

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Detecção e Classificação de Falhas de Curto-Circuito em
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Lógica
Nebulosa”**

JOSÉ GUILHERME M. S. DECANINI

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
março/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

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

D291d	<p>Decanini, José Guilherme Magalini Santos</p> <p>Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa / José Guilherme Magalini Santos Decanini. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008 110 f. : il. (algumas color.)</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2008</p> <p>Orientador: Carlos Roberto Minussi Bibliografia: p. 76-79</p> <p>1. Detecção e classificação de faltas. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Inteligência artificial.</p>
-------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus familiares.

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que me apoiaram e incentivaram durante a realização deste trabalho, em especial, meus familiares: minha mãe, meu pai, meu irmão, meus tios e tias, meus primos e primas. Agradeço aos meus amigos que estiveram comigo durante toda esta trajetória. Agradeço profundamente ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi, pelo correto direcionamento no trabalho, e acima de tudo, pelos ensinamentos concedidos sobre como posicionar e reagir diante das dificuldades inerentes a trajetória do mestrado, e de fundamental importância no aprimoramento de uma postura correta para a minha vida profissional futura. Agradeço também a Capes e as empresas do Grupo Rede pelo apoio financeiro recebido. Agradeço a Deus, que me concedeu perseverança para a realização deste objetivo.

Resumo

As empresas distribuidoras de energia elétrica têm investido maciçamente na modernização de suas estruturas, em especial, na automação de suas operações. Sistemas automatizados aceleram o processo de restabelecimento das condições normais de operação e propiciam maiores lucros, confiabilidade ao sistema e segurança à população. O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia, robusta e rápida, para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica, baseada nos conceitos da lógica *fuzzy*. Desenvolveram-se algoritmos inteligentes para a realização do diagnóstico do estado do sistema. Estes auxiliam a tomada de decisão no ambiente de subestações de distribuição de energia elétrica. Os dados representativos do comportamento do sistema sob as diversas condições de falta foram obtidos através de simulações de um alimentador radial no *software* ATP. Os resultados obtidos foram satisfatórios e demonstraram a robustez e rapidez da metodologia proposta.

Palavras-chave: Detecção de Falta, Classificação de Falta, Automação de Subestações, Sistemas de Distribuição, Lógica Nebulosa.

Abstract

The electrical power distribution utilities have been invested massively in the modernization of its structures, especially, in automation its operations. Automated systems accelerate the process of restoration regular operation and provide greater profits, increase the system reliability and population security. The objective of this research is the development of a methodology, robust and fast, for short circuit detection and classification in distribution systems, based on fuzzy logic concepts. Intelligent algorithms have been developed to diagnose the system state. These assist decision-making in distribution substations environment. The representative data of system behavior under various conditions of fault were obtained through radial feeder simulations in the software ATP. The results were satisfactory, and demonstrated the robustness and speed of the methodology proposed.

Keywords: Fault Detection, Fault Classification, Substations Automation, Distribution Systems, Fuzzy Logic.

Lista de Ilustrações

1	Barramento simples	25
2	Duplo barramento simples	26
3	Barramento simples seccionado	27
4	Barramento principal e barramento de transferência	28
5	Barramento duplo com um disjuntor	29
6	Barramento duplo com disjuntor duplo	30
7	Barramento de disjuntor e meio	31
8	Barramento em anel	31
9	Diagrama de blocos de um relé digital	38
10	Função de pertinência triangular	41
11	Função de pertinência trapezoidal	42
12	Conjunto “crisp” jovem	42
13	Conjunto nebuloso jovem	42
14	Sistema nebuloso com nebulizador e desnebulizador	43
15	Diagrama de blocos simplificado da metodologia proposta	47
16	Forma de onda senoidal discretizada com uma taxa de amostragem m	50
17	Correntes trifásicas para o sistema em operação normal	53
18	Correntes trifásicas para curto-circuito trifásico	53
19	Representação do comportamento dos índices d_1, d_2 e d_3 para o sistema em operação normal e em curto circuito trifásico	54
20	Correntes trifásicas para curto-circuito <i>fase a – terra</i> de baixa impedância	54

21	Representação do comportamento dos índices d_1, d_2 e d_3 para o sistema em curto-circuito <i>fase a – terra</i> de baixa impedância	55
22	Correntes trifásicas para curto-circuito <i>fase a – terra</i> de alta impedância	55
23	Representação do comportamento dos índices d_1, d_2 e d_3 para o sistema em curto-circuito <i>fase a – terra</i> de alta impedância	56
24	Conjuntos nebulosos destacados	57
25	Diagrama unifilar do alimentador simulado	59
26	Conjuntos nebulosos para o módulo sem distinção de níveis de impedância	61
27	Conjuntos nebulosos para o módulo com distinção de níveis de impedância	63
28	Implementação do sistema de distribuição simulado	80

Lista de Tabelas

1	Características das tecnologias digital e convencional	37
2	Dados do alimentador simulado	60
3	Ilustração do comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 no “MCSDNI”	62
4	Ilustração do comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 no “MCCDNI”	64
5	Percentual de acerto dos “Módulos Classificadores”	67
6	Capacidade de identificação do sistema em operação normal pelo “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”	68
7	Percentual de acerto do “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”	68
8	Capacidade de identificação do sistema em operação normal pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”	70
9	Percentual de acerto do “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”	71
10	Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de falta	81

Lista de Abreviaturas

IED	=	Intelligent Electronic Design
RTU	=	Remote Terminal Unit
SCADA	=	Supervisory Control And Data Acquisition
ATP/EMTP	=	Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program
ART	=	Adaptive Resonance Theory
UHV	=	Ultra-Alta Tensão
DIC	=	Duração de Interrupção Individual
FIC	=	Frequência de Interrupção Individual
DMIC	=	Duração Máxima de Interrupção Contínua
CPU	=	Unidade Central de Processamento
BMI	=	Basic Measuring Instrument
<i>NG</i>	=	Negativo Grande
<i>NP</i>	=	Negativo Pequeno
<i>NZ</i>	=	Negativo Zero
<i>PZ</i>	=	Positivo Zero
<i>PP</i>	=	Positivo Pequeno
<i>PG</i>	=	Positivo Grande
MCSDNI	=	Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância
MCCDNI	=	Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância

Lista de Símbolos

x	=	Variável de entrada
y	=	Variável de saída
A e B	=	Termos lingüísticos associados aos conjuntos nebulosos
$\mu_A(x)$	=	Valor da função de pertinência do conjunto nebuloso A correspondente ao elemento x
Ω	=	Universo de discurso
I_a, I_b e I_c	=	Corrente elétrica das fases a, b e c , respectivamente
σ	=	Parâmetro similar à corrente de seqüência zero
$\sigma_{máx}$	=	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)
$X_{referencial}$	=	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
$\Delta I_{máx}$	=	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 à terra
Z_f	=	Impedância de falta definida por categoria de valores (baixa ou alta)

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	16
1.3	Proposta	17
1.4	Justificativa	17
1.5	Estrutura do texto	18
2	Estado da Arte	20
2.1	Introdução	20
2.2	Conclusão	22
3	Subestações de Energia Elétrica	23
3.1	Introdução	23
3.2	Configurações das Subestações	24
3.2.1	Barramento Simples	25
3.2.2	Duplo Barramento Simples	26
3.2.3	Barramento Simples Seccionado	27
3.2.4	Barramento Principal e de Transferência	28
3.2.5	Barramento Duplo com Um Disjuntor	29
3.2.6	Barramento Duplo com Disjuntor Duplo	29
3.2.7	Barramento de Disjuntor e Meio	30
3.2.8	Barramento em Anel	31
3.3	Conclusão	32

4	Proteção de Sistemas Elétricos	33
4.1	Introdução	33
4.2	Dispositivos de Controle e Proteção	34
4.2.1	Elos Fusíveis	35
4.2.2	Religadores Automáticos	35
4.2.3	Seccionalizadores Automáticos	36
4.2.4	Disjuntores Equipados com Relés	36
4.2.5	Relés Digitais	37
4.3	Conclusão	39
5	Lógica Nebulosa	40
5.1	Introdução	40
5.2	Funções de Pertinência	41
5.3	Sistemas Nebulosos	43
5.4	Conclusão	44
6	Metodologia Proposta	45
6.1	Introdução	45
6.2	Visão Geral	46
6.3	Extração de Características do Estado do Sistema	46
6.3.1	Sumário	52
6.3.2	Análise Comportamental dos Índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5	52
6.4	Classificação do Estado do Sistema	56
6.5	Conclusão	57
7	Implementação da Metodologia Proposta	58
7.1	Introdução	58
7.2	Programas Computacionais Empregados	59
7.3	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	59
7.4	Parâmetros Para Simulações no <i>Software</i> ATP	60

7.5	Concepção dos Módulos Classificadores	61
7.6	Conclusão	65
8	Resultados Obtidos e Discussões.....	66
8.1	Introdução	66
8.2	Resultados Gerais	66
8.3	Resultados Detalhados	67
8.3.1	Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância	67
8.3.1.1	Influência da Resistência de Falta	68
8.3.1.2	Influência da Localização da Falta	69
8.3.1.3	Influência do Ângulo de Inserção de Falta	69
8.3.1.4	Influência do Carregamento do Sistema	70
8.3.2	Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância	70
8.3.2.1	Análise dos Fatores que Influenciam no Diagnóstico	72
8.4	Conclusão	72
9	Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros	74
9.1	Conclusões	74
9.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	75
	Referências	76
	Anexo A - Sistema de Distribuição Simulado no ATP	80
	Anexo B - Características dos Estados do Sistema	81

Capítulo 1.

Introdução

Atualmente, grandes investimentos têm sido aplicados para modernizar os sistemas de energia elétrica, em especial as subestações agregadas aos sistemas de distribuição, no que concerne à automação de suas operações. Neste sentido, dois segmentos podem ser destacados. O primeiro refere-se à utilização da "tecnologia digital", baseada em componentes semicondutores de alta velocidade, em sistema de comunicação, controle, proteção, entre outras funções importantes ([1, 15]). O segundo compreende a "tecnologia da informação", ou seja, um grande conjunto de procedimentos e técnicas de processamento e de análise de informações (sinais e demais dados). Dentro desta perspectiva, faz-se necessário, então, desenvolver um sistema integrado, combinando a aquisição, processamento e a análise de dados com o propósito de proporcionar a assistência necessária para realizar o controle e a tomada de decisão no ambiente de subestações de distribuição de energia elétrica.

1.1 Motivação

As tradicionais práticas de diagnóstico de defeitos são baseadas fortemente na dependência do julgamento dos operadores, levando em conta a experiência em análise e planejamento das ações corretivas ([15]). Durante a ocorrência de uma falta, sinais de alarme, recebidos em subestações automatizadas, caracterizam-se pelo *status* de abertura/fechamento dos relés e das chaves de proteção. Considerando-se a ocorrência de sinais de alarme, indicando anormalidade, os operadores devem estimar a situação do defeito (detecção, classificação e localização) com a máxima rapidez. Esta tarefa é de difícil solução. Se os procedimentos forem tomados baseados somente nos operadores humanos, torna-se quase impossível realizar a automação de forma eficiente. Neste sentido, as metodologias baseadas na inteligência artificial (sistemas especialistas ([5]), redes neurais ([6, 24]), lógica nebulosa ([23, 29, 34]), etc.) são procedimentos disponíveis com objetivo de extrair o conhecimento de processos complexos, como é o caso da automação de subestações. Estas técnicas buscam combinar a experiência dos operadores humanos e a habilidade de executar rotinas de forma segura e de alta rapidez de resposta. Trata-se de mecanismos que, se postos à disposição da operação, podem produzir um grande salto qualitativo, por meio de procedimentos de diagnóstico (detecção, classificação e localização) das anormalidades e de auxílio ao planejamento de ações corretivas. Estes recursos, a princípio, oferecem grandes possibilidades de realizar a automação de subestações de forma plena e eficiente.

1.2 Objetivo

Esta dissertação visa proporcionar, através do desenvolvimento de algoritmos inteligentes modulares ([1]), uma “melhor” maneira de executar o diagnóstico (robusto e rápido) de defeitos sem necessidade dos operadores terem um conhecimento sobre as estruturas a serem usadas. Os módulos terão a capacidade de detectar e classificar faltas de curtos-circuitos, este diagnóstico fornecerá o tipo e o nível de impedância do defeito.

1.3 Proposta

Será dada ênfase ao desenvolvimento de uma metodologia baseada nos conceitos da lógica nebulosa para a detecção e classificação de defeitos. Para isso, realizar-se-ão medições dos valores das correntes na saída do alimentador da subestação simulada, das quais serão extraídas as características do estado do sistema. Desta maneira, para cada tipo e nível de impedância de curto-circuito haverá uma característica (assinatura) associada a este tipo de defeito, a qual será diagnosticada, através do uso dos conceitos da lógica nebulosa.

Evidentemente, para realizar a rotina de diagnóstico e as ações corretivas, as subestações devem ser dotadas de tecnologias em *hardware*, envolvendo, por exemplo, as instalações de IED's (*Intelligent Electronic Designs*) ([15]), instrumentos digitais, transdutores, emprego de satélite, etc. 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) ([15]). Por conseguinte, a proposta de um sistema de *software* será concebido para funcionar levando-se em conta esta permanente evolução das tecnologias das subestações. Neste sentido, na proposta sugerida, buscar-se-á a concepção de algoritmos que facilmente podem ser modificados para atender essa nova demanda, através de esquemas inteligentes modulares. Havendo necessidade de melhorar o desempenho do sistema, para atender determinada especificidade, basta substituir um ou mais módulos por outros com concepção mais eficiente.

