facilidade de manobras;
- Melhor seletividade de defeitos;
- Minimização dos defeitos maléficos às redes pelos curtos-circuitos;
- Menores danos aos condutores e transformadores;

- Maior faturamento;
- Melhor imagem da empresa.

4.2.3. Seccionalizadores Automáticos

O seccionalizador automático pode ser definido como:

“Um equipamento utilizado para interrupção automática de circuitos, que abre seus contatos quando o circuito é desenergizado por um equipamento de proteção situado à sua retaguarda e equipado com dispositivo para religamento automático” (ELETROBRÁS, 1982).

Os seccionalizadores automáticos operam em conjunto com os religadores e oferecem as seguintes vantagens (DECANINI, 2008):

1. Elimina o erro humano;
2. A qualidade não é afetada com o tempo;
3. Reduz o custo de manutenção;
4. Ponto adicional de manobras.

4.2.4. Disjuntores Associados com Relés

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos comandados pelos relés, atuando para proteger o sistema dos efeitos dos curtos-circuitos nos equipamentos, com o objetivo de isolar o equipamento afetado pela falta, impedindo que a perturbação danifique outros equipamentos ou se propague para outros componentes defeituosos.

No âmbito da distribuição de energia elétrica, os relés mais importantes são os relés de sobrecorrente e os relés de religamento (PADILHA; MANTOVANI, 2005).

- Relés de sobrecorrente: supervisionam a corrente do circuito e comandam a abertura de um ou mais disjuntores, quando esta corrente ultrapassa um valor prefixado. De acordo com o tempo de atuação, estes podem ser classificados em:
 - ✓ Relé de sobrecorrente instantâneo: a operação se completa em um intervalo de tempo muito curto, após a ocorrência de sobrecorrentes, e, praticamente, independe de suas variações;
 - ✓ Relés de sobrecorrente de tempo definido: o tempo de atuação, neste caso, independe do valor da corrente;
 - ✓ Relés de sobrecorrente de tempo inverso: o tempo de operação é, inversamente, proporcional ao valor da corrente.
- Relés de religamento: são relés auxiliares usados para comandar o religamento dos disjuntores, depois de terem sido abertos por acionamento dos relés de sobrecorrente.

4.2.5. Relés Digitais

Atualmente, as concessionárias de distribuição estão aprimorando a proteção de seus sistemas de distribuição com o uso relés digitais. Estes melhoram, significativamente, a proteção da distribuição e reduzem os custos de capital operacional e de manutenção.

Os relés digitais são construídos em torno de um processador digital. Na Figura 4.2.5.1 apresenta-se um diagrama esquemático com os principais blocos que compõe um relé digital.

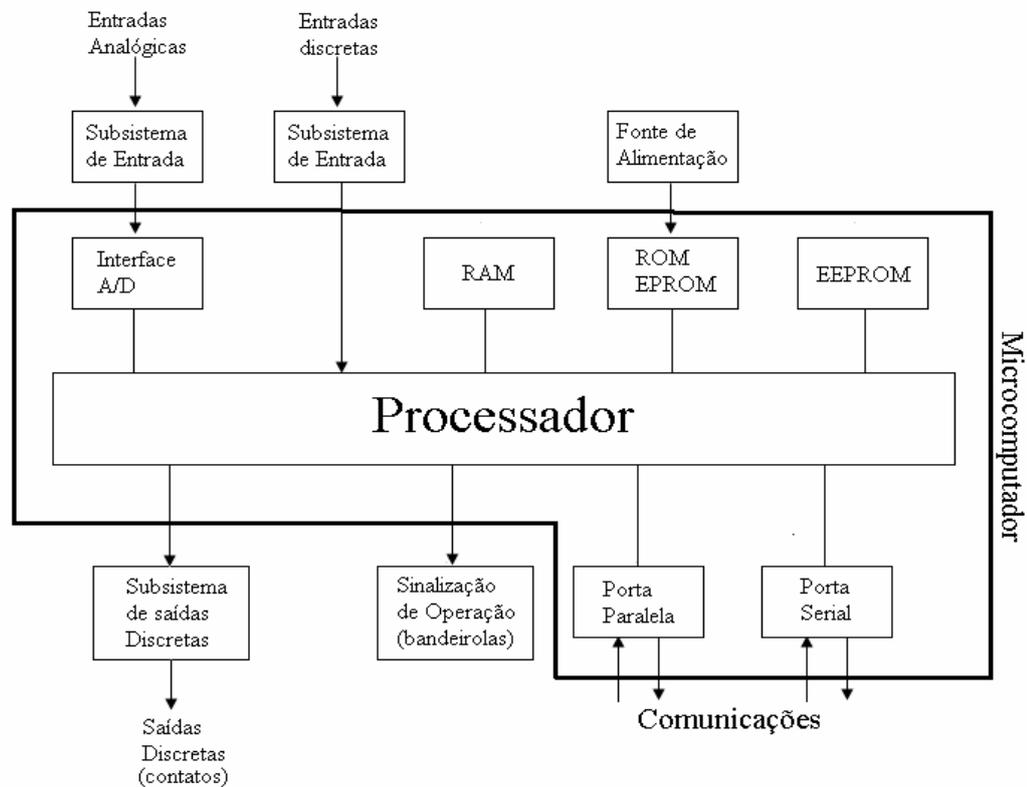


Figura 4.2.5.1. Diagrama de blocos de um relé digital.

Nas entradas dos relés, aplicam-se sinais analógicos provenientes dos transdutores específicos, além de sinais discretos, que refletem o estado de disjuntores, chaves e outros relés. Estes sinais são processados pelos subsistemas correspondentes, antes de sua aplicação ao microcomputador, que constitui o elemento principal do relé. Os sinais analógicos passam, adicionalmente, por um conversor analógico e, adicionalmente, por um conversor analógico-digital, antes de entrarem na unidade central de processamento (CPU). Os sinais discretos de saída do relé recebem processamento no subsistema de saídas discretas, que, geralmente, inclui relés eletromecânicos auxiliares para provê-los de saídas tipo contato. O relé realiza, também, a função de sinalização de sua operação (bandeiras) e de seu estado funcional, mediante dispositivos de sinalização (geralmente, luminoso) visíveis no exterior. A maioria dos relés digitais dispõe, também, de capacidade de comunicação com outros equipamentos digitais, mediante portas seriais e paralelas (www.pextron.com.br, 28/11/2008).

As principais vantagens em utilizar um relé digital, ao invés de um convencional, são:

- Melhor exploração do potencial das funções de proteção;
- Permite o desenvolvimento de novas funções e métodos de proteção;
- Autodiagnóstico;
- Relatórios de eventos;
- Compartilha dados através de redes de comunicação;
- Melhor interface homem x máquina;
- Redução de interferências do meio ambiente nas condições operativas;
- Adaptação aos requisitos funcionais operativos;

Dentre as desvantagens destacam-se:

- Vida útil reduzida, de 10 a 15 anos, enquanto os convencionais possuem vida longa acima de 30 anos;
- Interferências eletromagnéticas;
- O *hardware* dos relés digitais avança rapidamente, tornando-os obsoletos.

4.3. Conclusão

Como foi apresentada no capítulo anterior, a automação tornou-se um processo essencial, eliminando-se, gradativamente, falhas humanas. Este fato aplica-se, também, aos sistemas de proteção de redes elétricos.

A fim de se introduzir neste importante assunto, neste capítulo, foram apresentadas as características necessárias a um complexo de proteção, assim como os principais equipamentos que, hoje, são empregados neste processo.

Capítulo 5

Lógica *Fuzzy*

5.1. Introdução

A lógica *fuzzy* foi estruturada, em 1965, por Lofti A. Zadeh, da Universidade da Califórnia. Sua principal característica é a capacidade de manipular informações imprecisas, vagas, típicas do raciocínio humano, transformando-as em valores numéricos, que podem ser tratados em computadores. O objetivo da lógica nebulosa é construir um sistema com capacidade de tomar decisões baseadas em informações inexatas ou não, totalmente, confiáveis e exatas, com base no raciocínio humano.

A principal finalidade de se aplicar lógica *fuzzy* é fornecer os fundamentos para efetuar o raciocínio aproximado, com proposições imprecisas, usando, como ferramenta principal, a teoria de conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965).

5.2. Conjuntos *Fuzzy*

Um conjunto *fuzzy* A , definido no universo de discurso U , pode ser expresso por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (5.2.1)$$

sendo que:

$\mu_A(x)$: valor da função de pertinência do conjunto nebuloso A correspondente ao elemento x pertencente a U .

5.3. Função de Pertinência

A Função de pertinência associa, a cada elemento x pertencente a U , um número real $\mu_A(x)$, no intervalo $[0, 1]$. Sendo assim, a função de pertinência $\mu_A(x)$ representa o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A :

- Se $\mu_A(x) = 1$, então x é, completamente, compatível com A ;
- Se $\mu_A(x) = 0$, então x é, completamente, incompatível com A ;
- Se $0 < \mu_A(x) < 1$, então x é, parcialmente, compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

As funções de pertinências podem assumir diferentes formas associadas com cada entrada e resposta de saída. As mais usadas são as triangulares, sendo que as outras (trapezoidal, gaussiana e exponencial) são usadas dependendo da preferência e experiência do projetista.

Na Figura 5.3.1 é apresentada uma função triangular. Através dela, pode ser observado que a altura ou magnitude é normalizada entre os valores 0 e 1 (LOPES, 2005).

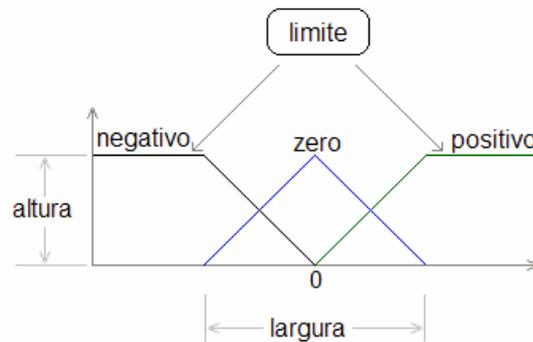


Figura 5.3.1. Função de pertinência triangular.

O grau de pertinência é determinado pela projeção vertical do parâmetro de entrada do eixo horizontal no limite mais alto da função de pertinência, o qual possui valores compreendidos entre 0 e 1 (BEZDEK, 1993).

5.4. Sistema *Fuzzy*

O sistema *fuzzy* tem como objetivo modelar o raciocínio aproximado, permitindo o desenvolvimento de sistemas que permitem a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incertezas e imprecisão. Deste modo, a lógica *fuzzy* é uma ferramenta capaz de capturar informações imprecisas, em linguagem natural, e convertê-la em uma forma numérica (MENDEL, 1995).

Um sistema de *fuzzy* é composto por um conjunto de regras *fuzzy* do tipo:

$$\text{Se } x \text{ é } A < \text{premissa} > \text{ então } y \text{ é } B < \text{conclusão} >. \quad (5.4.1)$$

sendo:

x : variável de entrada

y : variável de saída

A e B : termos linguísticos associados aos conjuntos *fuzzy*.

Mostra-se na Figura 5.4.1 um sistema nebuloso.

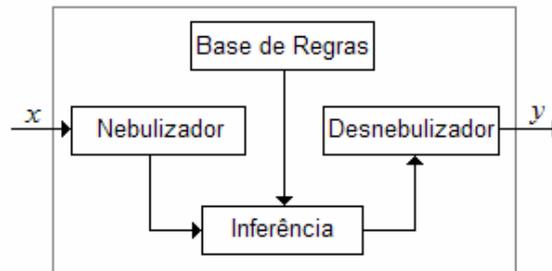


Figura 5.4.1. Sistema *fuzzy*.

sendo que:

- Nebulizador → converte valores de entrada do sistema (números reais) para termos linguísticos;
- Base de regras → local onde todo conhecimento sobre o domínio do problema em questão é armazenado;
- Inferência → manipula a base de regras;
- Desnebulizador → converte termos linguísticos em valores de saída do sistema (números reais).