1.4 Justificativa

No âmbito da distribuição de energia elétrica, as concessionárias devem estar preparadas para suprir o constante aumento da demanda. Esta expansão do setor leva os sistemas a operarem próximos aos seus limites. Deste modo, torna-se imprescindível o uso de ferramentas de apoio à operação, que proporcionarão ao sistema maior confiabilidade. Com base nisto, atualmente, as empresas distribuidoras de energia buscam modernizar sua estrutura, em especial, automatizar as técnicas tradicionais de diagnóstico de faltas que dependem basicamente da experiência do operador. Conseqüentemente sendo susceptíveis a erros de avaliação e a um dispêndio maior de tempo. Esta automação é essencial para a

operação de sistemas de distribuição de energia em tempo real. Sistemas rápidos e precisos aceleram o processo de restabelecimento das condições normais de operação, o que é primordial, pois o tempo decorrido entre a ocorrência da falta e o restabelecimento do sistema implica em sérios danos à empresa, *e.g.*, prejuízo, degradação da imagem da distribuidora, exposição da população a sérios riscos, etc.

Deve-se destacar também que a rede de distribuição de energia é predominantemente radial, estrutura caracterizada por apresentar custo reduzido em relação à estrutura em anel. Porém não possui flexibilidade quanto ao transporte de energia. Esta limitação enfatiza a necessidade de se ter sistemas confiáveis dotados de ferramentas eficientes para diagnosticar problemas na rede ([4, 5, 11, 14, 16]), possibilitando assim, que ações corretivas sejam executadas rapidamente, visto que, não há possibilidade de um fornecimento de energia “alternativo” para os consumidores dispostos após a falta.

A metodologia a ser proposta, para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em subestações de energia elétrica, é robusta, rápida e de alta confiabilidade o que viabiliza a sua implantação, além do que, a aquisição de dados do sistema é realizada através de medições dos valores das correntes na saída do alimentador da subestação, não necessitando, *a priori*, de grandes investimentos.

1.5 Estrutura do Texto

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica. Será apresentado todo o processo de estudo para a realização da pesquisa, destacando os principais livros e artigos usados para o devido embasamento e os resultados relevantes encontrados na literatura especializada que abordam o mesmo tema.

No Capítulo 3, serão apresentadas as configurações das subestações mais comumente utilizadas. No Capítulo 4 serão abordados, de forma sucinta, os princípios básicos de proteção e os principais dispositivos empregados na proteção de alimentadores de energia elétrica.

No Capítulo 5 serão apresentados os conceitos básicos da lógica nebulosa.

O capítulo 6 abordará a metodologia proposta para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em subestações de distribuição de energia elétrica. Em seguida, no capítulo 7 será apresentada a implementação do procedimento proposto considerando um alimentador radial.

No capítulo 8 será exposto os resultados obtidos. Finalizando, no Capítulo 9 serão apresentadas as principais conclusões e os trabalhos futuros que poderão ser realizados.

Capítulo 2.

Estado da Arte

2.1 Introdução

Inicialmente, com a finalidade de adquirir conhecimento em subestações de energia elétrica, a qual corresponde à base da pesquisa proposta, realizou-se um estudo abrangendo a estrutura e disposição das subestações atuais, as novas técnicas de integração e automação de subestações e os equipamentos empregados. Este assunto é abordado em:

- McDonald, J. D. “Electric Power Substations Engineering”, CRC Press, 2003.

Considerando em especial a integração e automação das subestações, encontram-se, na literatura especializada, diversas publicações sobre o tema em questão. Nestes artigos são abordadas metodologias distintas para diagnóstico de faltas. Estas metodologias, em geral, utilizam ferramentas de apoio à análise de sinais, *e.g.*, Transformada de Fourier de Tempo Limitado, Transformada Wavelet ([18, 28]), etc., e à classificação de faltas, *e.g.*, sistemas inteligentes (lógica nebulosa ([23, 29, 34]), redes neurais artificiais ([6, 24]), sistemas

especialistas ([5]), algoritmos genéticos ([26, 27]), etc.). Primeiramente, há de se destacar dois artigos que contemplam de forma sucinta e esclarecedora da base teórica sobre essas ferramentas comumente utilizadas na análise de distúrbios em sistemas de energia elétrica, além de explicar o porquê de utilizá-las, são eles:

- 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”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 358-364, April 1999.

Posteriormente, pesquisaram-se metodologias para extração das características (assinatura) do estado do sistema ([12, 19, 31, 33]), buscando encontrar formas robustas (baixa sensibilidade ao dinamismo dos sistemas de energia elétrica) e eficientes de diagnóstico de defeitos, em destaque para:

- 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, No. 6-7, pp. 501 – 507, April 2007.

A escassez de dados de curto-circuito, por parte das distribuidoras de energia elétrica, faz com que torne necessário simulá-los, considerando as diversas condições de falta (carregamento do sistema, localização, ângulo de inserção e resistência) encontradas em um sistema real. Para isso, utilizou-se o *software* de domínio público ATP/EMTP (*Alternative Transients Program*) ([3, 8, 20, 30]), que é largamente empregado na análise de transitórios em sistemas de energia elétrica. As instruções, para a devida manipulação do *software*, encontram-se em:

- Alternative Transients Program (ATP) RuleBook;
- Users’ Manual, ATPDRAW, version 3.5, 2002.

Para avaliar os dados pré-processados, utilizar-se-ão de sistemas inteligentes por serem ferramentas extremamente eficazes para compreensão / análise de processos complexos. Para tanto, estudaram-se, mais especificamente, redes neurais artificiais, principalmente as arquiteturas ART (*Adaptive Resonance Theory*) ([6, 24]) e lógica nebulosa ([7, 23, 29, 34]), citam-se:

- Carpenter, G. A. and Grossberg, S. “A Self-Organizing Neural Network For Supervised Learning, Recognition And Prediction”, IEEE Communications Magazine, Vol. 30, No. 9, pp. 38-49, 1992;
- Minussi, C. R. “Apostila de Redes Neurais Artificiais”;
- Zadeh, L. A. “Fuzzy sets”, Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp.338-353, 1965.
- Terano, T.; Sugeno, M. and Asai, K. “Applied fuzzy systems”, Academic Press, 1994.

Tendo contemplado o processo de estudo para a realização da pesquisa destacando os principais artigos/livros usados para o devido embasamento. Devem-se ressaltar também publicações de resultados relevantes que abordam o mesmo tema. São elas:

- Kezunovic, M. and Vasilic, S. “Fuzzy ART neural network algorithm for classifying the power system faults”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1306-1314, April 2005.
- Jota, F. G. and Jota, P. R. S. “High Impedance Fault Identification Using a Fuzzy Reasoning System”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 6, pp. 656-662, November 1998;
- Butler, K. L.; Momoh, J. A. and Sobajic, D. J. “Field Studies Using A Neural-Net-Based Approach For Fault Diagnosis in Distribution Networks”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 5, pp. 429-436, September 1997.

O trabalho de Kezunovic & Vasilic demonstra claramente a eficiência do uso de sistemas inteligentes (neuro-nebuloso) para extração de conhecimentos de processos complexos; o de Jota & Jota utiliza informações das correntes de fase e neutro, além do conhecimento do operador para que a rede neural realize o diagnóstico; e em Buttler et *al.* (1997) emprega-se a lógica nebulosa para que a resposta do alimentador à injeção de impulsos periódicos seja comparada aos padrões armazenados no banco de dados, indicando assim, a possível ocorrência de anomalias.

2.2 Conclusão

Apresentou-se, neste capítulo, o processo de estudo para realização da dissertação, foi destacado de forma sucinta os principais livros e artigos utilizados para o devido embasamento teórico.

Capítulo 3.

Subestações de Energia Elétrica

3.1 Introdução

As subestações de energia elétrica correspondem a um conjunto de equipamentos e obras civis indispensáveis para a medição, supervisão, proteção, controle e comando do sistema, regulação e transformação dos níveis de tensão.

Existem, basicamente, quatro tipos de subestações de energia elétrica, são elas:

- 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. O próximo tópico abordará, de forma clara e sucinta, as principais configurações

usualmente utilizadas, suas características e quais são os motivos expressivos que levam a fazer a escolha da configuração adequada a ser instalada nos sistemas elétricos.

3.2 Configurações das Subestações

As configurações mais utilizadas em subestações são ([17, 22]):

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

O barramento pode ser definido como sendo condutores reforçados, sólidos e de impedância desprezível, que servem como centro comuns de coleta e redistribuição de corrente. A seguir, está exposto as características básicas que determinam o tipo de configuração a ser implantado nas subestações ([17, 22]).

- Continuidade e confiabilidade de operações;
- Manutenções;
- Flexibilidade requerida em termos de facilidades de manobras;
- Custos na implantação.

Nos próximos tópicos serão abordadas as principais características das configurações usualmente utilizadas nos sistemas de energia elétrica brasileiro.

3.2.1 Barramento Simples

Nesta configuração tem-se um único barramento com todos os circuitos diretos conectados a ele. A Figura 1 representa este arranjo ([17, 22]). A confiabilidade desta configuração é baixa. Uma simples falha no barramento ocasionará a saída de todo sistema, assim como o sistema terá de ser desconectado para realização de manutenções ou ampliações no barramento. Obviamente, não recomenda-se utilizar esta configuração para cargas especiais, as quais devem ser alimentadas com alto nível de confiabilidade, *e.g.*, siderúrgicas, e sim para instalações de pequena potência, onde se admite cortes de carga. A vantagem desta configuração está no custo e na facilidade de instalação.

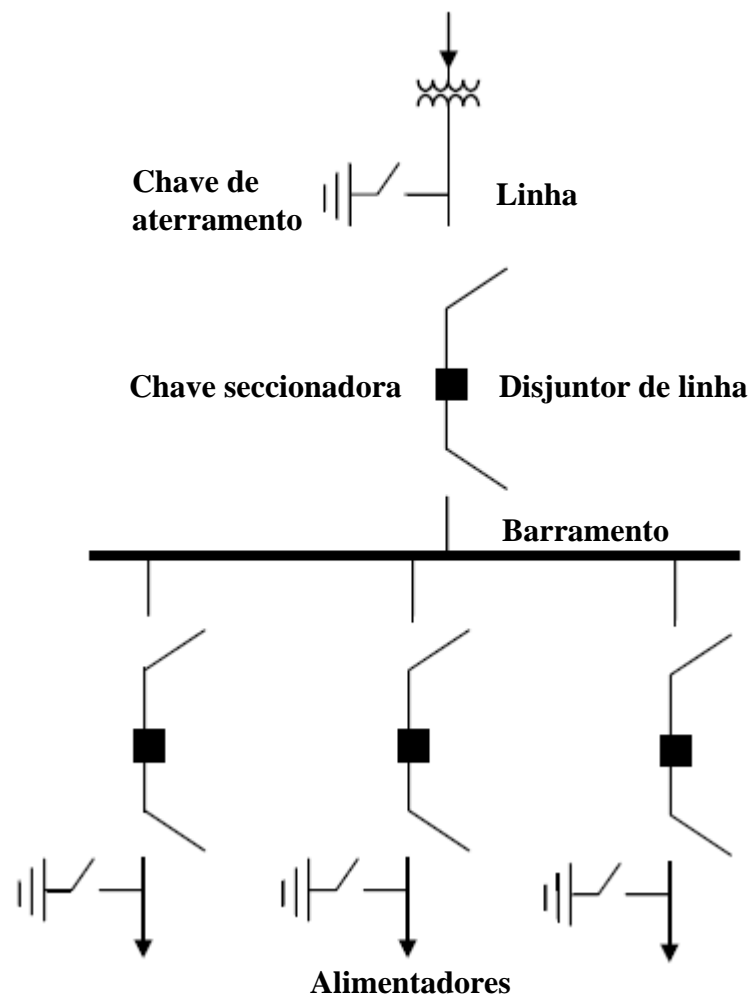


Figura 1: Barramento simples.

3.2.2 Duplo Barramento Simples

Este arranjo, Figura 2, é utilizado quando se tem instalações consumidoras com grupos de cargas prioritários e grupos de cargas não prioritários ([17]).

Como é possível visualizar na Figura 2, esta configuração é indicada para instalações consumidoras que requerem alta confiabilidade para cargas essenciais e aceitam desligamentos rotineiros das cargas não essenciais. É comumente encontrada em subestação consumidoras como hospital e hotel.

A utilização deste arranjo permite maior flexibilidade de conexão de circuitos para outra barra, retirada de disjuntores para manutenção e fácil recomposição. Sua desvantagem está no custo mais elevado.

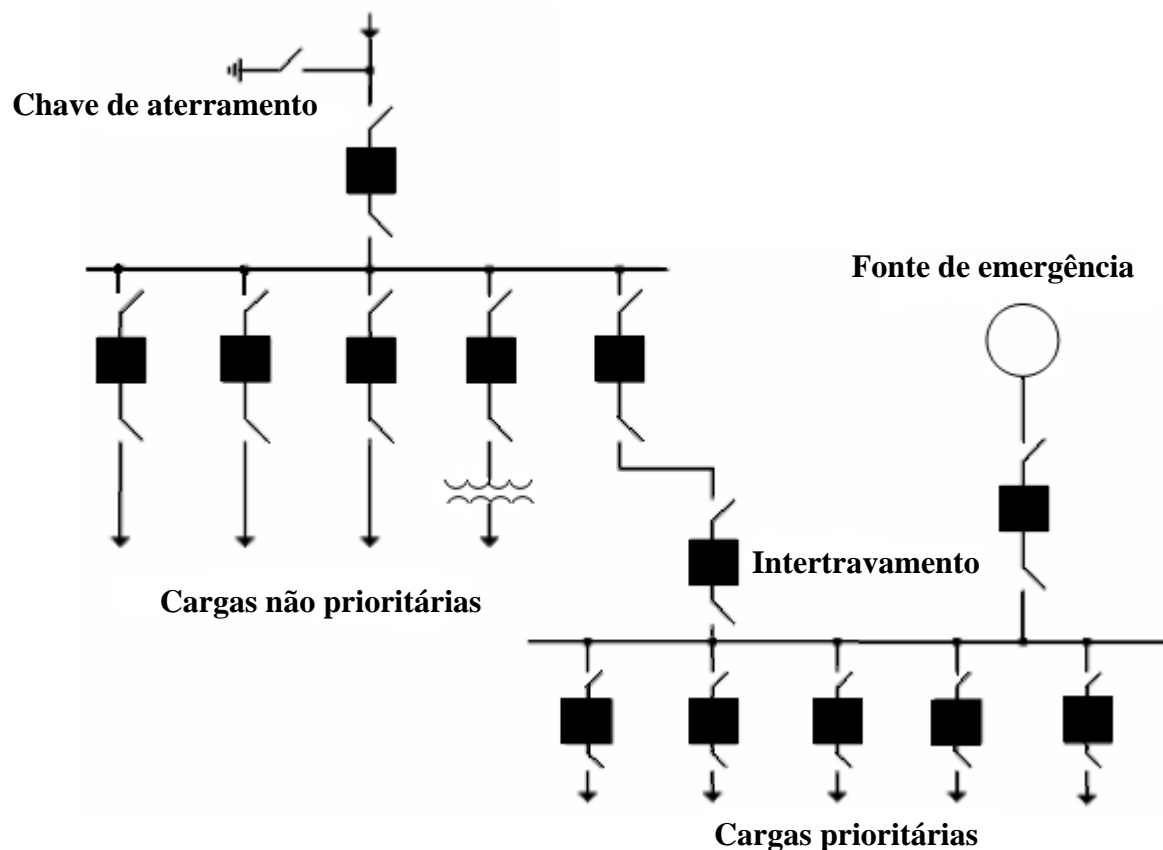


Figura 2: Duplo barramento simples.

3.2.3 Barramento Simples Seccionado

Este arranjo, Figura 3, caracteriza-se pela presença de um disjuntor de barra, o qual evita que uma falha provoque a completa paralisação do barramento, desta maneira, isolando apenas o elemento com falha da subestação ([17]).

As principais vantagens deste arranjo são: maior continuidade no fornecimento de energia, flexibilidade na manutenção, é indicado para funcionar com duas fontes de energia e, em caso de falha da barra, somente são desconectados os consumidores ligados à seção afetada. Possuem como desvantagens, a complexidade do sistema de proteção e a manutenção de um disjuntor deixa fora de serviço a linha correspondente.

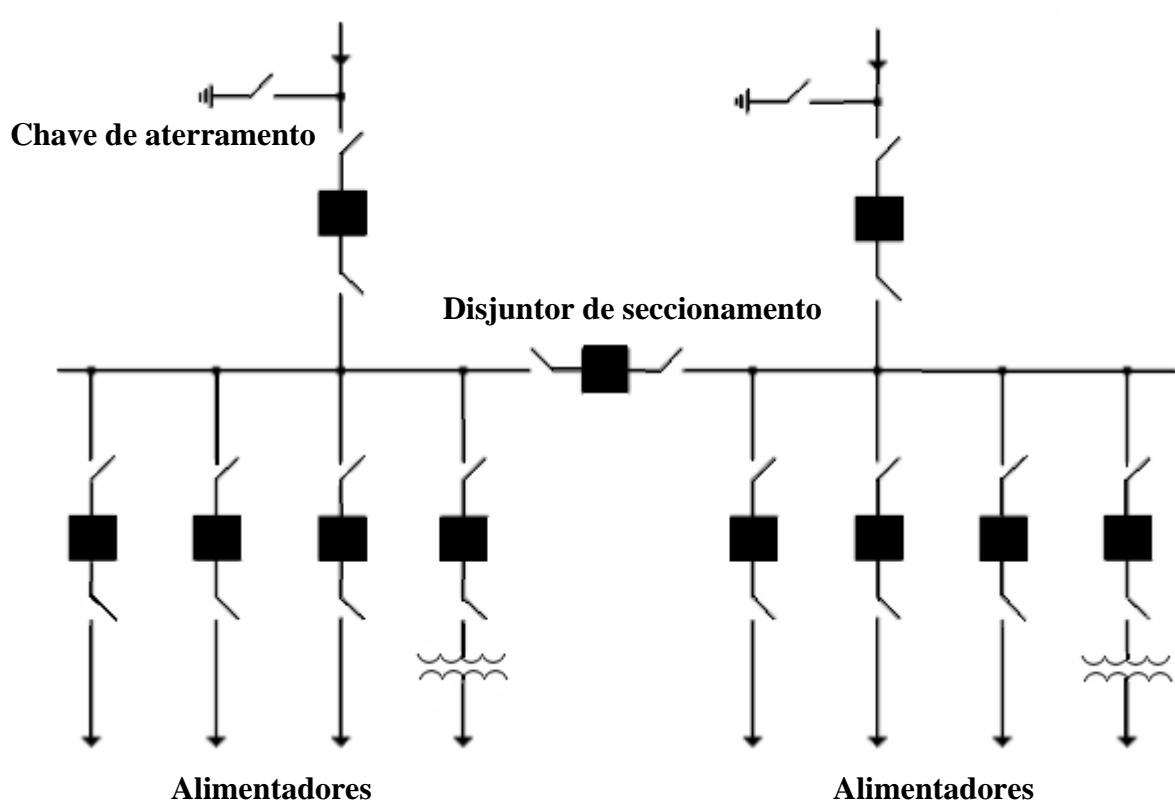


Figura 3: Barramento simples seccionado.

3.2.4 Barramento Principal e de Transferência

Neste esquema, o barramento principal é ligado ao barramento de transferência através de um disjuntor de transferência, o qual substituirá um disjuntor de linha quando este estiver desligado para fins de manutenção ([17, 22]).

Nesta configuração, Figura 4, qualquer disjuntor pode ser retirado de serviço para manutenção. A desvantagem está na necessidade de um disjuntor extra para conexão com o outro barramento. Caso ocorra uma falha no barramento principal, resultará no desligamento da subestação. Este arranjo é mais caro que o barramento único, porém provê mais flexibilidade durante a manutenção.

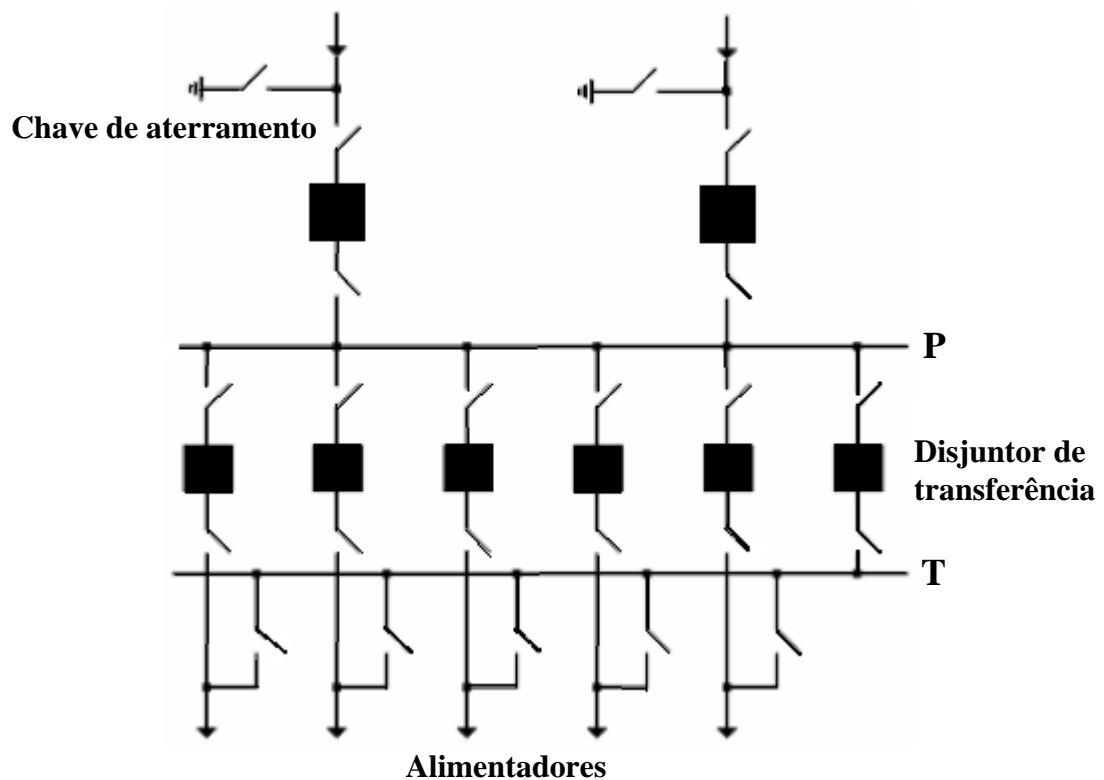


Figura 4: Barramento principal e barramento de transferência.

3.2.5 Barramento Duplo com Um Disjuntor

Este arranjo é utilizado para instalações de grande porte e de grande importância. Permite flexibilidade com os barramentos em operação, qualquer um dos barramentos poderá ser isolado para manutenção e há uma facilidade de transferência dos circuitos de uma barramento para o outro ([17, 22]).

Nesta estrutura, apresentada na Figura 5, a falha em um barramento não afeta o outro. Porém uma falha no disjuntor de transferência poderá causar a saída da subestação. A necessidade de quatro chaves por circuito e de um disjuntor extra são seus inconvenientes.

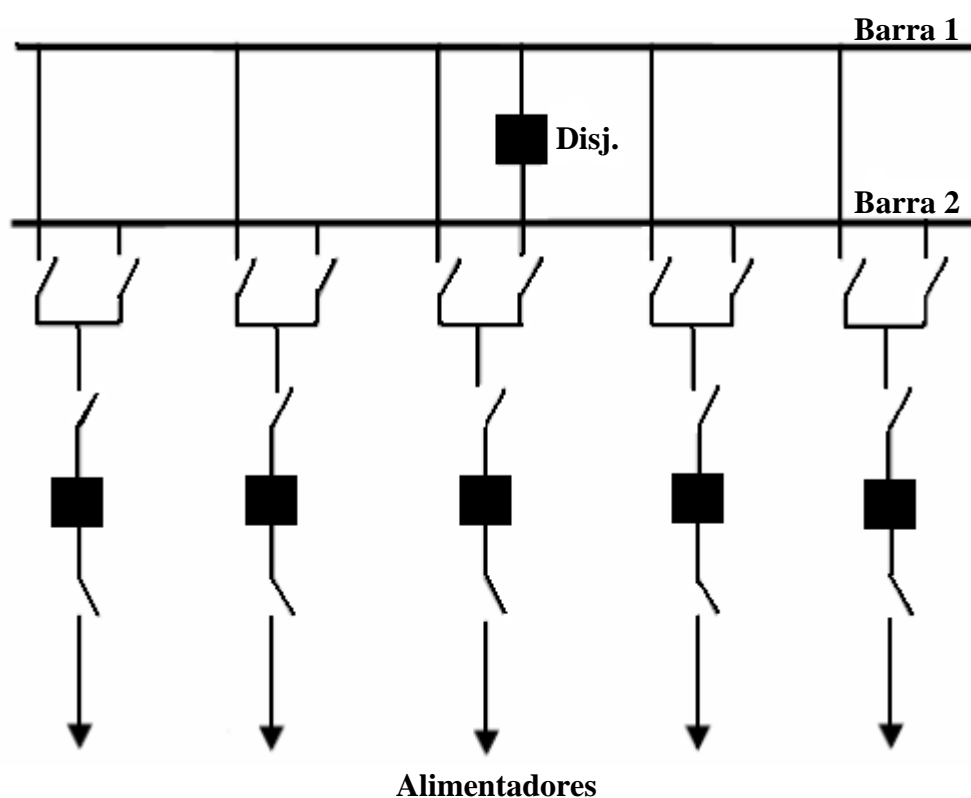


Figura 5: Barramento duplo com um disjuntor

3.2.6 Barramento Duplo com Disjuntor Duplo

Esta configuração possui alta confiabilidade, pois possui dois barramentos e dois disjuntores em cada circuito, permitindo, assim, que várias operações sejam realizadas sem desconectar o sistema ([17, 22]).

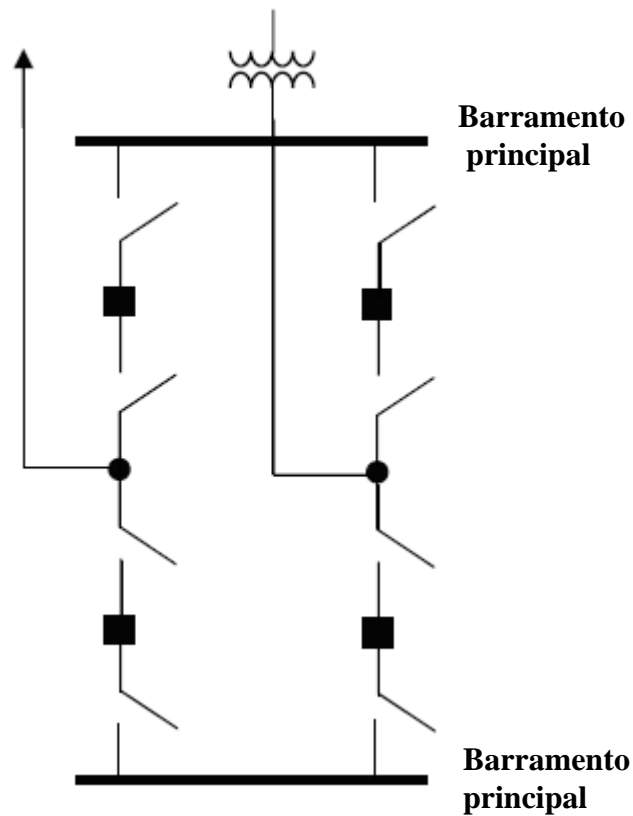


Figura 6: Barramento duplo com disjuntor duplo.

Esta configuração é empregada em instalações de grande potência, *e.g.*, subestações de UHV (ultra-alta tensão), por razão de possuir maior flexibilidade e confiabilidade.