Os módulos de Nebulização e Desnebulização permitem que o usuário trabalhe com variáveis de entrada de valor real e obtenha, como resposta, variáveis de saída de valor real, sendo que todo o processo de inferência é efetuado com variáveis linguísticas.

Estes sistemas nebulosos são, usualmente, usados na automação de processos que utilizam de informações imprecisas fornecidas por seres humanos e em problemas complexos, os quais requerem dispêndio de tempo e alto custo computacional, quando solucionados pela abordagem clássica. Usando-se os sistemas nebulosos, a solução é obtida, a partir do conjunto de regras de

senso comum, através de um método de inferência, o que o torna simples e rápido [Decanini, 2008].

5.5. Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a principal ferramenta usada, neste projeto, como base do algoritmo destinado à detecção de faltas em subestações: a Lógica *Fuzzy*. Trata-se de um fundamento empregado em sistemas de incerteza e imprecisos, apresentando resultados de grande exatidão, graças ao uso de seus conjuntos nebulosos, aliados às funções de pertinência. Os recursos da lógica *fuzzy* a serem usados no sistema de classificação de faltas são constituídos por um conjunto de regras e por um dispositivo, de inferência e de desnebulização, especialmente desenvolvido para atender os objetivos-alvos desta pesquisa de mestrado.

Capítulo 6

Metodologia proposta

6.1. Introdução

Neste capítulo, será descrita a metodologia proposta para a detecção e classificação de faltas de curto-circuito em subestações de distribuição de energia elétrica, usando os conceitos de lógica *fuzzy*. Trata-se de uma adaptação da proposta apresentada em Decanini (2008). A proposta de Decanini (2008) destina-se à classificação de curtos-circuitos que produzem correntes equilibradas, bem como desequilibradas de grandes magnitudes. Nesta pesquisa, o objetivo é detectar e classificar defeitos de curtos-circuitos de altas impedâncias que, certamente, é mais complexo, pois as variações das correntes são mais sutis (BARROS et al., 2008)

6.2. Visão geral

A detecção de faltas é idêntica ao procedimento apresentado em Minussi (2007). Porém, é incorporada uma sintonia particular que consiga “perceber” a ocorrência de anomalias de pequena magnitude produzidas por defeitos de alta impedância. A classificação de faltas é baseada no conceito de lógica *fuzzy*.

Para todos os pontos monitorados, para fins da detecção e classificação de faltas de curto-circuito, o sistema *fuzzy* é executado, ou seja, trata-se de um dispositivo alocado de forma paralela, com trocas de informações intermódulos para contemplar e interpretar os reflexos da interconectividade dos elementos das subestações (DECANINI; MINUSSI, 2008). Primeiro será detectado a ocorrência da falta de todos os elementos monitorados e, em seguida, o sistema *fuzzy* executará o módulo “classificação de faltas”.

Os elementos que devem ser monitorados, nas subestações, são:

- Alimentador;
- Transformador;
- Ramal;
- etc.

Nesta seção, será dada ênfase aos casos de defeitos causados por curtos-circuitos, em especial, curto-circuito de alta impedância. Para tanto, será tomado, como base, o uso de medidas de corrente elétrica para extração de características do estado do sistema (MAHANTY; DUTTA GUPTA, 2007).

6.3. Extração da Característica do Estado do Sistema

As características do estado do sistema são, normalmente, extraídas de informações, valores de corrente e tensão, distribuídas ao longo do sistema. Esta metodologia considerará apenas medições de corrente realizadas na subestação de distribuição de energia elétrica, o que possibilita, prioritariamente, reduzir investimentos (DECANINI, 2008). Na Figura 6.3.1 ilustra-se a metodologia proposta.

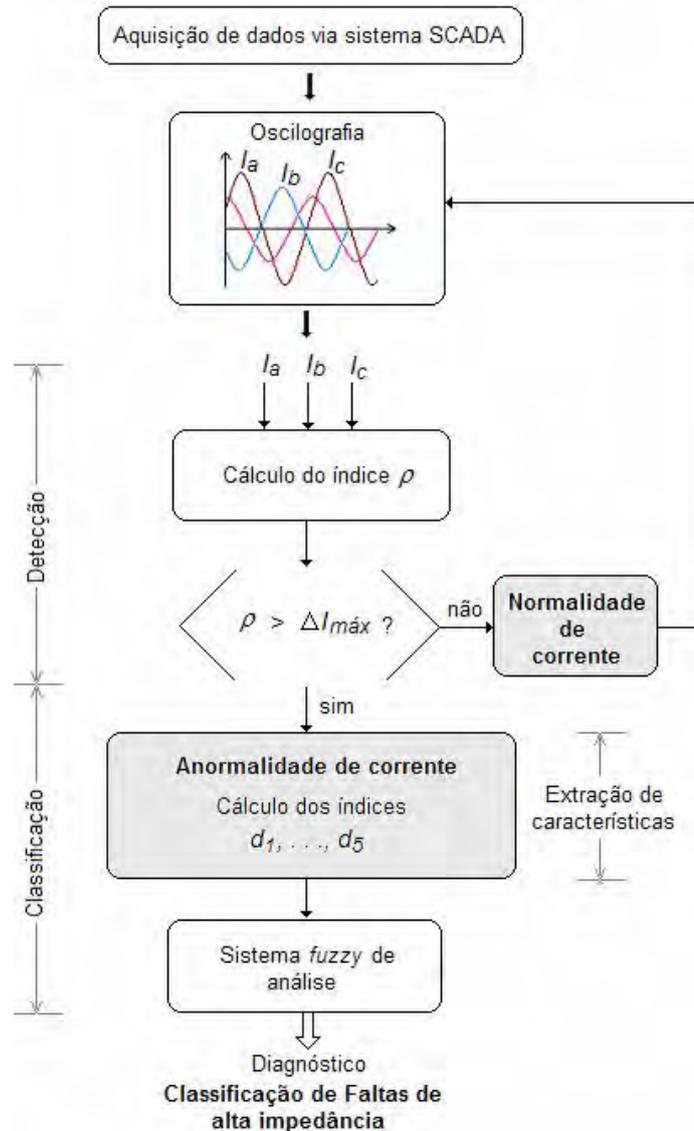


Figura 6.3.1. Diagrama de blocos simplificado da metodologia proposta.

No fluxograma mostrado na Figura 6.3.1 é apresentada uma visão sobre o sistema destinado à detecção e classificação de faltas de alta impedância. A identificação é caracterizada pelo índice ρ , que é a diferença absoluta entre a amplitude estimada das correntes trifásicas e a amplitude medida das correntes trifásicas. Esta etapa é, essencialmente, um cálculo algébrico simples, a partir das informações da oscilografia das correntes trifásicas. Se constatada anomalia de corrente, o passo seguinte constitui-se na classificação das faltas. Esta etapa é executada por um sistema de inferência *fuzzy*. As referidas etapas serão abordadas a seguir.

Deste modo, toma-se um elemento da rede elétrica, que apresente um ponto de monitoramento (ramal, transformador, alimentador, etc.). Observa-se, através do oscilograma das correntes trifásicas, um intervalo de 1 a 3 períodos. Este intervalo não necessita ser preciso, bastando, apenas, ser suficiente para caracterizar a falta. A medição das correntes são realizadas a partir do sistema SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, ou do idioma inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*) (BOYER, 2004). Trata-se de sistemas que usam *software* e *hardware* para monitorar e supervisionar as variáveis, bem como os dispositivos do sistema.

O índice d_5 é usado para caracterizar a existência ou ausência de distúrbio de corrente. Os índices d_1, \dots, d_4 são usados como critério de classificação da falta.

6.3.1. Detecção

Durante o processo de amostragem, pode-se inferir, de modo aproximado, a amplitude da corrente da forma de onda (vide Figura 6.3.1.1) do seguinte modo (AL-JUFOUT, 2006, DECANINI; MINUSSI, 2008):

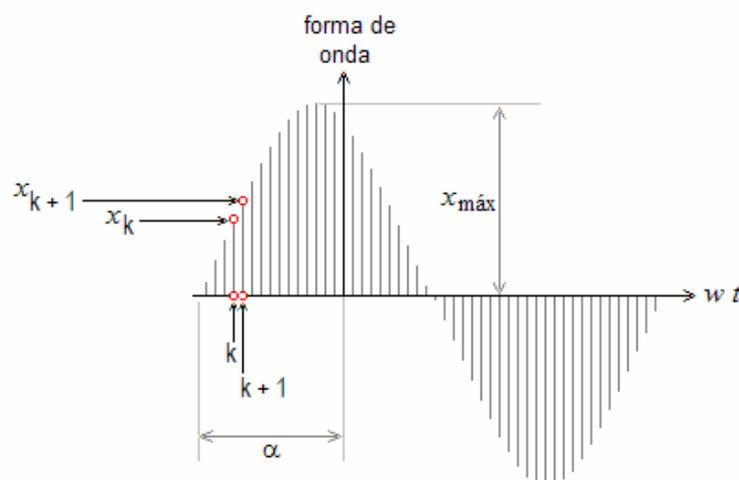


Figura 6.3.1.1. Forma de onda discretizada, considerando-se uma taxa de amostragem m .

$$X_{\text{máx}} = \left| \frac{x_k}{\text{sen}[\text{tg}^{-1}(\phi)]} \right| \quad (6.3.1.2)$$

sendo:

$$\phi = \left| \frac{x_k \text{sen}(w\Delta t)}{x_{k+1} - x_k \text{cos}(w\Delta t)} \right|$$

$$\Delta t = t_{k+1} - t_k$$

$w \equiv$ velocidade da onda (radiano elétrico/s)

$$= 2 \pi f;$$

f : frequência nominal do sistema;

k : tempo discreto;

α : defasamento angular da forma de onda.

Os valores de $X_{\text{máx}}^i$ são encontrados usando-se a equação (6.3.1.2), com $i = 1, 2, 3, \dots, L$, sendo L um número arbitrário, e.g., 5 vezes em 1 ciclo. Assim:

$$X_{\text{méd}} = \frac{\sum_{i=1}^L X_{\text{máx}}^i}{\sqrt{2} L} \quad (6.3.1.3)$$

$$\Gamma = |X_{\text{referencial}} - X_{\text{méd}}| \quad (6.3.1.4)$$

$$\rho = \frac{\Gamma^a + \Gamma^b + \Gamma^c}{3} \quad (6.3.1.5)$$

sendo:

$X_{\text{méd}}$: média aritmética dos valores de L (eficazes da forma de onda);

$X_{\text{referencial}}$: valor eficaz de referência;

Γ^a, Γ^b e Γ^c : índices calculados, usando a equação (6.3.1.4), para as fases a, b e c, respectivamente;

ρ : índice de anormalidade da forma de onda em relação ao equipamento monitorado.