As manutenções nos barramentos e nos circuitos de proteção podem ser realizadas com o sistema em seu estado normal de operação. A desvantagem desta configuração está no seu custo e na área requerida para a sua construção.

3.2.7 Barramento de Disjuntor e Meio

Nesta configuração, existem três disjuntores em série ligando uma barra dupla, sendo que cada dois circuitos são ligados de um lado e outro do disjuntor central de um grupo. Três disjuntores protegem dois circuitos em uma configuração com dois barramentos, ou seja, existem um disjuntor e meio para proteção de cada circuito ([17, 22]).

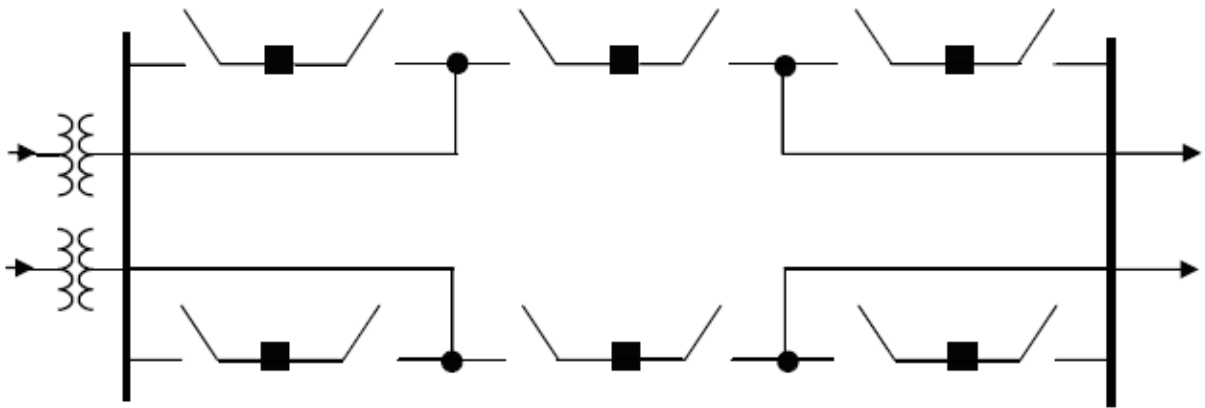


Figura 7: Barramento de disjuntor e meio.

Este esquema é equivalente ao barramento duplo anterior, mas com uma importante simplificação, utiliza-se um disjuntor e meio para cada entrada e saída, ao contrário de dois disjuntores por circuito como no caso anterior. Desta forma, tornando-o mais econômico com praticamente a mesma confiabilidade.

3.2.8 Barramento em Anel

Neste esquema todos os dispositivos de proteção são dispostos em anel. Cada alimentador é energizado através de dois disjuntores, ocorrendo falha, somente o trecho em que a falha ocorreu ficará isolado ([17, 22]).

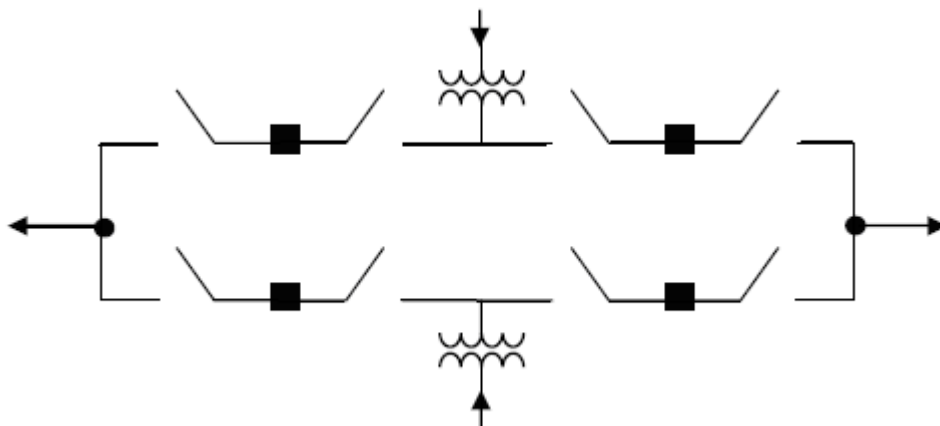


Figura 8: Barramento em anel.

Observando a Figura 8, nota-se a maior flexibilidade para manutenção dos disjuntores e a alta confiabilidade da configuração. A desvantagem é que se um disjuntor estiver desligado para manutenção, o anel estará aberto, e o restante do barramento e os disjuntores alternativos deverão ser projetados para transportar toda a carga.

3.3 Conclusão

Foram abordados, neste capítulo, os conceitos básicos sobre subestações de energia elétrica. Ilustrou-se as principais configurações utilizadas, explanando suas características e quais os motivos que levam a sua implantação.

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). Porém, os sistemas de energia elétrica estão sujeitos a várias perturbações causadas por fatores diversos, *e.g.*, falhas de equipamentos, descargas atmosféricas, etc. Desta maneira, é fundamental que se tenha inserido nesse, um sistema de proteção eficiente.

O princípio básico de proteção é a técnica de selecionar, coordenar, ajustar e alocar os vários equipamentos e dispositivos protetores em um sistema elétrico, de forma a guardarem entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada ou removida, sem que outras partes do mesmo sejam afetadas ([9, 10]).

Para que se tenha um fornecimento de energia elétrica com qualidade e confiabilidade, os sistemas de proteção devem satisfazer os seguintes requisitos ([9, 10]).

- Seletividade: A proteção deve somente isolar a parte do sistema atingida pelo defeito, mantendo a continuidade do serviço das demais partes do sistema;
- Sensibilidade: A proteção deve ser suficientemente sensível a defeitos que possam ocorrer durante a operação do sistema. Por sensibilidade entende-se como o menor valor de grandeza capaz de ativar os dispositivos de proteção;
- Segurança: O sistema de proteção não deve realizar uma falsa operação sob condições normais de operação, ou falhar no caso de faltas no sistema;
- Rapidez: As sobrecorrentes geradas pelos curtos-circuitos ou sobrecargas devem ser extintas no menor tempo possível, reduzindo a probabilidade de propagação dos defeitos;
- Economia: O sistema de proteção deve ter sua implantação viável economicamente, evitando-se um número excessivo de dispositivos de proteção.

Nos alimentadores dos sistemas de distribuição encontram-se vários dispositivos de proteção, e para que apenas o dispositivo mais próximo da falta atue é necessário realizar a coordenação dos diversos dispositivos. Desta maneira, a proteção acarretará nos seguintes benefícios.

- Menores danos aos materiais e equipamentos;
- Menores custos de manutenção;
- Redução no número de desligamentos;
- Aumento do faturamento;
- Menor queima de elos em cascata;
- Facilidades de manobras;
- Maior segurança.

4.2 Dispositivos de Controle e Proteção

Será apresentada, a seguir, uma breve descrição sobre 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 juntamente com as chaves fusíveis, as quais abrem os contatos em caso de rompimento do fusível e permitem manobras em certas situações.

A atuação do elo fusível acontece quando uma corrente superior a sua capacidade de condução percorrer o elemento fusível, Assim sendo, ele fundirá, interrompendo a circulação de corrente pelo circuito ([9, 10]). Sua troca deve ser realizada manualmente.

Os elos fusíveis possuem dois fatores de extrema importância, que são:

- Tempo de interrupção: dependente 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 decorrente da expulsão dos gases e capacidade térmica dos contatos;

Além do mais, os elos fusíveis podem ser classificados em:

- Elo-fusível protegido: é aquele instalado do lado da fonte;
- Elo-fusível protetor: é aquele instalado do lado da carga.

4.2.2 Religadores Automáticos

Atualmente, o uso de religadores automáticos tem aumentado em consequência do maior faturamento quando comparado à utilização de elos fusíveis, já que estes não são capazes de distinguir faltas permanentes e transitórias. O religador deverá tentar “limpar” uma falta, caso esta seja transitória (característica instantânea), se a falta for permanente o religador deverá permitir a atuação do dispositivo de proteção mais próximo da falta (característica temporizada) ([9, 10]). As distribuidoras de energia elétrica o utilizam geralmente próximos das fontes com adicionais pontos críticos, em ramais importantes, trechos sujeitos às descargas atmosféricas e trechos arborizados.

4.2.3 Seccionalizadores Automáticos

Os seccionalizadores aumentam a confiabilidade do sistema. Ocorrida uma falta permanente na zona principal do seccionalizador deverá sensibilizar o seccionalizador e o religador. O religador deverá fazer uma série de desligamentos obedecendo à seqüência pré-ajustada, o seccionalizador deverá efetuar as contagens do número de desligamentos e quando atingir o número de contagens ajustadas deve abrir seus contatos, sempre com o circuito desenergizado ([9, 10]).

As substituições dos elos fusíveis pelos seccionalizadores automáticos oferecem algumas vantagens como: elimina o erro humano, a qualidade não é afetada com o tempo, reduz o custo de manutenção, além de ser um ponto adicional de manobras. Objetivando aumentar a flexibilidade de aplicação dos seccionalizadores usa-se o acessório restritor de tensão e o acessório restritor de corrente.

4.2.4 Disjuntores Equipados com Relés

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos de abertura e fechamento comandados pelos relés. Os relés, ao detectarem uma perturbação que venha a comprometer os equipamentos ou o funcionamento normal do sistema, enviam um sinal elétrico que comandam a abertura de um ou mais disjuntores, de modo a isolar o equipamento ou parte do sistema afetado pela falha, impedindo que a perturbação danifique equipamentos, comprometa a operação ou se propague para outros componentes defeituosos.

Os relés mais empregados nos sistemas elétricos são: relé de sobrecorrente, relé de sobrecorrente direcional, relé de sobretensão, relé de subtensão, relé de distância, relé diferencial, relé de religamento e relé direcional de potência.

No âmbito da distribuição de energia elétrica, são mais importantes os relés de sobrecorrente e os relés de religamento ([9]).

- Relés de Sobrecorrente: Os 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:
 - ✓ Relés 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

A partir dos anos 90, com a introdução da tecnologia de microprocessadores na proteção de sistemas elétricos, houve uma mudança no enfoque das atividades de proteção. O uso dos relés digitais proporcionou uma flexibilidade que até então não existia.

As principais características de equipamentos que empregam tecnologia digital e dos que empregam a convencional são ([2]):

Tabela 1: Características das tecnologias digital e convencional.

Características	Tecnologia Convencional	Tecnologia Digital
Confiabilidade	Baixa	Alta
Integração	Não	Sim
Implementação	Individualizada	Integrada
Testes	Em campo	Na bancada
Pesquisas	Estagnada	Em evolução
Custo	Baixo	Alto

A Figura 9 está apresentando o diagrama de blocos de um relé digital ([2]). Nele se aplicam sinais analógicos provenientes dos transdutores primários de corrente e de potencial, e sinais discretos, que refletem o estado de disjuntores, chaves e outros relés. Estes sinais recebem um processamento nos subsistemas correspondentes, antes de sua aplicação ao microcomputador, que constitui o elemento principal do relé. Os sinais analógicos passam 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 serial e paralela ([2]).

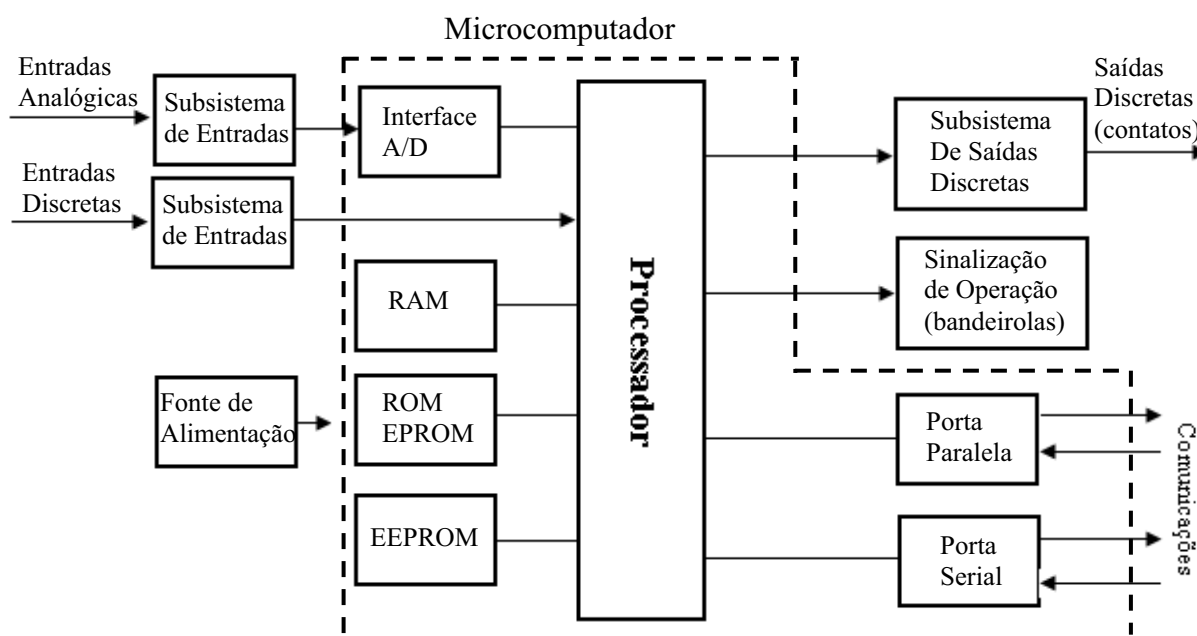


Figura 9: Diagrama de blocos de um relé digital.

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;

- Predomina ainda a linguagem assembler, o que limita a intercambialidade de programas entre diferentes relés.

A utilização destes equipamentos eletrônicos inteligentes em conjunto com sistemas de controle remotos (SCADA) provê maior confiabilidade ao sistema e reduzem os custos de operação, já que se tem a possibilidade de realizar os ajustes e a aquisição de dados dos centros operacionais, através de redes de comunicação.