Usa-se a equação (6.3.1.2) para calcular o valor da amplitude. Quando a forma de onda é perfeitamente senoidal e a medição for correta, o valor da amplitude obtido será exato. Contudo, se houver alguma mudança brusca ou distorção, haverá uma mudança no valor da amplitude, através de uma discrepância em relação ao valor real ($X_{\text{referencial}}$). Sendo assim, adaptando as equações (6.3.1.3)-(6.3.1.5), pode-se propor o seguinte critério para detecção da faltas:

$$1. \text{ se } \rho \geq \Delta I_{\text{máx}} \rightarrow d_5 = 1 \quad (6.3.1.6)$$

(existência de anomalia de corrente)

$$2. \text{ se } \rho < \Delta I_{\text{máx}} \rightarrow d_5 = 0 \quad (6.3.1.7)$$

(não há constatação de anomalia relevante de corrente).

sendo:

ρ : calculado usando-se a equação (6.3.1.5) e tomando-se $X_{\text{referencial}}$ como sendo a corrente nominal eficaz, em que $X_{\text{referencial}}$ é calculado usando-se as equações $\text{máx}\{\text{abs}(I_a)\}$, $\text{máx}\{\text{abs}(I_b)\}$ e $\text{máx}\{\text{abs}(I_c)\}$ para as fases a, b e c, respectivamente;

$\Delta I_{\text{máx}}$: parâmetro a ser especificado em função da experiência. Por exemplo, pode-se arbitrar $\Delta I_{\text{máx}} = 1$.

O índice d_5 pode ser usado nos casos de curto-circuito, mas sua indicação é, em especial, às faltas trifásicas.

6.3.2. Classificação

Deverão ser identificados os valores máximos de corrente apresentados para cada uma das fases a, b e c. Por conseguinte, calculam-se as seguintes grandezas (MAHANTY; DUTTA GUPTA, 2007):

$$da = \frac{\text{máx}\{\text{abs}(Ia)\}}{\text{máx}\{\text{abs}(Ib)\}} \quad (6.3.2.1)$$

$$db = \frac{\text{máx}\{\text{abs}(Ib)\}}{\text{máx}\{\text{abs}(Ic)\}} \quad (6.3.2.2)$$

$$dc = \frac{\text{máx}\{\text{abs}(Ic)\}}{\text{máx}\{\text{abs}(Ia)\}} \quad (6.3.2.3)$$

sendo:

$\text{máx}\{\text{abs}(Ia)\}$: valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase a;

$\text{máx}\{\text{abs}(Ib)\}$: valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase b;

$\text{máx}\{\text{abs}(Ic)\}$: valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase c.

Para se obter os valores relativos da corrente entre as três fases, as grandezas da , db e dc são normalizadas do seguinte modo (MAHANTY; DUTTA GUPTA, 2007):

$$na = \frac{da}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (6.3.2.4)$$

$$nb = \frac{db}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (6.3.2.5)$$

$$nc = \frac{dc}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (6.3.2.6)$$

Finalmente, as grandezas são representadas na forma relativa, do seguinte modo (MAHANTY; DUTTA GUPTA, 2007):

$$d_1 = na - nb \quad (6.3.2.7)$$

$$d_2 = nb - nc \quad (6.3.2.8)$$

$$d_3 = nc - na. \quad (6.3.2.9)$$

Desta forma, as características dos diferentes tipos de faltas de curto-circuito são determinadas em termos dos índices d_1 , d_2 e d_3 . Com o auxílio da lógica *fuzzy*, pretende-se realizar a classificação de faltas de alta impedância. Estas características podem ser extraídas e compreendidas via simulação das subestações.

Das equações (6.3.2.7) – (6.3.2.9), pode-se concluir que:

$$d_1 + d_2 + d_3 = 0 \quad (6.3.2.10)$$

Assim, d_3 pode ser expresso por:

$$d_3 = -(d_1 + d_2) \quad (6.3.2.11)$$

Os valores dos índices d_1 , d_2 e d_3 variam entre -1 e 1 , dependendo do tipo de curto-circuito e dos parâmetros do circuito (impedância de faltas, nível de carregamento do sistema, etc.).

Para a classificação de defeitos assimétricos, tais índices são suficientes. Já para os casos de defeitos fase a fase, usa-se outro índice, com o propósito de distinguir se há ou não ligação à

terra. Tal índice é denominado de σ e definido como segue (MAHANTY; DUTTA GUPTA, 2007):

$$\sigma = \frac{\text{máx}\{Ia + Ib + Ic\}}{3} \quad (6.3.2.12)$$

O parâmetro σ é similar à corrente de sequência zero. Porém, sem a necessidade de determinar a defasagem das correntes Ia , Ib e Ic (DECANINI; MINUSSI, 2008) De acordo com o tipo de falta – faltas com conexão à terra (valores muito grandes) ou faltas sem conexão à terra (valores muito pequenos) –, o parâmetro σ apresenta um comportamento diferente. Determinado o valor de σ , pode-se usar o seguinte critério [DECANINI; MINUSSI, 2008]:

$$1. \text{ se } \sigma \geq \sigma_{\text{máx}} \rightarrow d_4 = 1 \quad (6.3.2.13)$$

(para faltas com conexão à terra)

$$2. \text{ se } \sigma < \sigma_{\text{máx}} \rightarrow d_4 = 0 \quad (6.3.2.14)$$

(para faltas sem conexão à terra)

sendo:

$\sigma_{\text{máx}}$: valor estabelecido a partir de simulações e medidas, considerando-se faltas de curto-circuito.

Tendo em vista que, durante as faltas, as formas de ondas de correntes não são, essencialmente, senóides perfeitas, a fim de eliminar o ruído presente nas oscilografias, a abordagem, via extração das grandezas d_1 , d_2 , d_3 e d_4 , torna-se importante neste tipo de aplicação (DECANINI; MINUSSI, 2008). As grandezas na , nb e nc são normalizadas.

6.4. Análise Comportamental dos Índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5

A análise comportamental dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 serão feitas através de dados oscilográficos que, geralmente, são constituídos através de ciclos pré e pós-falta, os quais devem ser corretamente identificados no conjunto de amostras fornecidos.

Pode-se observar, através da Figura 6.4.1, que os valores máximos absolutos das correntes de fase a, b e c são, aproximadamente, iguais. Desta forma, aplicando as equações 6.3.2.4 a 6.3.2.6, tem-se d_a , d_b e d_c próximos a 1. Por conseguinte, n_a , n_b e n_c também serão próximos a 1 e, finalmente, os índices d_1 , d_2 e d_3 serão próximos a 0. Isto acontece porque as grandezas n_a , n_b e n_c são representadas de forma relativa. Os índices d_4 e d_5 serão iguais a zero, pois não há presença da terra e anormalidade do sistema, respectivamente.

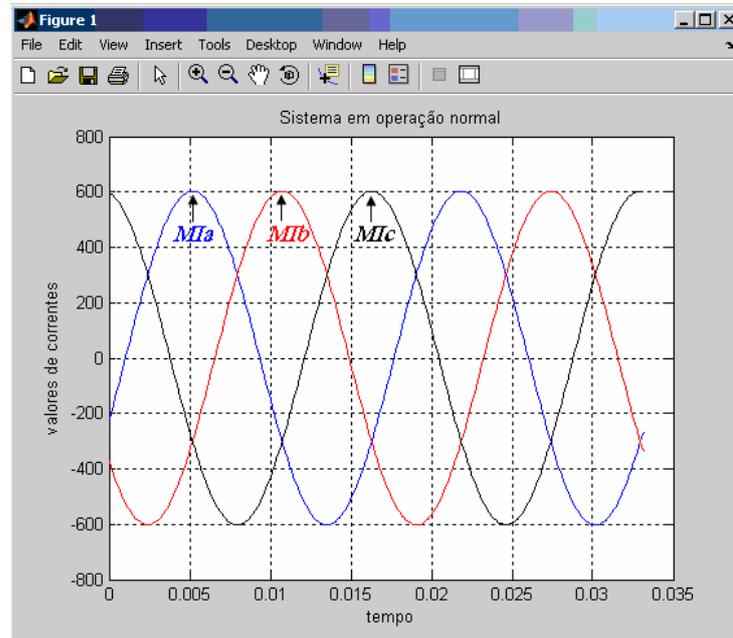


Figura 6.4.1. Correntes trifásicas para o sistema em operação normal.

Apresentam-se, na Figura 6.4.2, as correntes das fases a , b e c para faltas trifásicas. Os valores das correntes de fases estão elevados. Porém, como no caso de operação normal, elas possuem valores, aproximadamente, iguais. Analisando as equações 6.3.2.4, 6.3.2.5 e 6.3.2.6, observa-se que os índices d_1 , d_2 e d_3 serão, aproximadamente, iguais a zero, como na operação normal. Isto acontece em consequência da metodologia levar em conta os valores relativos das correntes. Os índices d_4 será zero e d_5 será 1, pois não há presença da terra e existe anormalidade do sistema, respectivamente.

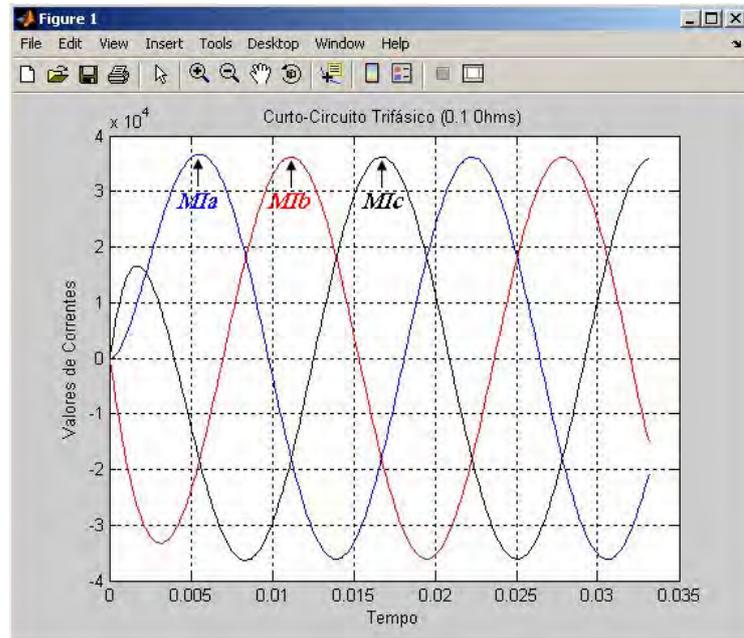


Figura 6.4.2. Correntes associadas a um curto-circuito trifásico.

Na Figura 6.4.3 são apresentadas as correntes das fases a, b e c para falta *fase a – terra*. Analisando as equações 6.3.2.4 a 6.3.2.6, observa-se que d_a possui valor altíssimo, d_b , aproximadamente, 1 e d_c pequeno. Isto acontece porque o valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase *a* é muito maior que os valores das fases b e c. Desta forma, tem-se n_a igual a 1, n_b pequeno e n_c muito pequeno. Por conseguinte, d_1 terá um valor positivo e grande, d_2 será positivo e pequeno e d_3 será negativo e grande. Os índices d_4 e d_5 serão iguais a 1, pois há presença da terra e existe anormalidade do sistema, respectivamente.

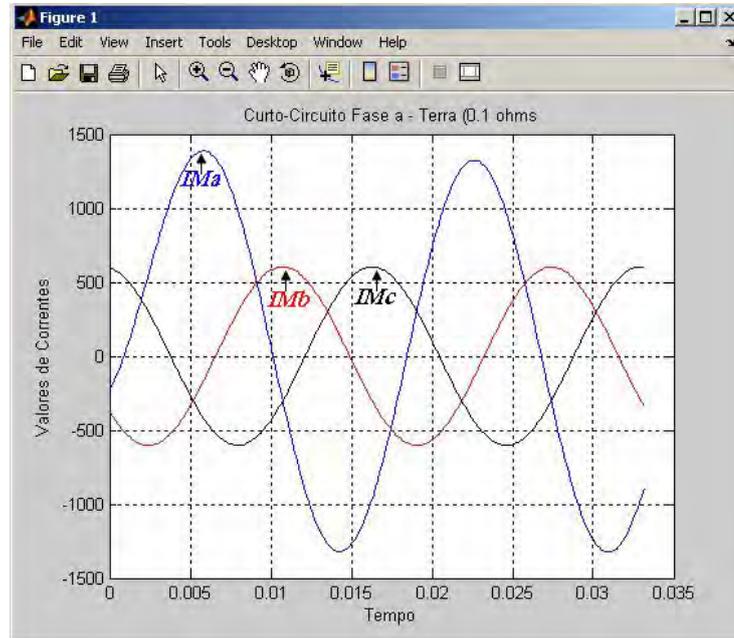


Figura 6.4.3. Correntes trifásicas para curto-circuito *fase a – terra* de baixa impedância.