4.3 Conclusão

Atualmente, as concessionárias de distribuição de energia elétrica têm aplicado grandes investimentos para modernizar a proteção, controle e supervisão do sistema, buscando otimizar tais processos. A aplicação de capital visando esta automação iniciou-se nos sistemas de transmissão de energia elétrica, pois a saída de uma linha de transmissão é mais crítica que a perda de um alimentador de distribuição. Porém, a desverticalização/regulamentação do setor estimulou também o aprimoramento em nível de distribuição de energia.

Para realizar a almejada automação das subestações de distribuição de energia elétrica, primeiramente é necessário ter condições de desassisti-las, sendo que uma destas condições é o emprego de componentes digitalizados. Neste capítulo, apresentaram-se os principais dispositivos de proteção usados nos sistemas de distribuição de energia e a evolução ocasionada pelo emprego da tecnologia digital nestes equipamentos.

Capítulo 5.

Lógica Nebulosa

5.1 Introdução

A teoria dos conjuntos nebulosos é um conceito matemático proposto por Lotfi A. Zadeh em 1965 ([34]) para manipular e representar incertezas.

A principal característica dos conjuntos nebulosos é sua capacidade de expressar a ambigüidade e subjetividade do pensamento humano sem nenhuma distorção. Desta forma, trata-se de uma excelente ferramenta para tratar as imprecisões e incertezas das informações.

Os conjuntos nebulosos são funções contínuas, definidas como funções de pertinência. A função de pertinência, $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$, que define o conjunto nebuloso A do universo de discurso Ω , associa a cada elemento x de Ω , o grau $\mu_A(x)$, com o qual x pertence a A [7, 23, 29]. Portanto, a função $\mu_A(x)$ indica o grau de pertinência entre x e o conceito expresso por A :

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

Ao utilizar-se a teoria dos conjuntos nebulosos, em um contexto lógico, como o de sistemas baseados na experiência, ela é denominada lógica nebulosa.

Dentro desta perspectiva, esta ferramenta permite definir modelos complexos do mundo real através de variáveis e regras simples.

5.2 Funções de Pertinência

As funções de pertinência são funções contínuas e limitadas por “0” e “1”, que caracterizam os conjuntos nebulosos. Estas podem ter diferentes formas associadas com a entrada e a resposta de saída. Porém, as principais são as triangulares, trapezoidais, gaussianas e exponenciais. As funções triangulares e trapezoidais são representadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Os três parâmetros que definem a função de pertinência triangular são: os vértices v_1 , v_2 e v_3 . Estes três vértices definem o desempenho da inferência nebulosa.

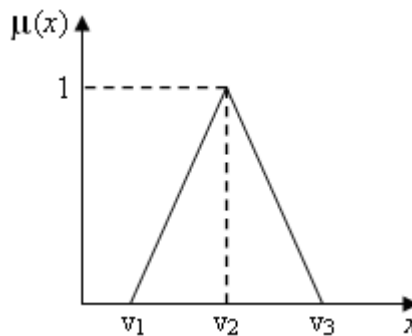


Figura 10: Função de pertinência triangular.

A função de pertinência triangular pode ser definida pelo conjunto de equações abaixo ([7, 23]).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - v_1}{v_2 - v_1}, & v_1 \leq x \leq v_2; \\ \frac{v_3 - x}{v_3 - v_2}, & v_2 \leq x \leq v_3; \\ 0, & \text{nos demais intervalos.} \end{cases} \quad (5.2.1)$$

Os quatro parâmetros que definem a função de pertinência trapezoidal são: v_1 , v_2 , v_3 e v_4 .

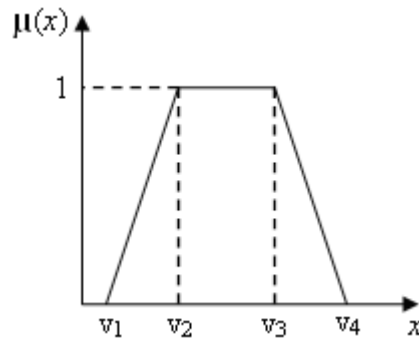


Figura 11: Função de pertinência trapezoidal.

A função de pertinência trapezoidal pode ser definida pelo conjunto de equações a seguir ([7, 23]).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - v_1}{v_2 - v_1}, & v_1 \leq x \leq v_2; \\ 1, & v_2 \leq x \leq v_3; \\ \frac{v_4 - x}{v_4 - v_3}, & v_3 \leq x \leq v_4; \\ 0, & \text{nos demais intervalos.} \end{cases} \quad (5.2.2)$$

As expressões anteriores demonstram a pertinência gradual nos conjuntos nebulosos, ao contrário do que ocorre com conjuntos da teoria de conjuntos clássica, denominados de *crisp*, para os quais a pertinência é do tipo “compatível ou incompatível”. Estas definições são demonstradas nas Figuras 12 e 13, as quais descrevem o conceito “jovem” através de um conjunto *crisp* e um conjunto nebuloso, respectivamente.

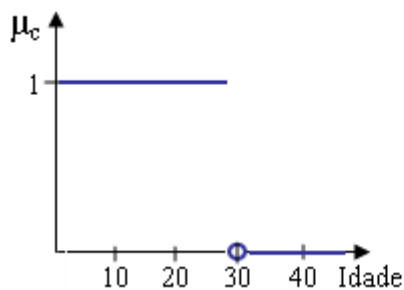


Figura 12: Conjunto “crisp” jovem.

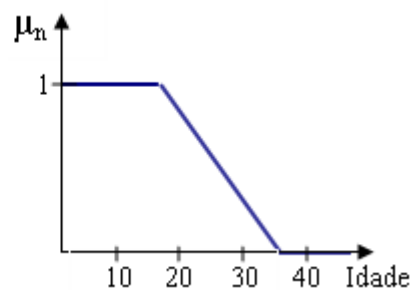


Figura 13: Conjunto nebuloso jovem.

5.3 Sistemas Nebulosos

O sistema nebuloso é caracterizado pelo seu conhecimento condicionado por regras nebulosas *Se-Então* ([23]). Este conjunto de regras constitui o núcleo do sistema nebuloso. Na Equação 5.3.1 está representado o formato de uma regra nebulosa:

$$\begin{array}{l} \text{Se } x \text{ é } A \text{ (premissa);} \\ \text{Então } y \text{ é } B \text{ (conseqüência).} \end{array} \quad (5.3.1)$$

sendo:

x e y = variáveis de entrada e saída, respectivamente;

A e B = termos lingüísticos associados aos conjuntos nebulosos.

A configuração básica dos sistemas nebulosos com nebulizador e desnebulizador está representada na Figura 14.

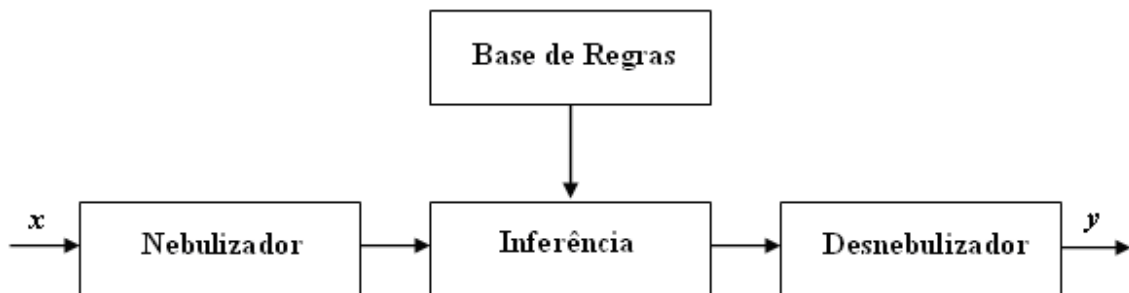


Figura 14: Sistema nebuloso com nebulizador e desnebulizador.

sendo que:

Nebulizador → transforma variáveis de valor real em variáveis lingüísticas;

Base de Regras → banco de regras nebulosas;

Inferência → manipula a base de regras;

Desnebulizador → converte variáveis lingüísticas em variáveis de valor real.

A presença do nebulizador e do desnebulizador permite que o usuário trabalhe com variáveis de entrada de valor real e obtenha variáveis de saída de valor real, sendo que todo o processo é realizado com variáveis lingüísticas.

Estes sistemas nebulosos são usualmente utilizados na automação de processos que utilizam de informações imprecisas fornecidas por seres humanos e em problemas complexos,

os quais requerem dispêndio de tempo e custo computacional alto quando solucionados pela abordagem clássica. Utilizando 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.

5.4 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos básicos sobre lógica nebulosa, os quais elucidam o seu emprego em modelos de raciocínio impreciso e incerto. Trata-se de uma ferramenta expressiva porque contém como casos especiais, a lógica binária, lógica de valores múltiplos, teoria de probabilidades e a lógica probabilística.

Os sistemas nebulosos possuem grande habilidade de modelar sistemas altamente complexos como é o caso do processo de automação de subestações. Dentro desta perspectiva, a lógica nebulosa torna-se um instrumento de extrema importância para a realização deste processo, sendo que também pode ser utilizada juntamente com outros sistemas inteligentes, *e.g.*, sistema “neuro-nebuloso”.

Capítulo 6.

Metodologia Proposta

6.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta para a detecção e classificação de faltas de curto-circuito em subestações de distribuição de energia elétrica, usando a lógica nebulosa (*fuzzy*). Este sistema baseia-se nas informações de corrente elétrica nas três fases. As entradas são os dados de correntes elétricas trifásicas pré-processadas e a saída indicando o diagnóstico da falta. Este pré-processamento consiste na geração de grandezas convenientemente normalizadas e expressas de forma relativa entre as três fases. Neste modo de abordagem, busca-se estabelecer um critério de inferência com uma baixa sensibilidade ao perfil de carga, localização da falta, distorção da forma de onda, etc. Este procedimento consiste na extração da característica dos defeitos de curto-circuito.

6.2 Visão Geral

Considerando-se os pontos monitorados disponíveis, a detecção de falta será baseada no conceito de lógica *nebulosa* ([23, 29, 34]). Este sistema será descrito na seqüência. Cada ponto (alimentadores, ramais, chaves, etc.) contém medidas e informações digitais e analógicas.

Para todos os elementos monitorados, o sistema *nebuloso*, para a detecção de falta, é calculado, ou seja, trata-se de um dispositivo alocado de forma paralela, com troca de informações intermódulos para contemplar e interpretar os reflexos da interconectividade dos elementos da subestação ([25]). Portanto, a detecção sobre a “normalidade” ou “anormalidade” é permanentemente executada. Uma vez identificada uma anormalidade, em algum elemento monitorado, o passo seguinte consistirá na execução do módulo “Classificação da Falta”.

Nas subestações, os elementos relevantes que devem ser monitorados são:

- a) alimentador;
- b) transformador;
- c) ramal; e
- d) etc.

Nesta seção serão abordados os casos de defeitos caracterizados por curto-circuito. Para este tipo de defeito, o procedimento a ser seguido será baseado no uso de medidas de corrente elétrica ([19]) para extração de características do estado do sistema.

6.3 Extração de Características 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, *a priori*, reduzir investimentos. O diagrama de blocos da Figura 15 representa, resumidamente, a metodologia a ser empregada.

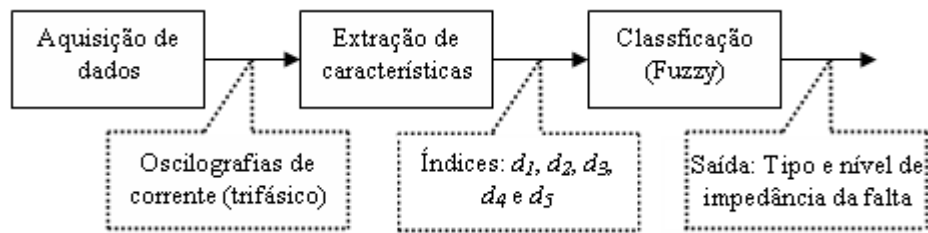


Figura 15: Diagrama de blocos simplificado da metodologia proposta.

Deste modo, considera-se um elemento da rede elétrica em particular (ramal, transformador, alimentador, etc.) sob observação, cujo oscilograma de corrente nas três fases esteja disponibilizado na subestação. Tomando-se um intervalo de tempo correspondente entre 1 e 3 ciclos (não havendo necessidade de tomar um intervalo preciso), procede-se a identificação do valor máximo da corrente elétrica em cada fase (terna $\{a, b, c\}$). Na seqüência, calculam-se as seguintes grandezas associadas ([19]):

$$d_a = \frac{MI_a}{MI_b} \quad (6.3.1)$$

$$d_b = \frac{MI_b}{MI_c} \quad (6.3.2)$$

$$d_c = \frac{MI_c}{MI_a} \quad (6.3.3)$$

sendo:

I_a = corrente elétrica da fase a ;

I_b = corrente elétrica da fase b ;

I_c = corrente elétrica da fase c ;

$$\begin{aligned} MI_a &\triangleq \text{valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase } a \\ &= \text{máx} \{ \text{abs}(I_a) \}; \end{aligned} \quad (6.3.4)$$

$$\begin{aligned} MI_b &\triangleq \text{valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase } b \\ &= \text{máx} \{ \text{abs}(I_b) \}; \end{aligned} \quad (6.3.5)$$

$$\begin{aligned} MI_c &\triangleq \text{valor máximo absoluto da corrente elétrica da fase } c \\ &= \text{máx} \{ \text{abs}(I_c) \}; \end{aligned} \quad (6.3.6)$$

Tendo em vista que se está buscando um critério que não leve em conta, diretamente, as magnitudes das correntes e sim os valores relativos destas correntes entre as três fases, as grandezas d_a , d_b e d_c são normalizadas do seguinte modo ([19]):

$$na = \frac{da}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (6.3.7)$$

$$nb = \frac{db}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (6.3.8)$$

$$nc = \frac{dc}{\text{máx}\{da, db, dc\}} \quad (6.3.9)$$

Finalmente, buscam-se representar estas grandezas, de forma relativa, como segue ([19]).

$$d_1 = na - nb \quad (6.3.10)$$

$$d_2 = nb - nc \quad (6.3.11)$$

$$d_3 = nc - na \quad (6.3.12)$$

Deste modo, as equações (6.3.10) – (6.3.12) são expressões que tentam definir padrões dos curtos-circuitos, ou seja, para cada tipo destas faltas, haverá uma característica de distribuição dos índices relativos normalizados d_1 , d_2 e d_3 . O que se pretende é definir a característica (assinatura) associada a cada tipo de defeito de curto-circuito e, assim, usar tais índices, com o auxílio da lógica *nebulosa*, para realizar o diagnóstico (classificação) de faltas. Esta características podem ser extraídas e compreendidas da subestação, via simulação.