Representa-se na Figura 6.4.4 uma corrente trifásica para curto-circuito *fase a – terra* de alta impedância. Analisando as equações 6.3.2.4 a 6.3.2.6, podemos concluir que d_1 será positivo e pequeno, d_2 será positivo e pequeno e d_3 será negativo e pequeno. Este “pequeno” é completamente diferente dos índices obtidos quando se tem operação normal do sistema e curtos-circuitos trifásicos, os quais são bem próximos a zero. Os índices d_4 e d_5 são iguais a 1, pois há presença da terra e existe anormalidade do sistema, respectivamente.

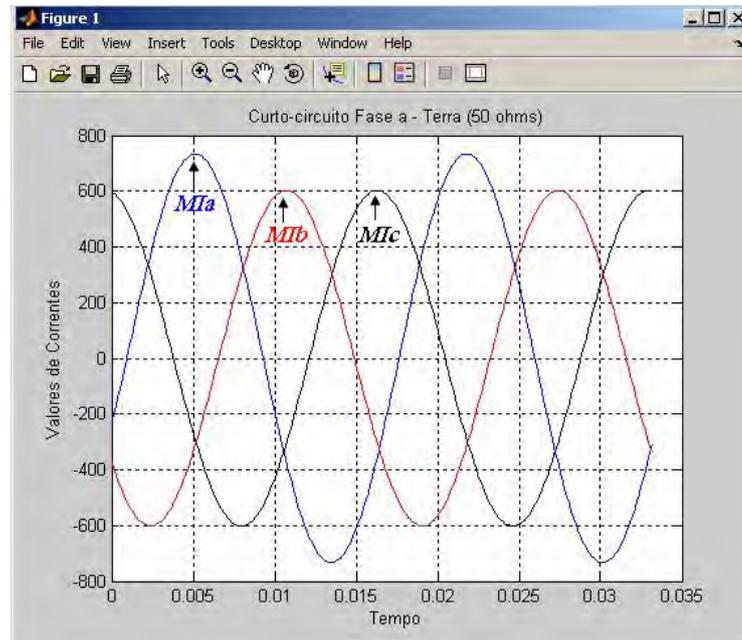


Figura 6.4.4. Correntes trifásicas para curto-circuito *fase a – terra* de alta impedância.

6.5. Classificação do Estado do Sistema

A detecção de normalidade ou anormalidade do sistema de distribuição de energia elétrica é executada permanentemente. Detectada anormalidade no sistema, ou seja, ocorrência de falta será realizada, em seguida, a classificação da falta, podendo a mesma ser monofásica, bifásica ou trifásica, com ou sem a ligação à terra.

A base de regras do “módulo classificador”, contendo o comportamento do sistema para as diversas condições de faltas, será construída considerando as simulações realizadas no *software* ATP (*Alternative Transients Program*) (MEYER,2000, USER’S MANUAL, 2002), a qual será indispensável na construção de uma base de regras robusta para a definição do estado do sistema.

A definição de conjunto nebuloso triangular, associado a cada variável (d_1 , d_2 e d_3), corresponde ao conceito de máxima pertinência, ou seja, é o conjunto que proporciona o maior

valor da função μ . Por exemplo, se o índice d_i ($i = 1, 2$ ou 3) estiver situado conforme é mostrado na Figura 6.5.1, então, o conjunto nebuloso associado à d_i será o conjunto S (DECANINI, 2008). Os índices d_4 e d_5 são números binários que representam a presença ou ausência da terra e a existência ou não de anormalidade no sistema, respectivamente.

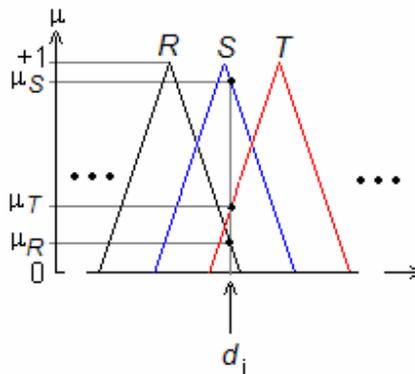


Figura 6.5.1. Conjunto nebuloso destacados.

Após definidos os conjuntos nebulosos dos índices d_1 , d_2 e d_3 e os valores dos índices d_4 e d_5 , o “módulo classificador” poderá diagnosticar o estado do sistema.

Ressalta-se, também, que cada conjunto *fuzzy*, com formato triangular, é definido por 3 parâmetros, ou seja, os 3 vértices, os quais devem ser predefinidos (arbitrados com critérios). Estes 3 vértices definem o desempenho da inferência fuzzy. Portanto, ao sistema fuzzy pode ser incorporado um procedimento adaptativo para a obtenção de um posicionamento de tais vértices, visando maximizar o desempenho deste sistema. Cada conjunto *fuzzy* é definido por 3 vértices, os quais são estabelecidos pelos parâmetros R_{\min} , $R_{\text{médio}}$ e R_{\max} , conforme pode ser visualizado na Figura 6.5.2 (conjunto *fuzzy* R).

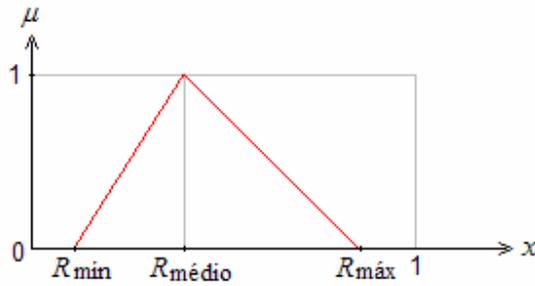


Figura 6.5.2. Representação de um conjunto *fuzzy* triangular R definido pelos parâmetros ($R_{\text{mín}}$, $R_{\text{médio}}$, $R_{\text{máx}}$).

Assim, para todos os conjuntos *fuzzy* pode-se definir a seguinte matriz contendo os valores mínimo, médio e máximo no eixo da abscissa da Figura 6.5.2, respectivamente [Minussi, 2007]:

$$M = \begin{bmatrix} \text{NG}_{\text{mín}} & \text{NP}_{\text{mín}} & \text{ZE}_{\text{mín}} & \text{PP}_{\text{mín}} & \text{PG}_{\text{mín}} \\ \text{NG}_{\text{médio}} & \text{NP}_{\text{médio}} & \text{ZE}_{\text{médio}} & \text{PP}_{\text{médio}} & \text{PG}_{\text{médio}} \\ \text{NG}_{\text{máx}} & \text{NP}_{\text{máx}} & \text{ZE}_{\text{máx}} & \text{PP}_{\text{máx}} & \text{PG}_{\text{máx}} \end{bmatrix} \quad (6.5.1)$$

A partir desta matriz, os conjuntos NG, NP, ZE, PP e PG podem ser assim definidos [Minussi, 2007]:

$$\mu_{\text{NG}}(x) \equiv \begin{cases} 1, & \text{para } -1 \leq x \leq \text{NG}_{\text{médio}} \\ -\frac{1}{(\text{NG}_{\text{máx}} - \text{NG}_{\text{médio}})}x + \frac{\text{NG}_{\text{máx}}}{(\text{NG}_{\text{máx}} - \text{NG}_{\text{médio}})}, & \text{para } \text{NG}_{\text{médio}} < x \leq \text{NG}_{\text{máx}} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{NP}}(x) \equiv \begin{cases} \frac{1}{(\text{NP}_{\text{médio}} - \text{NP}_{\text{mín}})}x - \frac{\text{NP}_{\text{mín}}}{(\text{NP}_{\text{médio}} - \text{NG}_{\text{mín}})}, & \text{para } \text{NP}_{\text{mín}} < x \leq \text{NP}_{\text{médio}} \\ -\frac{1}{(\text{NP}_{\text{máx}} - \text{NP}_{\text{médio}})}x + \frac{\text{NP}_{\text{máx}}}{(\text{NP}_{\text{máx}} - \text{NP}_{\text{médio}})}, & \text{para } \text{NP}_{\text{médio}} < x \leq \text{NP}_{\text{máx}} \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ZE}}(x) \equiv \begin{cases} \frac{1}{(\text{ZE}_{\text{médio}} - \text{ZE}_{\text{mín}})}x - \frac{\text{ZE}_{\text{mín}}}{(\text{ZE}_{\text{médio}} - \text{ZE}_{\text{mín}})}, & \text{para } \text{ZE}_{\text{mín}} < x \leq \text{ZE}_{\text{médio}} \\ -\frac{1}{(\text{ZE}_{\text{máx}} - \text{ZE}_{\text{médio}})}x + \frac{\text{ZE}_{\text{máx}}}{(\text{ZE}_{\text{máx}} - \text{ZE}_{\text{médio}})}, & \text{para } \text{ZE}_{\text{médio}} < x \leq \text{ZE}_{\text{máx}} \end{cases}$$

caso, as alterações de correntes são sutis, podendo ser confundidas apenas com o aumento ou a diminuição das correntes em função das mudanças no atendimento da demanda aos consumidores. O conjunto de regras deve ser, então, mais ajustado para “perceber” tais distúrbios. Neste sentido, propõe-se um sistema *fuzzy* de análise (BARROS, et al., 2008), conforme mostrado na Figura 6.6.1, para detecção e classificação de faltas de baixa, média e de alta impedância, com maior atenção para as faltas de alta impedância.