A partir das equações (6.3.10) – (6.3.12), conclui-se que:

$$d_1 + d_2 + d_3 = 0 \quad (6.3.13)$$

Desta forma, pode-se expressar d_3 por:

$$d_3 = -(d_1 + d_2) \quad (6.3.14)$$

Tendo em vista a dependência de d_3 em relação aos índices d_1 e d_2 , o problema da entrada se resume na manipulação de duas variáveis. Com esta formulação, a resolução do problema de classificação de faltas do tipo curto-circuito torna-se mais “simples”.

Os valores de tais índices (d_1 , d_2 e d_3) estão compreendidos entre -1 e $+1$. A variação, notadamente, depende do tipo de curto-circuito e, também, dos demais parâmetros do circuito

(impedância de falta, nível de carregamento do sistema, etc.), cuja diversidade será considerada ao estabelecer o modelo via conceito nebuloso. Esta distribuição conceitual é de caráter geral.

Estes índices são suficientes para a detecção e classificação de defeitos assimétricos. Por conseguinte, não há eficácia nos casos de curtos-circuitos trifásicos, os quais serão abordados adiante. Para os casos de faltas fase-a-fase, tais índices não distinguem se há ou não ligação à terra. Deste modo, usa-se um outro índice σ com este propósito ([19]):

$$\sigma \triangleq \frac{\max\{I_a + I_b + I_c\}}{3} \quad (6.3.15)$$

O parâmetro σ é similar à corrente de seqüência zero, porém, sem a necessidade de se determinar a defasagem das correntes I_a , I_b e I_c . Este parâmetro apresenta comportamento diferente para uma falta que envolve a conexão à terra (valor muito grande) de uma falta onde não há ligação à terra (valor muito pequeno). Por exemplo, uma vez calculado σ , pode-se usar o seguinte critério:

- se $\sigma \geq \sigma_{\text{máx}} \rightarrow d_4 = 1$ (6.3.16)
(para faltas com conexão à terra);

- se $\sigma < \sigma_{\text{máx}} \rightarrow d_4 = 0$ (6.3.17)
(para faltas sem conexão à terra);

sendo:

$\sigma_{\text{máx}}$ = valor estabelecido a partir de simulações e medidas considerando-se faltas de curto-circuito, *e.g.*, $\sigma_{\text{máx}} = 0,01$.

Ressalta-se, ainda, que a abordagem, via extração das grandezas d_1 , d_2 , d_3 e d_4 torna-se importante neste tipo de aplicação por apresentar uma certa imunidade ao ruído existente nas oscilografias, tendo em vista que durante a falta as formas de onda de correntes não são, necessariamente, senóides perfeitas. Também, tendo em vista que as grandezas na , nb e nc são normalizadas, o processo de identificação “independe” do perfil de carregamento do

sistema, localização da falta, etc. Este sistema de inferência, portanto é robusto, o que o torna bastante útil para a implantação da automação.

Um outro parâmetro importante, neste contexto, deve ser usado para distinguir os defeitos de curtos-circuitos trifásicos em relação à operação normal, visto que os defeitos trifásicos são caracterizados por simetria nas três fases. Assim, busca-se um outro índice, definido como sendo d_5 , dedicado à detecção de anomalias na forma de onda. Para tanto, propõe-se o seguinte critério.

Durante o processo de amostragem, pode-se inferir, de modo aproximado, a amplitude da corrente ($X_{m\acute{a}x}$) da forma de onda (vide Figura 16), do seguinte modo:

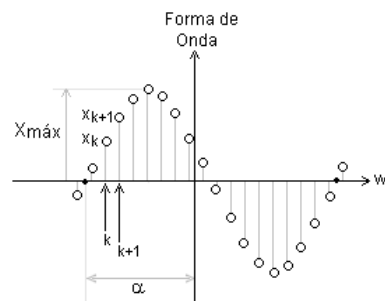


Figura 16: Forma de onda senoidal discretizada com uma taxa de amostragem m .

$$X_{m\acute{a}x} = \left| \frac{x_k}{\text{sen} \{ \tan^{-1}(\Phi) \}} \right| \quad (6.3.18)$$

sendo:

$$\Phi = \frac{x_k \text{sen}(w\Delta t)}{x_{k+1} - x_k \text{cos}(w\Delta t)} ;$$

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

$$w \triangleq \text{velocidade da onda (radiano el\u00e9trico/s)};$$

$$= 2 \pi f;$$

$$k = \text{tempo discreto};$$

$$m = \text{n\u00famero de amostragem por ciclo}.$$

Calcular os valores de $X_{m\acute{a}x i}$, usando-se a equa\u00e7\u00e3o (6.3.18), para $i = 1, 2, \dots, L$, sendo L um n\u00famero arbitrado considerando-se as amostragens de interesse (e.g., 5 vezes em 1 ciclo). Assim:

$$X_{méd} = \frac{\sum_{i=1}^L X_{máx}^i}{\sqrt{2} L} \quad (6.3.19)$$

$$\Gamma = |X_{referencial} - X_{méd}| \quad (6.3.20)$$

$$\rho = \frac{\Gamma^a + \Gamma^b + \Gamma^c}{3} \quad (6.3.21)$$

sendo:

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

$X_{referencial}$ = valor eficaz de referência;

Γ^a , Γ^b e Γ^c = índices calculados, usando-se a equação (6.3.20), para as fases a , b e c , respectivamente;

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

Para uma forma de onda perfeitamente senoidal, o valor da amplitude calculada usando-se a equação (6.3.18) é exata, evidentemente se a medida for correta. Contudo, quando houver qualquer anomalia (mudança brusca ou distorção), o reflexo incidirá na amplitude, através de uma discrepância em relação ao valor real. O valor real considerado corresponde ao valor apurado na equações (6.3.4), (6.3.5) e (6.3.6), para cada fase, respectivamente. Deste modo, adaptando-se as equações (6.3.19)–(6.3.21), têm-se os resultados traduzido no seguinte critério:

- se $\rho > \Delta Imáx$, $\rightarrow d_5 = 1$ (6.3.22)
indica a existência de anormalidade de corrente;

- se $\rho \leq \Delta Imáx$, $\rightarrow d_5 = 0$ (6.3.23)
indica que não há constatação de anormalidade relevante de corrente.

sendo:

ρ = calculado usando a equação (6.3.21) e tomando-se $X_{referencial}$ como sendo a corrente nominal eficaz calculada usando-se as equações (6.3.4) – (6.3.6), para as fases a , b e c , respectivamente;

$\Delta I_{máx}$ = parâmetro a ser especificado em função da experiência, levando-se em conta o problema ora abordado, *e.g.*, $\Delta I_{máx} = 1$.

Observa-se que o índice d_5 , ainda que possa ser usado como indicador de variações proeminentes, *e.g.*, nos casos de faltas de curto-circuito, a sua recomendação é, em especial, às faltas trifásicas (caracterizadas por d_1 , d_2 e $d_3 \approx 0$).

6.3.1 Sumário

Os índices comportamentais (d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5) buscam caracterizar os vários tipos de curtos-circuitos. Os índices d_1 , d_2 e d_3 não discriminam se há ou não conexão à terra. Com o uso do índice d_4 , as conexões para a terra são facilmente identificadas. Por sua vez d_5 indica que efetivamente há anormalidade no sistema. Com base nestes, caracterizam-se todos os tipos de defeitos. Deste modo, podem-se inferir todos os tipos de curtos-circuitos.

6.3.2 Análise Comportamental dos Índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5

Neste tópico será realizada a análise do comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 para os diferentes estados do sistema, *e.g.*, o sistema operando em condições normais, faltas monofásicas, etc.

Primeiramente, na Figura 17 apresentam-se as correntes das fases a , b e c em um sistema de distribuição de energia elétrica em condições normais de operação. Nota-se que o valor máximo absoluto das correntes de fase são aproximadamente iguais, portanto aplicando as equações 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3 tem-se d_a , d_b e d_c aproximadamente iguais a 1, conseqüentemente 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 porque, estes representam de forma relativa as grandezas n_a , n_b e n_c . Como não há presença da terra, o índice d_4 será zero e devido à normalidade do sistema tem-se d_5 também igual à zero.

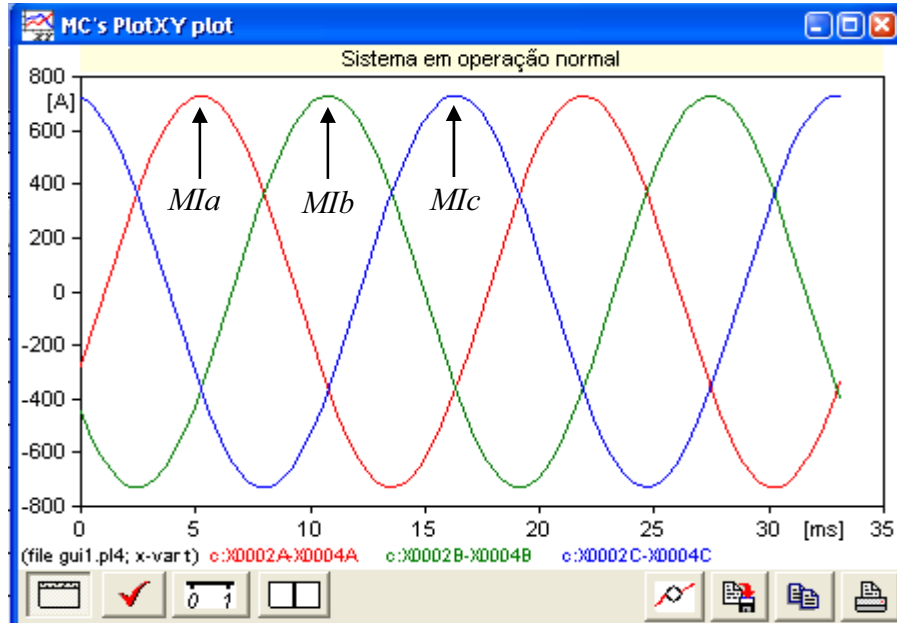


Figura 17: Correntes trifásicas para o sistema em operação normal.

Na Figura 18 encontra-se o comportamento das correntes de fase para faltas trifásicas, observa-se que os valores das três correntes de fase são elevados, porém possuem valores aproximadamente iguais, como no caso da operação normal. Portanto, realizando a análise das equações 6.3.1 a 6.3.12 encontrar-se-á que os índices d_1 , d_2 e d_3 serão semelhantes aos do sistema em operação normal (próximos a 0). Isto mostra claramente que a metodologia não leva em conta, diretamente, as magnitudes das correntes, mas sim os valores relativos destas grandezas. O índice d_4 será zero devido à ausência da terra, e o índice d_5 será 1 devido à presença de anormalidade.

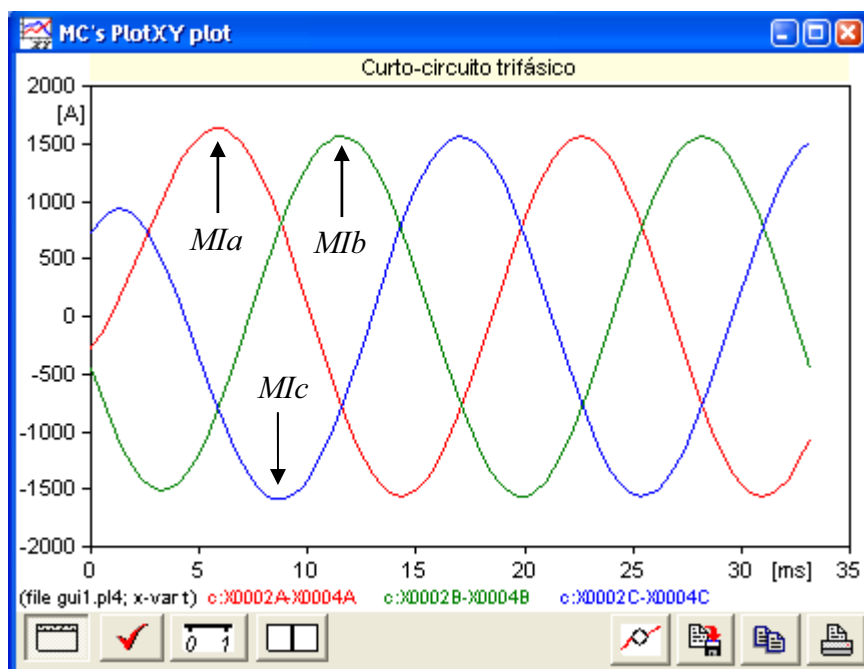


Figura 18: Correntes trifásicas para curto-circuito trifásico.

Ressalta-se ainda, que M_{Ic} representado na Figura 18 possui o valor indicado, porém positivo, isso deve-se ao fato de M_{Ic} corresponder ao valor máximo absoluto da corrente elétrica da *fase c*.

A Figura 19 apresenta o comportamento dos índices d_1 , d_2 e d_3 , representado pelo índice d_i , para estes casos (operação normal e curto-circuito trifásico) em que se têm as correntes de fase aproximadamente iguais.