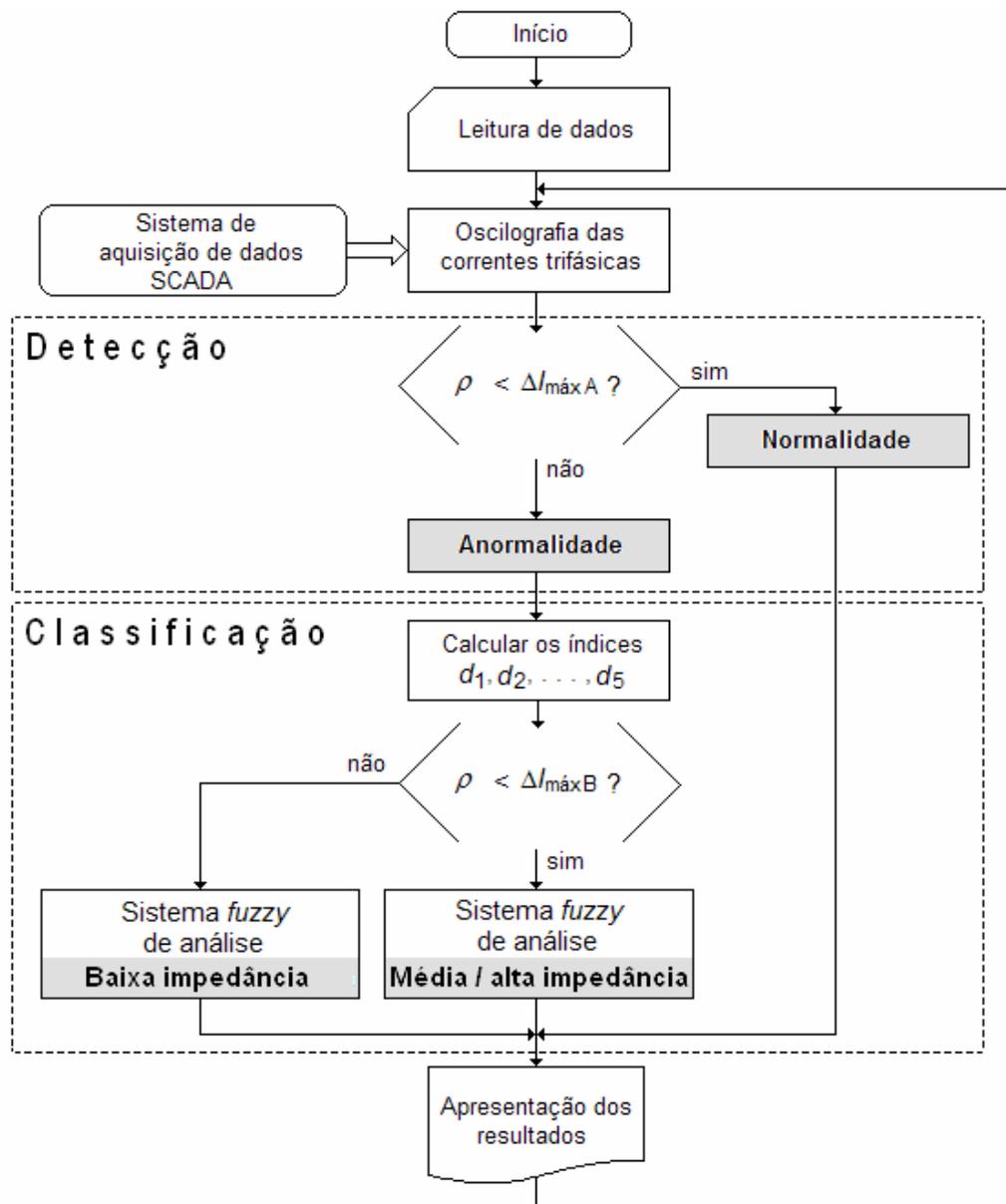


Figura 6.6.1. Sistema *fuzzy* de análise (detecção / classificação de faltas) proposto.

Na Figura 6.6.1, usam-se dois limitantes para o parâmetro ρ , ou seja, $\Delta I_{\text{máxA}}$ e $\Delta I_{\text{máxB}}$ para detecção de anormalidades de corrente de média / alta impedância ou de baixa impedância respectivamente. Os parâmetros $\Delta I_{\text{máxA}}$ e $\Delta I_{\text{máxB}}$ devem ser ajustados levando-se em conta a experiência como este tipo de aplicação, respeitando-se a seguinte relação:

$$\Delta I_{\text{máxA}} < \Delta I_{\text{máxB}} \quad (6.6.1)$$

6.7. Filtro Passa-Normalidade

No ambiente da operação dos sistemas elétricos de potência, deve-se empregar todos os recursos disponíveis visando evitar ou, pelo menos, minimizar os efeitos causados por faltas (curto-circuito, etc.), as quais são eventos de ocorrência frequente. Dentre estes recursos, destaca-se a ação preventiva. Trata-se de dispositivos que integram a monitoração, análise e o desenvolvimento de medidas corretivas (MCGRANAGHAN, 2006). Para efetivamente produzir bons resultados, neste sentido, faz-se necessário conhecer o comportamento do sistema em situações passadas com o propósito de orientar a tomada da decisão. Este conhecimento pode ser adquirido a partir de bases de dados (dados históricos), *e.g.*, empregando-se redes neurais artificiais (KARTALOPOULOS, 1996), lógica *fuzzy* (ZADEH, 1965), etc. Se as formas de onda (de corrente e de tensão) foram armazenadas de modo contínuo, o uso de tais bases de dados torna-se pouco eficiente, tendo em vista o grande volume de informação que envolve nesta operação. Um procedimento alternativo, comumente adotado pelo setor elétrico, consiste no armazenamento de modo intermitente, ou seja, o registro é efetuado em períodos preestabelecidos. Por exemplo, 2 ou 3 vezes por minuto, sendo que cada registro corresponde a um número de ciclos, também, preestabelecido.

Assim sendo, propõe-se um procedimento “mais racional” para a construção da referida base de dados, cujo armazenamento é realizado tomando-se somente os casos que efetivamente representam riscos à integridade do sistema. Este procedimento é chamado, neste trabalho, filtro passa-normalidade. Neste caso, os registros são efetivados somente quando o filtro “perceber” a

existência de anormalidade ou iminente anormalidade. Isto representará um menor volume de informações armazenadas na base de dados. O referido filtro é caracterizado usando-se o seguinte critério:

- **Anomalia na forma de onda de corrente**

$$\text{se } \rho I \geq \Delta I_{\text{máx}}$$

- **Anomalia na forma de onda de tensão**

$$\text{se } \rho V \geq \Delta V_{\text{máx}}.$$

Trata-se da execução do módulo “Detecção” destacado na Figura (6.6.1). O parâmetro ρI é calculado usando-se a equação (6.3.1.5) e tomando-se $X_{\text{referencial}}$ como sendo a corrente nominal eficaz, em que $X_{\text{referencial}}$ é calculado usando-se as equações $\text{máx}\{\text{abs}(I_a)\}$, $\text{máx}\{\text{abs}(I_b)\}$ e $\text{máx}\{\text{abs}(I_c)\}$ para as fases a, b e c, respectivamente. De modo semelhante, pode-se calcular ρV usando-se, também, a equação (6.3.1.5), porém, fixando-se $X_{\text{referencial}}$ como sendo o valor da tensão nominal eficaz do circuito.

O registro de cada trecho da oscilografia de interesse (existência de anormalidade) (vide Figura 6.7.1) deve ser realizado incluindo-se um número prefixado de ciclos anteriores ao instante em que foi detectada a anormalidade, como forma de disponibilizar informações mais completas sobre a falta possibilitando, por exemplo, a análise sobre a possível causa da falta, a análise da evolução do estado do sistema da normalidade até atingir a anormalidade, etc. Para realizar esta tarefa, deve-se usar o armazenamento da oscilografia em um sistema de memória temporária via deslocamento janelar. Se houver anormalidade, armazena-se o referido trecho na base de dados, evidentemente, contendo todas as informações possíveis (tempo de ocorrência, etc.). Quando não for detectada a anormalidade na janela corrente, esta janela deverá ser descartada. Este estudo torna-se importante, pois pode oferecer subsídios ao desenvolvimento de medidas preventivas que, certamente, é um recurso de grande interesse do setor elétrico.

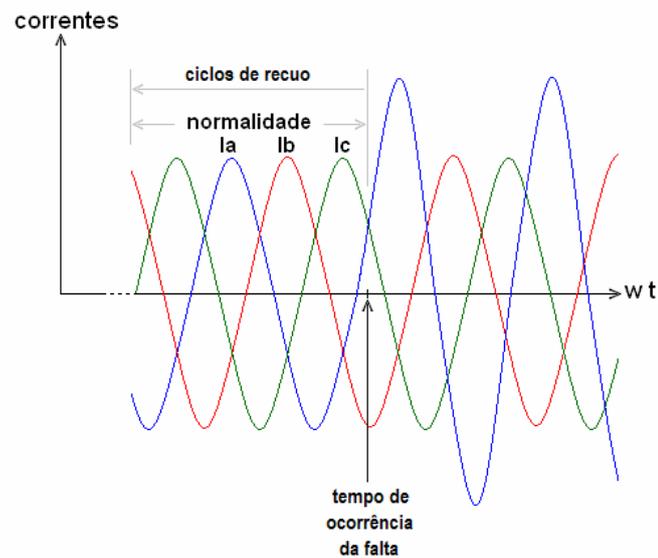


Figura 6.7.1. Registro do trecho de interesse do oscilograma (referente a falta) na base de dados.

6.8. Conclusão

Foram apresentados, neste capítulo, os procedimentos adotados para a detecção e a classificação de faltas. Através da coleta de dados de correntes, originários das três fases – a , b e c –, pode-se chegar a um diagnóstico, responsável por apontar a existência ou não de falhas, assim como as fases envolvidas e a presença ou não de terra. O enfoque dado nesta pesquisa é direcionado para faltas de alta impedância. Este tipo de faltas requer uma atenção especial por se tratar de um problema mais complexo, se comparado ao caso de baixa / média impedância. A caracterização de faltas de baixa / média impedância, bem como de alta impedância será estabelecida nos próximos capítulos, ficando, aqui, apenas em considerá-las de forma distintas para fins de análise. Deve-se mencionar que todos os valores coletados de corrente, antes de serem analisados pela lógica *fuzzy*, passam por um tratamento matemático, sendo, convenientemente, normalizados. Os resultados desta normalização são índices que, através de seus valores, serão os responsáveis pela detecção da falta, além de classificá-la.

Capítulo 7

Implementação da Metodologia Proposta

7.1. Introdução

Conforme apresentado no capítulo anterior, a metodologia de detecção e localização de faltas proposta faz uso de dados oscilográficos extraídos dos sinais de corrente na saída do alimentador da subestação de distribuição de energia elétrica. A partir desses dados, o módulo classificador diagnosticará casos de falta *fase-terra* (A-g, B-g e C-g), *fase-fase* (AB, BC e CA), *fase-fase-terra* (AB-g, BC-g e CA-g), *faltas trifásica* (ABC e ABC-g) e o sistema em *operação normal*.

A obtenção de dados reais de faltas, em empresas distribuidoras de energia elétrica, exigiria grandes períodos de monitoração do alimentador sem a garantia de ocorrências de casos adequados e suficientes de faltas. Sendo assim, a solução encontrada para obter os dados necessários foi realizar a simulação de um alimentador radial em um *software*.

7.2. Programas Computacionais Empregados

Para obtenção das oscilografias necessárias foi utilizado neste trabalho o *Alternative Transients Program* (ATP) (MEYER, 2000). O ATP é um programa computacional, com interface gráfica, para simulações de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica em sistemas de potência, a qual podem ser simulados redes elétricas e complexas e sistema de controle de estrutura arbitrária.

Para implementação da metodologia de detecção e localização de faltas foi utilizado o Fortran 4.0 (CRISTO, 2003). O Fortran permite a criação de programas que primam pela velocidade de execução.

Com a utilização destes dois recursos foi possível realizar o diagnóstico de detecção e localização de faltas do sistema de distribuição de energia elétrica.

7.3. Sistema de Distribuição Utilizado

O sistema de distribuição simulado sob as diversas condições de falta consiste em um alimentador radial com cargas intermediárias adaptado da referência (WAKILEH; PAHWA, 1997). As ramificações originais presentes no alimentador, foram substituídas por cargas equivalentes.

Na Figura 7.3.1 é mostrado o alimentador radial simulado no ATP. Os dados deste sistema estão expostos na Tabela 7.3.1.

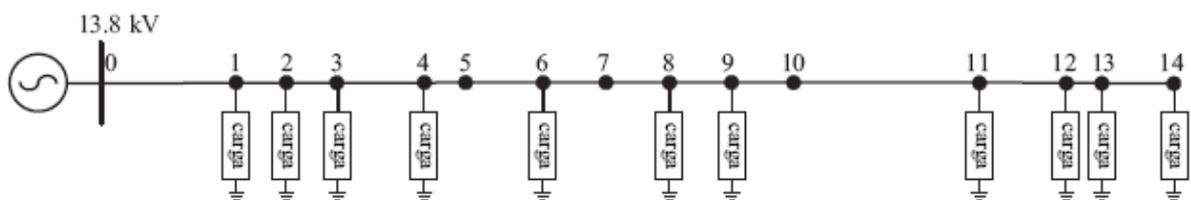


Figura 7.3.1. Diagrama unifilar do alimentador radial.