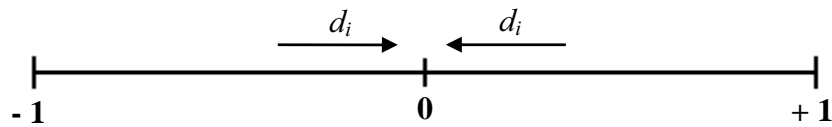


Figura 19: Representação do comportamento dos índices d_1 , d_2 e d_3 para o sistema em operação normal e em curto-circuito trifásico.

Na Figura 20 apresenta-se as correntes de fase do sistema de distribuição de energia sob falta *fase a – terra* com resistência de falta de 0,1 ohms. Observa-se claramente que o valor máximo absoluto da corrente elétrica da *fase a* é muito superior aos valores máximos absolutos das outras fases. Como consequência, analisando as equações 6.3.1 a 6.3.3, tem-se d_a elevadíssimo, d_b aproximadamente 1 e d_c possui valor reduzido. Normalizando (equações 6.3.7 a 6.3.9), obtêm-se n_a igual a 1, n_b será pequeno e n_c será muito pequeno. Portanto, através das equações 6.3.10 a 6.3.12 encontram-se os índices d_1 , d_2 e d_3 , desta forma, d_1 terá um valor positivo e grande, d_2 será positivo e pequeno e d_3 será negativo e grande, como é mostrado na Figura 21. Devido à presença da terra o índice d_4 será 1, e d_5 também será igual a 1 devido à presença de anormalidade de corrente no sistema.

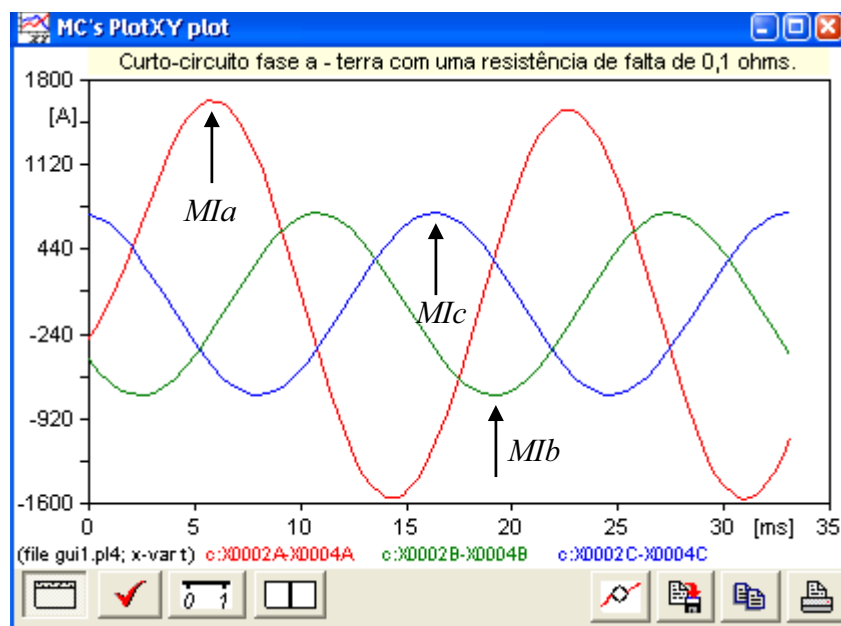


Figura 20: Correntes trifásicas para curto-circuito *fase a – terra* de baixa impedância.

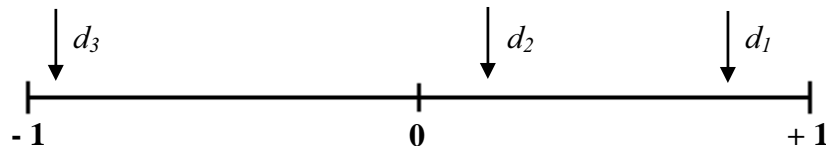


Figura 21: Representação do comportamento dos índices d_1 , d_2 e d_3 para o sistema em curto-circuito *fase a – terra* de baixa impedância.

Por último, visando à comparação de curtos-circuitos de baixa impedância com os de alta impedância, apresentar-se-á na Figura 22, o comportamento das correntes de fase para um curto-circuito *fase a – terra* com resistência de falta de 50 ohms (alta impedância).

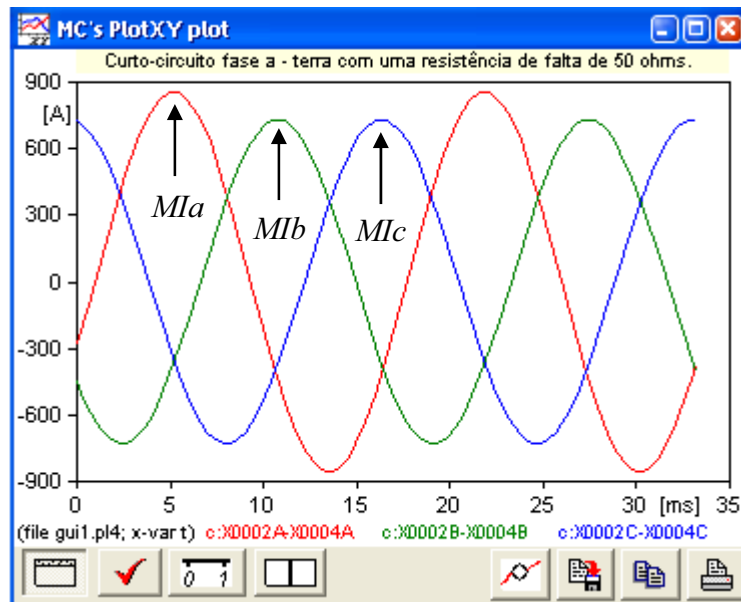


Figura 22: Correntes trifásicas para curto-circuito *fase a – terra* de alta impedância.

Observa-se que para este caso ($R_f = 50$ ohms) tem-se uma corrente de falta (corrente da *fase a*) inferior à corrente de falta considerando uma resistência de falta inferior ($R_f = 0,1$ ohms). Consequentemente analisando as equações 6.3.1 a 6.3.12, constatar-se-á que d_1 será positivo e pequeno, d_2 será positivo e pequeno e d_3 será negativo e pequeno, como mostra a Figura 23. Ressalta-se que este “pequeno” é totalmente distinto dos índices obtidos quando da operação normal do sistema e de curtos-circuitos trifásicos, os quais são bem próximos à zero. Comparando a Figura 23 à Figura 21 nota-se a menor dispersão destes índices (d_1 , d_2 e d_3) quando se tem curtos-circuitos de alta impedância. Os índices d_4 e d_5 são também iguais a 1, devido a presença da terra e de anormalidade de corrente no sistema, respectivamente.

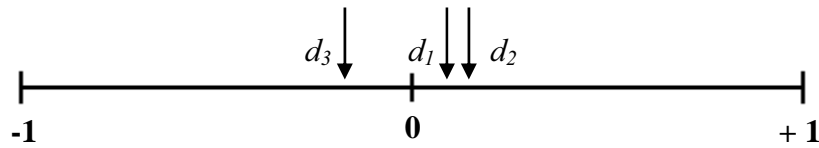


Figura 23: Representação do comportamento dos índices d_1, d_2 e d_3 para o sistema em curto-circuito *fase a – terra* de alta impedância.

Para os outros casos de curtos-circuitos segue o mesmo procedimento de análise dos índices d_1, d_2, d_3, d_4 e d_5 .

6.4 Classificação do Estado do Sistema

O processo de detecção sobre “normalidade” ou “anormalidade” do sistema é executado permanentemente. Uma vez detectada anormalidade no sistema promove-se a classificação do defeito, a qual será baseada nos conceitos da lógica nebulosa ([7, 23, 29, 34]). Este diagnóstico permitirá a identificação de faltas *monofásicas, bifásicas* e *trifásicas*, com ou sem a presença da *terra*.

A base de regras do “módulo classificador” será construída considerando as simulações realizadas no software ATP (*Alternative Transients Program*) ([3, 8, 13, 30]) e a experiência. Esta base de dados contendo o comportamento do sistema para as diversas condições de faltas possíveis é imprescindível na construção de uma base de regras robusta para a definição do estado do sistema.

A definição do 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 24, então, o conjunto *nebuloso* associado à d_i será o conjunto S . Assim, para os demais índices segue o mesmo procedimento. Os índices d_4 e d_5 são números binários que representam a presença ou ausência da terra e a existência ou não de anomalias no sistema, respectivamente.

Capítulo 7.

Implementação da Metodologia Proposta

7.1 Introdução

A metodologia proposta apresentada no capítulo anterior baseia-se em informações extraídas dos sinais de corrente na saída do alimentador da subestação de distribuição de energia elétrica ([32]). Portanto, deve-se ter instalado oscilógrafos e/ou registradores digitais de perturbações que disponibilizam essas oscilografias locais.

A partir dessas características extraídas do sistema, o módulo classificador terá que classificar o estado do sistema. Dentro desta perspectiva, serão diagnosticados casos de faltas *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*.

Para a implementação da proposta há necessidade de uma grande quantidade de dados que representam o comportamento do sistema sob as diversas condições de faltas. Atualmente, as empresas distribuidoras de energia elétrica não contam com um banco de dados representativo, no qual haveria a quantidade e diversidade de casos faltosos

necessários. Desta maneira, torna-se necessário realizar a modelagem do alimentador a ser simulado usando um *software* apropriado.

7.2 Programas Computacionais Empregados

O *software* utilizado para obtenção das oscilografias necessárias foi o *Alternative Transients Program* (ATP) ([3, 8, 13, 20, 30]), um programa computacional gratuito, com interface gráfica, que possibilita simular fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica em sistemas elétricos.

A metodologia proposta foi implementada no *software* MATLAB (*Matrix Laboratory*) ([21]). O Matlab é um *software* interativo, onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

Através destes dois softwares foi possível realizar o diagnóstico do estado do sistema de distribuição de energia elétrica, o qual será especificado no próximo tópico.

7.3 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

O sistema de distribuição de energia elétrica simulado sob as diversas condições de falta para a aplicação da metodologia proposta consiste em um alimentador radial adaptado de ([32]). Neste alimentador substituíram-se suas ramificações por cargas equivalentes. A Figura 25 representa o diagrama unifilar do alimentador simulado e na Tabela 2 encontram-se os dados do sistema.

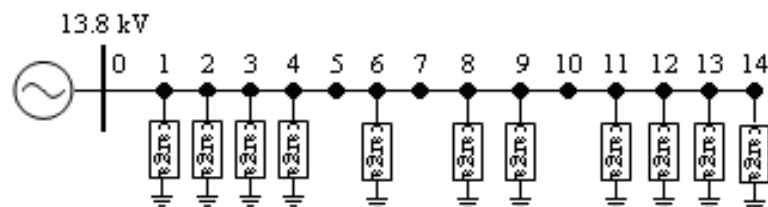


Figura 25: Diagrama unifilar do alimentador simulado.

Tabela 2: Dados do alimentador simulado.

Barra		Comprimento (km)	R_{linha} (Ω)	X_{linha} (Ω)	Carga na barra j	
i	j				P(KW)	Q(KVAr)
0	1	4,18	1,170	1,128	2646	882
1	2	1,26	0,353	0,340	522	174
2	3	1,26	0,353	0,340	4896	1632
3	4	2,19	0,613	0,591	936	312
4	5	1,03	0,288	0,278	0	0
5	6	1,93	0,540	0,521	1806	602
6	7	1,58	0,442	0,426	0	0
7	8	1,58	0,442	0,426	1503	501
8	9	1,55	0,434	0,418	189	63
9	10	1,55	0,434	0,418	0	0
10	11	4,65	1,302	1,255	657	219
11	12	2,17	0,608	0,586	336	112
12	13	0,89	0,249	0,240	125	42
13	14	1,80	0,504	0,486	225	85
Total		27,62	7,732	7,453	13841	4624

Conforme apresentado na Tabela 2 o sistema é composto por 14 barras (vide Anexo A), nas quais serão aplicadas as faltas. Visando obter um número maior de simulações pode-se dividir cada trecho do alimentador em subtrechos, e assim realizar simulações de faltas em diversos pontos entre duas barras.

7.4 Parâmetros Para Simulações no *Software* ATP

O alimentador radial apresentado na Figura 25 foi implementado no *software* ATP/EMTP. Para isso, modelaram-se os trechos do alimentador como sendo circuitos RL série, sem acoplamento entre as fases; e as cargas foram modeladas como impedância constante conectadas em Y aterrado. Para realizar a simulação das faltas modelaram-nas como sendo resistências constantes. Desta maneira, especificaram-se os componentes presentes nos diversos estados do sistema.

As simulações foram realizadas considerando uma frequência de amostragem de 7,69 kHz que propicia 128 amostras por ciclo. Esta frequência foi utilizada por causa da existência de aparelhos de medição e obtenção de dados com frequência de amostragem similar, *e.g.*,

BMI (*Basic Measuring Instrument*) Modelo 7100. O tempo de simulação foi de 33,3 ms, que corresponde a 2 ciclos em 60 Hz.

Foram simulados 850 casos de curtos-circuitos considerando-se diferentes valores da resistência de falta (R_f): 0,1; 2; 10; 50 e 100 Ω , ângulos de inserção da falta (θ_f): 0; 45; 90 e 135°, carregamentos do sistema (S_o): 60; 80 e 100% (carregamento nominal) e pontos do alimentador.

7.5 Concepção dos Módulos Classificadores

Baseando-se nos 850 casos de curto-circuito simulados sob as diversas condições de falta, presentes no Anexo B, definiram-se as bases de regras e os conjuntos nebulosos para os dois Módulos Classificadores em questão, “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” que diagnosticará o estado do sistema e o “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” que além de fornecer o diagnóstico do estado do sistema também discriminará o nível de impedância (baixa e alta) para cada tipo de curto-circuito que, a princípio, proporciona uma boa caracterização dos casos práticos.

Primeiramente apresentar-se-á a concepção do “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” (“MCSDNI”). Para tanto, considera-se a caracterização dos conjuntos nebulosos (forma triangular), como ilustrada na Figura 26.