Tabela 7.3.1. Dados do alimentador radial.

Barra		Impedância da Linha		Potência	
Inicial	Final	$R (\Omega)$	$X (\Omega)$	Ativa (P) (kW)	Reativa (Q) (kW)
0	1	1,170	1,128	2646	882
1	2	0,353	0,340	522	174
2	3	0,353	0,340	4896	1632
3	4	0,613	0,591	936	312
4	5	0,288	0,278	0	0
5	6	0,540	0,521	1806	602
6	7	0,442	0,426	0	0
7	8	0,442	0,426	1503	501
8	9	0,434	0,418	189	63
9	10	0,434	0,418	0	0
10	11	1,302	1,255	657	219
11	12	0,608	0,586	336	112
12	13	0,249	0,240	125	42
13	14	0,504	0,486	225	85

sendo:

R : resistência do trecho (linha) em Ω ;

X : reatância do trecho (linha) em Ω .

Para fins de detecção e classificação de faltas usou-se os 14 pontos apresentados pelo sistema, os quais estão expostos na Tabela 7.3.1. Para obtenção de um número maior de

simulações de faltas, julga-se necessário a criação de mais pontos de aplicação da falta, isso se faz dividindo cada trecho do alimentador em subtrechos.

7.4. Simulações no *Software* ATP

O alimentador radial de distribuição implementado no *software* ATP/EMTP apresenta-se na figura 7.3.1. Os trechos do alimentador foram modelados como sendo circuitos RL série, sem considerações de acoplamento entre as fases. As cargas foram modeladas como impedância constante ligadas em Y aterrado. As faltas foram modeladas como simples resistência.

As simulações foram realizadas a partir de uma amostragem de dados com uma frequência de 128 amostras por ciclo, ou seja, 7,68 kHz.

O tempo de simulação considerado foi de 33,3 milissegundos, que corresponde a 2 ciclos em 7,68 kHz.

Simulou-se 552 casos de curtos-circuitos. Considerou-se, também, diferentes valores de resistência de faltas (R_f): 0,1; 2; 10; 50 e 100 Ω , ângulos de inserção da falta (θ_f): 0°, carregamentos do sistema (S_o): 60; 80 e 100% (carregamento nominal).

As resistências de falta (50 e 100 Ω) são consideradas de valores altos, ou seja, os curtos-circuitos são caracterizados como de alta impedância.

7.5. Concepção dos Módulos Classificadores

Baseando-se nos 220 casos de curto-circuito de alta impedância simulados, presentes no Anexo A, definiram-se as bases de regras e o conjunto nebuloso para o módulo classificador “Módulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância” (MCCDNI), que fornece o diagnóstico do sistema e discrimina o nível de impedância (alta e baixa) para cada tipo de curto-circuito.

Considerando-se a caracterização dos conjuntos *fuzzy* como mostrado na Figura 7.5.1, é possível avaliar a influência da impedância Z_f no comportamento da falta.

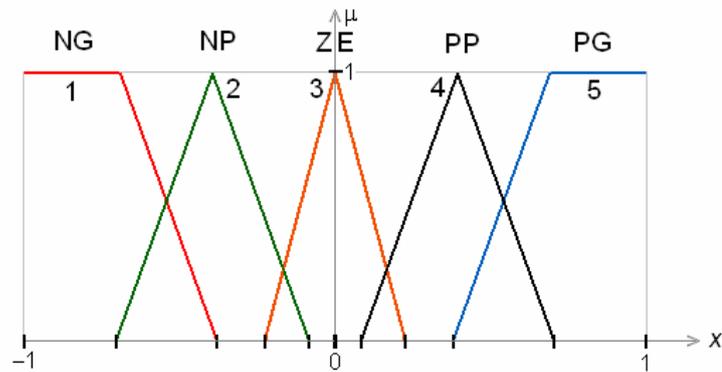


Figura 7.5.1. Conjunto nebuloso para o “MCCDNI”.

Os conjuntos nebulosos são definidos em (6.5.1), onde NG, NP, ZE, PP E PG são caracterizados por Negativo Grande, Negativo Pequeno, Zero, Positivo Pequeno e Positivo Grande respectivamente. Para as análises, adotam-se os seguintes valores para os componentes da matriz M :

$$\mathbf{M} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{NG} & \text{NP} & \text{ZE} & \text{PP} & \text{PG} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{vértice 1} \\ \text{vértice 2} \\ \text{vértice 3} \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -0,6 & -0,0923 & 0 & 0,5231 \\ -0,7615 & -0,3 & 0 & 0,3 & 0,7615 \\ -0,5231 & 0 & 0,0923 & 0,6 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.5.1)$$

Considerando-se as possíveis faltas e os resultados de simulações realizadas, a distribuição dos índices d_1, \dots, d_5 , apresenta-se na Tabela 7.5.1.

sendo:

g : indica conexão à terra;

Z_f : falta de (alta) impedância.

Tabela 7.5.1. Ilustração do comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 no MCCDNI.

Índice Fuzzy			d_4	d_5	Tipo de Falta	Z_f (Ω)
d_1	d_2	d_3				
PG	PP	NG	1	1	A-g – (baixa)	0,1
PG	PP	NG	1	1	A-g – (baixa)	2
PG	PP	NG	1	1	A-g – (baixa)	10
PP	PP	NP	1	1	A-g – (alta)	50
PP	PP	NP	1	1	A-g – (alta)	100
NG	PG	PP	1	1	B-g – (baixa)	0,1
NG	PG	PP	1	1	B-g – (baixa)	2
NG	PG	PP	1	1	B-g – (baixa)	10
NP	PP	PP	1	1	B-g – (alta)	50
NP	PP	PP	1	1	B-g – (alta)	100
PP	NG	PG	1	1	C-g – (baixa)	0,1
PP	NG	PG	1	1	C-g – (baixa)	2
PP	NG	PG	1	1	C-g – (baixa)	10
PP	NP	PP	1	1	C-g – (alta)	50
PP	NP	PP	1	1	C-g – (alta)	100
NG	PG	NP	1	1	A-B-g (baixa)	0,1
NG	PG	NP	1	1	A-B-g (baixa)	2
NG	PG	NP	1	1	A-B-g (baixa)	10
NP	PP	NP	1	1	A-B-g (alta)	50
NP	PP	NP	1	1	A-B-g (alta)	100
PG	NP	NG	1	1	A-C-g (baixa)	0,1
PG	NP	NG	1	1	A-C-g (baixa)	2
PG	NP	NG	1	1	A-C-g (baixa)	10
PP	NP	NP	1	1	A-C-g (alta)	50
PP	NP	NP	1	1	A-C-g (alta)	100
NP	NG	PG	1	1	B-C-g (baixa)	0,1
NP	NG	PG	1	1	B-C-g (baixa)	2

NP	NG	PG	1	1	B-C-g (baixa)	10
NP	NP	PP	1	1	B-C-g (alta)	50
NP	NP	PP	1	1	B-C-g (alta)	100
ZE	ZE	ZE	0	1	A-B-C-G	-
NG	PG	NP	0	1	A-B (baixa)	0,1
NG	PG	NP	0	1	A-B (baixa)	2
NG	PG	NP	0	1	A-B (baixa)	10
NP	PP	NP	0	1	A-B (alta)	50
NP	PP	NP	0	1	A-B (alta)	100
PG	NP	NG	0	1	A-C (baixa)	0,1
PG	NP	NG	0	1	A-C (baixa)	2
PG	NP	NG	0	1	A-C (baixa)	10
PP	NP	NP	0	1	A-C (alta)	50
PP	NP	NP	0	1	A-C (alta)	100
NP	NG	PG	0	1	B-C (baixa)	0,1
NP	NG	PG	0	1	B-C (baixa)	2
NP	NG	PG	0	1	B-C (baixa)	10
NP	NP	PP	0	1	B-C (alta)	50
NP	NP	PP	0	1	B-C (alta)	100

Na Tabela 7.5.1, observa-se que o MCCDNI diagnosticará o envolvimento nas três fases na falta, não especificando a presença ou a ausência de conexão com a terra. Ressalta-se que o percentual de curtos-circuitos trifásico em um sistema de distribuição real é muito pequeno (DECANINI; MINUSSI, 2008).

A interpretação da Tabela 7.5.1 segue o seguinte padrão. Tomando-se, como exemplo a linha destacada com fundo cinza:

- se d_1 é NP e d_2 é PP e d_3 é NP e d_4 é 1 e d_5 é 1, então, a falta é um curto circuito entre as fases a , b e a terra (g).

7.6. Conclusão

Neste capítulo, foram apresentadas as ferramentas para implementação da metodologia proposta, tais como: programas computacionais e sistema de distribuição utilizado, especificação dos parâmetros empregados para simulações e a Concepção do Módulo Classificador. Desta forma, terminado o processo de especificação e adequação de parâmetros, o Módulo Classificador poderá realizar o diagnóstico de faltas. A descrição de como realizar este será apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 8

Resultados e Conclusões da Metodologia Proposta

8.1. Introdução

A seguir, serão apresentados, de forma detalhada, os resultados obtidos pelo “Módulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância” e as discussões para a compreensão do processo de diagnóstico de faltas.

8.2. Módulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância

Os resultados obtidos, para o sistema com carregamentos 60%, 80% e 100%, para o curto-circuito de alta e baixa impedância estão expostos nas Tabelas 8.2.1 e 8.2.3, respectivamente. Foram apresentadas as faltas de alta impedância, cujos valores de resistências usados são 50Ω e 100Ω . Para as faltas consideradas de baixa impedância, foram adotados os valores da resistência $0,1\Omega$, 2Ω e 10Ω .

Tabela 8.2.1. Percentual de acerto do “Módulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância” para faltas de alta impedância.

Tipo de Falta	Percentual de Acerto		
	Para o Carregamento do Sistema de		
	100%	80%	60%
A-g	100%	100%	100%
B-g	100%	100%	100%
C-g	100%	100%	100%
A-B-g	100%	100%	100%
B-C-g	100%	100%	100%
C-A-g	100%	100%	100%
A-B	100%	100%	100%
B-C	100%	100%	100%
C-A	100%	100%	100%
ABC-g	100%	100%	100%

Para os casos de faltas de alta impedância simulados, obteve-se um percentual de acertos da ordem de 100%. Todavia, deve-se salientar que nenhum sistema é perfeito, havendo a constante possibilidade de ocorrência de raros erros aleatórios (no que se refere quanto ao nível de impedância). Tais problemas de diagnóstico de faltas podem ocorrer, basicamente, por causa da influência conjunta de 3 fatores:

- carregamento do sistema;
- localização da faltas;
- resistência de faltas.

O ângulo de inserção de falta não possui influência sobre o diagnóstico.

Para os casos de operação normal do sistema, o índice de acertos, também, é de 100%. Isto significa, em outras palavras que o sistema de detecção e classificação de faltas é eficiente. Os resultados estão expostos na Tabela 8.2.2.

Tabela 8.2.2 Capacidade de identificação do sistema em operação normal pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”.

Estado do Sistema	Percentual de Acerto		
	Para o Carregamento do Sistema de		
	100%	80%	60%
Operação Normal	100%	100%	100%

Para as faltas de baixa impedância, utilizou-se os dados do trabalho de detecção de faltas realizado por Decanini 2008. Tal projeto proporcionou um índice de acerto de 100% para as faltas de baixa impedância, resultado este também obtido neste trabalho (ver tabela 8.2.3), com as devidas modificações pertinentes.

Tabela 8.2.3. Percentual de acerto do “Módulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância” para faltas de baixa impedância.

Tipo de Falta	Percentual de Acerto		
	Para o Carregamento do Sistema de		
	100%	80%	60%
A-g	100%	100%	100%
B-g	100%	100%	100%
C-g	100%	100%	100%
A-B-g	100%	100%	100%
B-C-g	100%	100%	100%
C-A-g	100%	100%	100%
A-B	100%	100%	100%
B-C	100%	100%	100%
C-A	100%	100%	100%
A-B-C-g	100%	100%	100%

Conclui-se, por conseguinte, que o módulo “detector de faltas” apresenta-se um índice de acertos pleno. Com relação à “classificação das faltas”, pode haver alguns casos com incorreção, principalmente, nos casos de alta impedância e baixo carregamento de carga. Contudo, como já mencionado, o desempenho da metodologia proposta pode ser ainda mais aprimorado buscando-se uma melhor sintonia das funções de pertinência / conjunto de regras do sistema *fuzzy*.

8.3. Conclusão

Apresentou-se, neste capítulo, os diagnósticos de faltas obtidos através da metodologia proposta neste trabalho. O Módulo classificador mostrou uma grande eficiência quanto aos resultados, como mostra as Tabelas 8.2.1, 8.2.2 e 8.2.3.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e encorajadores, principalmente, no que se refere aos de alta impedância. Tais casos de falta são de difícil detecção, por apresentarem pequenas variações nos valores de correntes. A tabela 8.2.1 indica o alto índice de acertos para os casos de alta impedância – resultados de 100% –, o que aponta o satisfatório funcionamento do “Módulo Classificador com Distinção de Níveis de Impedância”.

Capítulo 9

Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

9.1. Conclusão

Com a metodologia apresentada neste trabalho, notam-se as grandes possibilidades de aplicação à detecção e classificação de faltas de alta impedância, desenvolvido neste trabalho, agregando-a. A partir das correntes coletadas em cada uma das três fases de um sistema elétrico, torna-se plausível a manipulação de tais dados e a posterior inferência quanto aos resultados.

Ressalta-se, também, a importância da utilização de um algoritmo baseado em lógica *fuzzy*: tal ferramenta permitiu uma completa análise dos dados de corrente, propiciando a apresentação de resultados quanto ao diagnóstico de faltas, em especial, as faltas de alta impedância, que são de difícil detecção.

Esse processo de automação mostrou-se satisfatório. Todos os resultados foram condizentes com os corretos, havendo, a possibilidades de ocorrer erros aleatórios relacionados às mudanças de carregamento do sistema, de resistência de falta e de localização da mesma. Além de tal robustez quanto aos resultados de diagnóstico, observa-se a rapidez com que atuou o sistema, apresentando resultados em tempos na casa de centésimos de segundos.

9.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando-se os resultados aqui obtidos e discutidos, sugerem-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- inclusão de melhorias na base de regras, através do aumento do conjunto de funções *fuzzy*, visando aumentar a qualidade das soluções (detecção e classificação de faltas);
- inclusão de um módulo neural baseado nas arquiteturas da família ART para realizar a extração do conhecimento;
- aplicação desta metodologia em outras subestações de distribuição de energia elétrica;
- estudo de caso usando-se dados reais obtidos juntos aos elementos monitorados (alimentadores, etc.).

Referências

ACKERMAN, W. J. Substation automation and the EMS. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE, 20., 1999, New Orleans. **IEEE Proceedings...** New Orleans: IEEE, 1999. p. 274 – 279.

AL-JUFOUT, S. A. Online condition-monitoring of electrical power system imbalance. **International Journal of Energy Technology And Policy**, [S. l.], v. 5., n. 6, p. 684-691. 2007.

ALMEIDA, M. A. D. **Apostila de proteção de sistemas elétricos**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2000. 121 p.

BARROS, A. C. et al. Sistema fuzzy para detecção e classificação de faltas de alta impedância em subestações de sistema de distribuição. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ANÁLISE, 68., 2008, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: Edição Própria, 2008. p. 12 p..

BEZDEK, J. C. Fuzzy Models – what are they, and why? **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, New York, v. 1, n. 2, p. 1-6, fev. 1993.

BOYER, S. A. **SCADA: supervisory control and data acquisition**. 2.ed. Durham: ISA - The Instrumentation, Systems, And Automation Society, 2004. 215 p.

CRISTO, H. P. **Programação em linguagem FORTRAN: guia básico em linguagem FORTRAN 4.0**. Belo Horizonte: Edição Própria, 2003. 44 p.

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, 17., 2008, Juiz de Fora. **Anais ...** Juiz de Fora: Sociedade Brasileira de Automática, 2008. p.6.

DECANINI, J. G. M. S. **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição usando lógica nebulosa**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

ELETROBRÁS. **Proteção de sistemas aéreos de distribuição**. Rio de Janeiro: Campus-Eletróbrás, 1982. 233p.

FAN, J.; BORLASE, S. The evolution of distribution. **IEEE Power And Energy Magazine**, New York, v. 7, n. 2, p.63-68, Mar./Apr. 2009.

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

KARTALOPOULOS, S. V. **Understanding neural networks and fuzzy logic : basic concepts and applications**. New York: IEEE Press Understanding Science & Technology Series, 1995. 232 p.

LITTLER, T. B. ; MORROW, D. J. Wavelets for the analysis and compression of power system disturbances. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.14, n.2, p.358-364. 1999.

LOPES, M. L. M. **Previsão de cargas elétricas de energia elétrica**. 2005. 169 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MAHANTY, R. N.; GUPTA, P. B. D. A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only. **Electric power systems research**, Lausene, v. 77, n. 5-6, p. 501-507. abr. 2007.

McDONALD, J. D. **Electric power substations engineering**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. 250 p.

MCGRANAGHAN, M. Development and demonstration of advanced monitoring systems for fault location, analysis, and prediction. In: FY06 ANNUAL PROGRAM AND PEER REVIEW MEETING, 6., 2006, San Ramon. **Electric Distribution**. San Ramon: Epr Solutions, 2006. 18 p.

MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. **Proceedings of the IEEE**, New York, v.83, n.3, p. 345-377. 2009.

MENEGÁZ, P. J. M. **Subestações elétricas**. Vitória: Edição Própria, 2006. Disponível em: <<http://www.pmellovix.xpg.com.br>>. Acesso em: 19 nov. 2008.

MEYER, W. S.; LIU, T. H. **Alternative transients program (ATP): rule book**. Canadá: European EMTP-ATP Users Group, 2000. 850 p.

MINUSSI, C. R. **Desenvolvimento de um sistema especialista para a automação e apoio à tomada de decisão em ambiente de subestações de sistemas de distribuição de energia elétrica**: relatório técnico científico. Ilha Solteira: Projeto ANEEL/Grupo Rede/FEPISA-UNESP, 2007. 32p.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Massachusetts: The MIT Press, 1996. 209 p.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos**. 8.ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2008. 680 p.

PADILHA, A. P.; MANTOVANI, J. R. S. **Apostila de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia, 2005. 186 p.

PEXTRON - TECNOLOGIA EM PROTEÇÃO ELÉTRICA E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. RELÉ DE PROTEÇÃO DIGITAL. **Informações técnicas de produtos de proteção de sistemas de energia elétrica**. Indianópolis: PEXTRON, 2005. Disponível em: <www.pextron.com.br>. Acesso em: 20 jun. 2008.

PINHEIRO, H. B. **Sistema especialista para operação de subestações de energia elétrica**. 1995. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

SILVA, M. R.; CARVALHO, J. C. **Barramentos de SE's**. Curitiba: Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, 2002. 87 p.

SILVA, M. S. **Modelagem das funções de uma subestação automatizada empregando modelos orientados a objeto.** 2002. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SINTEF ENERGY RESEARCH. **ATPDraw version 3.5:** user's manual. Trondheim: European EMTP-ATP Users Group, 2002. 247 p.

WAKILEH, J. J.; PAHWA, A. Optimization of distribution system design to accommodate old load pickup. **Power Engineering Review, IEEE**, New York, v. 17, n. 1, p.57-58, jan. 1997.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets:** information and control. Berkeley: Elsevier , 1965. v.3, p. 239-354.

Apêndice A

Característica do Estado do Sistema

Tabela A.1. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 60% do carregamento – Barra A.

Tipo de Falta	Ang.(⁰) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Barra A				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,3112	0,2143	-0,5256	1	1
		100	0,1832	0,1496	-0,3328	1	1
B-g	0	50	-0,5259	0,3114	0,2145	1	1
		100	-0,3336	0,1836	0,1500	1	1
C-g	0	50	0,2144	-0,5256	0,3113	1	1
		100	0,1496	-0,3328	0,1832	1	1
A-B-g	0	50	-0,3117	0,5257	-0,2140	1	1
		100	-0,1841	0,3332	-0,1491	1	1
A-C-g	0	50	0,5256	-0,2144	-0,3112	1	1
		100	0,3328	-0,1496	-0,1832	1	1
B-C-g	0	50	-0,2148	-0,3110	0,5258	1	1
		100	-0,1505	-0,1827	0,3333	1	1
ABC(g)	0	50	-0,0007	0,0003	0,0004	0	1
		100	-0,0012	0,0006	0,0006	0	1
A-B	0	50	-0,4968	0,6639	-0,1672	0	1
		100	-0,3413	0,4521	-0,1108	0	1
A-C	0	50	0,6640	-0,1672	-0,4968	0	1
		100	0,4522	-0,1108	-0,3414	0	1
B-C	0	50	-0,1455	-0,5295	0,6750	0	1
		100	-0,1094	-0,3436	0,4531	0	1

Tabela A.2. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 60% do carregamento – Fim do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,2347	0,1796	-0,4143	1	1
		100	0,1406	0,1208	-0,2613	1	1
B-g	0	50	-0,4140	0,2345	0,1795	1	1
		100	-0,2612	0,1404	0,1208	1	1
C-g	0	50	0,1795	-0,4139	0,2344	1	1
		100	0,1207	-0,2611	0,1404	1	1
A-B-g	0	50	-0,2343	0,4141	-0,1798	1	1
		100	-0,1403	0,2612	-0,1209	1	1
A-C-g	0	50	0,4141	-0,1791	-0,2350	1	1
		100	0,2612	-0,1205	-0,1407	1	1
B-C-g	0	50	-0,1796	-0,2344	0,4140	1	1
		100	-0,1208	-0,1403	0,2611	1	1
ABC(g)	0	50	0,0001	0,0005	-0,0006	0	1
		100	0,0000	0,0003	-0,0003	0	1
A-B	0	50	-0,3021	0,5055	-0,2034	0	1
		100	-0,2143	0,3462	-0,1319	0	1
A-C	0	50	0,5059	-0,2026	-0,3032	0	1
		100	0,3464	-0,1316	-0,2148	0	1
B-C	0	50	-0,2032	-0,3024	0,5056	0	1
		100	-0,1318	-0,2144	0,3462	0	1

Tabela A. 3. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 60% do carregamento – Meio do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,2543	0,1896	-0,4439	1	1
		100	0,1493	0,1270	-0,2763	1	1
B-g	0	50	-0,4438	0,2542	0,1896	1	1
		100	-0,2761	0,1491	0,1270	1	1
C-g	0	50	0,1896	-0,4440	0,2543	1	1
		100	0,1269	-0,2761	0,1492	1	1
A-B-g	0	50	-0,2542	0,4438	-0,1897	1	1
		100	-0,1491	0,2762	-0,1271	1	1
A-C-g	0	50	0,4439	-0,1897	-0,2542	1	1
		100	0,2762	-0,1268	-0,1494	1	1
B-C-g	0	50	-0,1895	-0,2544	0,4439	1	1
		100	-0,1269	-0,1492	0,2761	1	1
ABC(g)	0	50	0,0002	-0,0002	0,0000	0	1
		100	0,0001	0,0001	-0,0002	0	1
A-B	0	50	-0,3688	0,5594	-0,1906	0	1
		100	-0,2494	0,3740	-0,1246	0	1
A-C	0	50	0,5596	-0,1904	-0,3692	0	1
		100	0,3743	-0,1246	-0,2497	0	1
B-C	0	50	-0,1905	-0,3689	0,5594	0	1
		100	-0,1249	-0,2492	0,3741	0	1

Tabela A. 4. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 80% do carregamento – Fim do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1779	0,1462	-0,3241	1	1
		100	0,1035	0,0928	-0,1962	1	1
B-g	0	50	-0,3240	0,1779	0,1461	1	1
		100	-0,1961	0,1035	0,0926	1	1
C-g	0	50	0,1463	-0,3242	0,1778	1	1
		100	0,0929	-0,1963	0,1034	1	1
A-B-g	0	50	-0,1778	0,3241	-0,1463	1	1
		100	-0,1034	0,1962	-0,0928	1	1
A-C-g	0	50	0,3242	-0,1463	-0,1779	1	1
		100	0,1963	-0,0928	-0,1034	1	1
B-C-g	0	50	-0,1461	-0,1780	0,3241	1	1
		100	-0,0926	-0,1035	0,1961	1	1
ABC(g)	0	50	0,0002	-0,0001	0,0000	0	1
		100	0,0002	-0,0001	0,0000	0	1
A-B	0	50	-0,2293	0,4041	-0,1748	0	1
		100	-0,1583	0,2645	-0,1062	0	1
A-C	0	50	0,4046	-0,1742	-0,2304	0	1
		100	0,2647	-0,1058	-0,1590	0	1
B-C	0	50	-0,1749	-0,2292	0,4041	0	1
		100	-0,1061	-0,1583	0,2644	0	1

Tabela A. 5. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 80% do carregamento – Início do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,2305	0,1773	-0,4078	1	1
		100	0,1308	0,1137	-0,2445	1	1
B-g	0	50	-0,4078	0,2305	0,1773	1	1
		100	-0,2444	0,1308	0,1136	1	1
C-g	0	50	0,1774	-0,4079	0,2304	1	1
		100	0,1137	-0,2442	0,1306	1	1
A-B-g	0	50	-0,2305	0,4078	-0,1773	1	1
		100	-0,1307	0,2445	-0,1137	1	1
A-C-g	0	50	0,4079	-0,1775	-0,2304	1	1
		100	0,2444	-0,1134	-0,1310	1	1
B-C-g	0	50	-0,1773	-0,2305	0,4078	1	1
		100	-0,1137	-0,1305	0,2443	1	1
ABC(g)	0	50	0,0000	-0,0001	0,0001	0	1
		100	-0,0001	0,0003	-0,0002	0	1
A-B	0	50	-0,3812	0,5337	-0,1525	0	1
		100	-0,2470	0,3398	-0,0928	0	1
A-C	0	50	0,5339	-0,1525	-0,3813	0	1
		100	0,3399	-0,0927	-0,2472	0	1
B-C	0	50	-0,1525	-0,3813	0,5338	0	1
		100	-0,0927	-0,2470	0,3397	0	1

Tabela A. 6. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 80% do carregamento – Meio do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1963	0,1578	-0,3541	1	1
		100	0,1115	0,0990	-0,2105	1	1
B-g	0	50	-0,3538	0,1962	0,1576	1	1
		100	-0,2106	0,1116	0,0990	1	1
C-g	0	50	0,1577	-0,3537	0,1960	1	1
		100	0,0992	-0,2106	0,1114	1	1
A-B-g	0	50	-0,1960	0,3539	-0,1580	1	1
		100	-0,1116	0,2106	-0,0990	1	1
A-C-g	0	50	0,3539	0,3539	-0,1965	1	1
		100	0,2106	-0,0992	-0,1114	1	1
B-C-g	0	50	-0,1577	-0,1960	0,3537	1	1
		100	-0,0990	-0,1115	0,2105	1	1
ABC(g)	0	50	0,0002	0,0003	-0,0004	0	1
		100	0,0000	-0,0001	0,0001	0	1
A-B	0	50	-0,2930	0,4584	-0,1654	0	1
		100	-0,1902	0,2908	-0,1006	0	1
A-C	0	50	0,4588	-0,1650	-0,2938	0	1
		100	0,2911	-0,1005	-0,1906	0	1
B-C	0	50	-0,1656	-0,2928	0,4584	0	1
		100	-0,1007	-0,1900	0,2907	0	1

Tabela A.7. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Barra 4.

Tipo de Falta	Ang.(⁰) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Barra 4				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1690	0,1406	0-,3096	1	1
		100	0,0937	0,0851	-0,1788	1	1
B-g	0	50	-0,3095	0,1691	0,1404	1	1
		100	-0,1785	0,0937	0,0848	1	1
C-g	0	50	0,1404	-0,3095	0,1690	1	1
		100	0,0850	-0,1788	0,0938	1	1
A-B-g	0	50	-0,1690	0,3096	-0,1405	1	1
		100	-0,0935	0,1787	-0,0852	1	1
A-C-g	0	50	0,3095	-0,1404	-0,1691	1	1
		100	0,1788	-0,0850	-0,0938	1	1
B-C-g	0	50	-0,1404	-0,1690	0,3095	1	1
		100	-0,0847	-0,0940	0,1786	1	1
ABC(g)	0	50	0,0001	0,0000	-0,0001	0	1
		100	0,0004	-0,0002	-0,0002	0	1
A-B	0	50	-0,2720	0,4125	-0,1405	0	1
		100	-0,1695	0,2514	-0,0819	0	1
A-C	0	50	0,4128	-0,1402	-0,2726	0	1
		100	0,2514	-0,0814	-0,1700	0	1
B-C	0	50	-0,1404	-0,2720	0,4124	0	1
		100	-0,0819	-0,1694	0,2512	0	1

Tabela A.8. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Barra 11.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Barra 11				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1443	0,1236	-0,2680	1	1
		100	0,0816	0,0751	-0,1566	1	1
B-g	0	50	-0,2675	0,1442	0,1233	1	1
		100	-0,1564	0,0816	0,0748	1	1
C-g	0	50	0,1234	-0,2676	0,1442	1	1
		100	0,0748	-0,1563	0,0815	1	1
A-B-g	0	50	-0,1439	0,2678	-0,1239	1	1
		100	-0,0814	0,1565	-0,0752	1	1
A-C-g	0	50	0,2677	-0,1231	-0,1446	1	1
		100	0,1564	-0,0747	-0,0818	1	1
B-C-g	0	50	-0,1233	-0,1443	0,2675	1	1
		100	-0,0748	-0,0815	0,1563	1	1
ABC(g)	0	50	0,0004	0,0002	-0,0006	0	1
		100	0,0002	0,0002	-0,0003	0	1
A-B	0	50	-0,1937	0,3437	-0,1500	0	1
		100	-0,1278	0,2151	-0,0873	0	1
A-C	0	50	0,3443	-0,1493	-0,1950	0	1
		100	0,2153	-0,0870	-0,1283	0	1
B-C	0	50	-0,1499	-0,1936	0,3436	0	1
		100	-0,0872	-0,1278	0,2149	0	1

Tabela A.9. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Fim do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1404	0,1208	-0,2612	1	1
		100	0,0801	0,0738	-0,1539	1	1
B-g	0	50	-0,2607	0,1403	0,1205	1	1
		100	-0,1536	0,0801	0,0735	1	1
C-g	0	50	0,1205	-0,2607	0,1402	1	1
		100	0,0736	-0,1536	0,0800	1	1
A-B-g	0	50	-0,1399	0,2610	-0,1211	1	1
		100	-0,0799	0,1538	-0,0739	1	1
A-C-g	0	50	0,2609	-0,1202	-0,1407	1	1
		100	0,1537	-0,0734	-0,0803	1	1
B-C-g	0	50	-0,1205	-0,1402	0,2607	1	1
		100	-0,0736	-0,0800	0,1536	1	1
ABC(g)	0	50	0,0003	0,0003	-0,0007	0	1
		100	0,0001	0,0002	-0,0004	0	1
A-B	0	50	-0,1779	0,3295	-0,1516	0	1
		100	-0,1207	0,2093	-0,0885	0	1
A-C	0	50	0,3301	-0,1506	-0,1795	0	1
		100	0,2095	-0,0882	-0,1213	0	1
B-C	0	50	-0,1517	-0,1777	0,3294	0	1
		100	-0,0882	-0,1208	0,2090	0	1

Tabela A.10. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Início do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(⁰) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1922	0,1554	-0,3475	1	1
		100	0,1066	0,0954	-0,2020	1	1
B-g	0	50	-0,3474	0,1922	0,1552	1	1
		100	-0,2021	0,1068	0,0953	1	1
C-g	0	50	0,1552	-0,3472	0,1921	1	1
		100	0,0953	-0,2021	0,1067	1	1
A-B-g	0	50	-0,1921	0,3475	-0,1554	1	1
		100	-0,1068	0,2021	-0,0953	1	1
A-C-g	0	50	0,3474	-0,1550	-0,1924	1	1
		100	0,2020	-0,0954	-0,1066	1	1
B-C-g	0	50	-0,1553	-0,1920	0,3473	1	1
		100	-0,0953	-0,1068	0,2020	1	1
ABC(g)	0	50	0,0001	0,0002	-0,0003	0	1
		100	0,0000	-0,0001	0,0001	0	1
A-B	0	50	-0,3308	0,4642	-0,1333	0	1
		100	-0,2078	0,2846	-0,0768	0	1
A-C	0	50	0,4642	-0,1333	-0,3310	0	1
		100	0,2847	-0,0768	-0,2079	0	1
B-C	0	50	-0,1332	-0,3310	0,4642	0	1
		100	-0,0770	-0,2076	0,2845	0	1

Tabela A.11. Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de faltas para 100% do carregamento – Meio do alimentador.

Tipo de Falta	Ang.(^o) (Ref.V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-g	0	50	0,1570	0,1325	-0,2895	1	1
		100	0,0875	0,0800	-0,1674	1	1
B-g	0	50	-0,2893	0,1570	0,1323	1	1
		100	-0,1672	0,0875	0,0797	1	1
C-g	0	50	0,1324	-0,2895	0,1571	1	1
		100	0,0798	-0,1673	0,0875	1	1
A-B-g	0	50	-0,1569	0,2895	-0,1326	1	1
		100	-0,0873	0,1674	-0,0801	1	1
A-C-g	0	50	0,2895	-0,1324	-0,1571	1	1
		100	0,1674	-0,0798	-0,0876	1	1
B-C-g	0	50	-0,1322	-0,1572	0,2894	1	1
		100	-0,0797	-0,0876	0,1672	1	1
ABC(g)	0	50	0,0003	-0,0002	-0,0001	0	1
		100	0,0003	-0,0001	-0,0002	0	1
A-B	0	50	-0,2375	0,3822	-0,1447	0	1
		100	-0,1497	0,2339	-0,0842	0	1
A-C	0	50	0,3825	-0,1441	-0,2384	0	1
		100	0,2341	-0,0840	-0,1501	0	1
B-C	0	50	-0,1449	-0,2372	0,3821	0	1
		100	-0,0843	-0,1495	0,2338	0	1