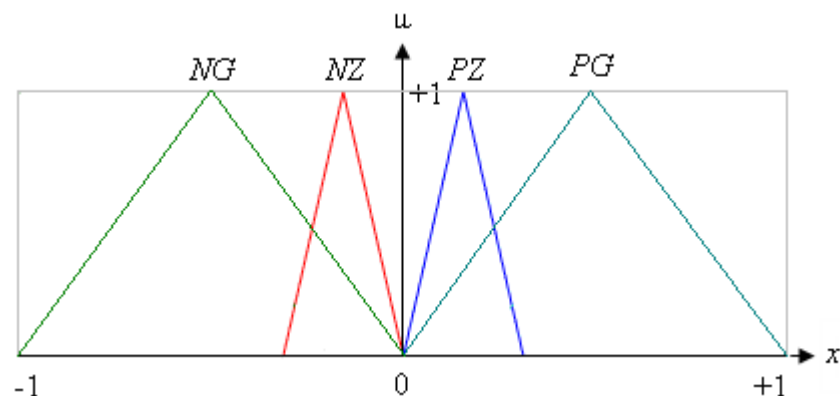


Figura 26: Conjuntos nebulosos para o módulo sem distinção de níveis de impedância.

A variável μ corresponde à função de pertinência. Os conjuntos nebulosos NG , NZ , PZ e PG são caracterizados como sendo *Negativo Grande*, *Negativo Zero*, *Positivo Zero* e *Positivo Grande*, respectivamente, e são definidos em (7.5.1).

$$\begin{array}{l}
 \text{Vértice 1} \\
 \text{Vértice 2} \\
 \text{Vértice 3}
 \end{array}
 \begin{array}{cccc}
 NG & NZ & PZ & PG \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 -1 & -0,0869 & -10^{-5} & 0 \\
 -0,5 & -0,0434 & 0,0434 & 0,5 \\
 0 & 0 & 0,0869 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \quad (7.5.1)$$

Na Tabela 3 apresenta-se a distribuição dos índices d_1, \dots, d_5 , considerando-se as possíveis faltas e levando-se em conta os resultados de simulações realizadas (Anexo B).

sendo:

g = indica conexão à terra.

Tabela 3: Ilustração do comportamento dos índices d_1, d_2, d_3, d_4 e d_5 no “MCSDNI”.

Índice Fuzzy					Tipo de Falta
d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	
<i>PZ/PG</i>	<i>PZ/PG</i>	<i>NG</i>	1	1	<i>a-g</i>
<i>NG</i>	<i>PZ/PG</i>	<i>PZ/PG</i>	1	1	<i>b-g</i>
<i>PZ/PG</i>	<i>NG</i>	<i>PZ/PG</i>	1	1	<i>c-g</i>
<i>NZ/NG</i>	<i>PG</i>	<i>NZ/NG</i>	1	1	<i>a-b-g</i>
<i>NZ/NG</i>	<i>NZ/NG</i>	<i>PG</i>	1	1	<i>b-c-g</i>
<i>PG</i>	<i>NZ/NG</i>	<i>NZ/NG</i>	1	1	<i>c-a-g</i>
<i>NZ/NG</i>	<i>PG</i>	<i>NZ/NG</i>	0	1	<i>a-b</i>
<i>NZ/NG</i>	<i>NZ/NG</i>	<i>PG</i>	0	1	<i>b-c</i>
<i>PG</i>	<i>NZ/NG</i>	<i>NZ/NG</i>	0	1	<i>c-a</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	1	<i>a-b-c-g</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	1	<i>a-b-c</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	0	<i>normalidade</i>

Observa-se na tabela acima que os curtos-circuitos trifásicos com ou sem a presença da terra possuem as mesmas características (simétricos), portanto o módulo classificador diagnosticará o envolvimento das três fases na falta, não especificando quanto à presença ou ausência da terra.

Como descrito no tópico 6.4, “Classificação do Estado do Sistema”, a definição do conjunto nebuloso associado às variáveis d_1, d_2 e d_3 corresponde ao conceito de máxima pertinência.

A interpretação da Tabela 3 segue o seguinte padrão. Tomando-se como exemplo a linha destacada com fundo cinza:

- se d_1 é *NZ* ou *NG* e d_2 é *PG* e d_3 é *NZ* ou *NG* 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*).

Visando uma classificação mais apurada dos tipos de curto circuito ampliou-se o número de conjuntos nebulosos, desta forma, o Módulo Classificador é capaz de discriminar dois níveis de impedância (baixa e alta) para cada tipo de curto-circuito, temos então o “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” (“MCCDNI”). Desta maneira, considerando os conjuntos nebulosos como ilustrado na Figura 27 é possível estimar a influência da impedância Z_f no comportamento da falta.

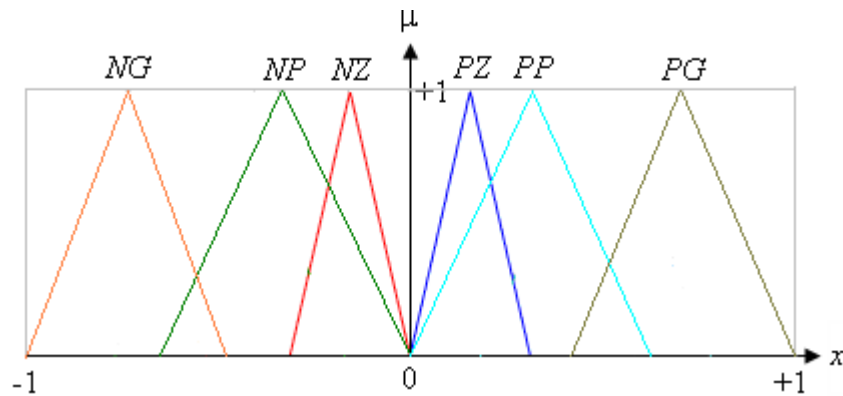


Figura 27: Conjuntos nebulosos para o módulo com distinção de níveis de impedância.

Os conjuntos nebulosos *NG*, *NP*, *NZ*, *PZ*, *PP* e *PG* são caracterizados como sendo *Negativo Grande*, *Negativo Pequeno*, *Negativo Zero*, *Positivo Zero*, *Positivo Pequeno* e *Positivo Grande*, respectivamente, e são definidos em (7.5.2).

$$\begin{array}{l}
 \text{Vértice 1} \\
 \text{Vértice 2} \\
 \text{Vértice 3}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccc}
 & NG & NP & NZ & PZ & PP & PG \\
 \left[\begin{array}{cccccc}
 -1 & -0,6 & -0,0923 & -10^{-5} & 0 & 0,5231 \\
 -0,7615 & -0,3 & -0,0461 & 0,0461 & 0,3 & 0,7615 \\
 -0,5231 & 0 & 0 & 0,0923 & 0,6 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (7.5.2)$$

Na Tabela 4 apresenta-se a distribuição dos índices d_1, \dots, d_5 , considerando-se as possíveis faltas e levando-se em conta os resultados de simulações realizadas.

sendo:

g = indica conexão à terra;

Z_f = impedância de falta definida por categoria de valores (baixa ou alta).

Tabela 4: Ilustração do comportamento dos índices d_1, d_2, d_3, d_4 e d_5 no “MCCDNI”.

Índice Fuzzy					Falta		
d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	Impedância de Falta (Z_f)		Tipo
					Baixa	Alta	
<i>PP/PG</i>	<i>PZ/PP</i>	<i>NG</i>	1	1	x		<i>a-g</i>
<i>PZ/PP</i>	<i>PZ/PP</i>	<i>NP</i>	1	1		x	<i>a-g</i>
<i>NG</i>	<i>PP/PG</i>	<i>PZ/PP</i>	1	1	x		<i>b-g</i>
<i>NP</i>	<i>PZ/PP</i>	<i>PZ/PP</i>	1	1		x	<i>b-g</i>
<i>PZ/PP</i>	<i>NG</i>	<i>PP/PG</i>	1	1	x		<i>c-g</i>
<i>PZ/PP</i>	<i>NP</i>	<i>PZ/PP</i>	1	1		x	<i>c-g</i>
<i>NP/NG</i>	<i>PG</i>	<i>NZ/NP</i>	1	1	x		<i>a-b-g</i>
<i>NZ/NP</i>	<i>PP</i>	<i>NZ/NP</i>	1	1		x	<i>a-b-g</i>
<i>NZ/NP</i>	<i>NP/NG</i>	<i>PG</i>	1	1	x		<i>b-c-g</i>
<i>NZ/NP</i>	<i>NZ/NP</i>	<i>PP</i>	1	1		x	<i>b-c-g</i>
<i>PG</i>	<i>NZ/NP</i>	<i>NP/NG</i>	1	1	x		<i>c-a-g</i>
<i>PP</i>	<i>NZ/NP</i>	<i>NZ/NP</i>	1	1		x	<i>c-a-g</i>
<i>NP/NG</i>	<i>PG</i>	<i>NZ/NP</i>	0	1	x		<i>a-b</i>
<i>NZ/NP</i>	<i>PP</i>	<i>NZ/NP</i>	0	1		x	<i>a-b</i>
<i>NZ/NP</i>	<i>NP/NG</i>	<i>PG</i>	0	1	x		<i>b-c</i>
<i>NZ/NP</i>	<i>NZ/NP</i>	<i>PP</i>	0	1		x	<i>b-c</i>
<i>PG</i>	<i>NZ/NP</i>	<i>NP/NG</i>	0	1	x		<i>c-a</i>
<i>PP</i>	<i>NZ/NP</i>	<i>NZ/NP</i>	0	1		x	<i>c-a</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	1	x		<i>a-b-c-g</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	1		x	<i>a-b-c-g</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	1	x		<i>a-b-c</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	1		x	<i>a-b-c</i>
<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	<i>NZ/PZ</i>	0	0	-	-	<i>normalidade</i>

Como descrito no “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” os curtos-circuitos *abc* e *abc-g* possuem as mesmas características, portanto o diagnóstico do “Módulo Classificador Com Distinção de níveis de Impedância” informará o envolvimento das três fases na falta, não especificando a presença ou ausência da terra. Ressalta-se que o percentual de curtos-circuitos trifásicos em um sistema de distribuição real é muito pequeno.

Havendo a necessidade de melhorar a discriminação basta aumentar o número de conjuntos nebulosos.

7.6 Conclusão

Abordaram-se, neste capítulo, as ferramentas empregadas para a devida implementação da metodologia proposta. Foram especificados os parâmetros utilizados para a realização das simulações. Também, apresentou-se todo o processo de concepção dos Módulos Classificadores. Dentro desta abordagem deve-se ressaltar que, o “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” é composto por 4 conjuntos nebulosos e 12 regras nebulosas e o “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” contém 6 conjuntos nebulosos e 23 regras nebulosas. Esse aumento de conjuntos e regras nebulosas dar-se-á como consequência da capacidade de discriminação de níveis de impedância de falta pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”.

Tendo composto todo processo de especificação e adequação de parâmetros pôde-se extrair os resultados de diagnósticos realizados pelos Módulos Classificadores, que serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 8.

Resultados Obtidos e Discussões

8.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos considerando-se a aplicação da metodologia proposta. Desta maneira, será explicitado o percentual de acerto dos Módulos Classificadores: “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” e “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”, considerando os 850 casos de curto-circuito simulados sob as diversas condições de falta (resistência de falta, ângulo de inserção, localização e carregamento do sistema) e 3 casos do sistema em operação normal, operando com carregamentos de 60, 80 e 100 %.

8.2 Resultados Gerais

Considerando os conjuntos de regras das Tabelas 3 e 4 e as definições dos conjuntos nebulosos expressas em 7.5.1 e 7.5.2, obteve-se o percentual de acerto dos “Módulos

Classificadores”, tendo como base os casos de curtos-circuitos simulados. Estes resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Percentual de acerto dos “Módulos Classificadores”.

Módulo Classificador	Carregamento do Sistema		
	100 %	80 %	60 %
Sem Distinção de Níveis de Impedância	100 %	100 %	100 %
Com Distinção de Níveis de Impedância	100 %	100 %	96 %

A Tabela 5 apresenta uma idéia geral da eficiência dos “Módulos Classificadores”, porém não minudencia seu comportamento para cada tipo de falta. Visando uma melhor análise, no próximo tópico, serão detalhados os resultados obtidos pelos “Módulos Classificadores”.

8.3 Resultados Detalhados

A seguir, serão apresentados de forma detalhada os resultados obtidos pelos “Módulos Classificadores” e as discussões necessárias para a devida compreensão de todo o processo de diagnóstico.

8.3.1 Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância

Primeiramente, serão apresentados nas Tabelas 6 e 7 os resultados detalhados obtidos pelo “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”, e na seqüência realizar-se-á uma análise crítica dos fatores que influenciam no desempenho deste módulo.

Tabela 6: Capacidade de identificação do sistema em operação normal pelo “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”.

Estado do Sistema	Carregamento do Sistema		
	100 %	80 %	60 %
Operação Normal	100 %	100 %	100 %

Tabela 7: Percentual de acerto do “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”.

Tipo de Falta	Carregamento do Sistema		
	100 %	80 %	60 %
<i>a-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>b-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>c-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ab-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>bc-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ca-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ab</i>	100 %	100 %	100 %
<i>bc</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ca</i>	100 %	100 %	100 %
<i>abc(g)</i>	100 %	100 %	100 %

8.3.1.1 Influência da Resistência de Falta

A influência exercida pela resistência de falta no diagnóstico do “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”, teoricamente, consiste em: quanto

maior a resistência de falta maior será a dificuldade para realizar a devida classificação. Isto decorre do fato do valor máximo da corrente de falta, em casos de alta resistência de falta, não ser muito superior à corrente nominal do sistema (vide Figura 22), possibilitando assim que possa ocorrer não diferenciação entre casos faltosos e o sistema em operação normal. Na prática, observando as simulações realizadas, presentes no Anexo B, nas quais também consideram-se os casos extremos de resistência de falta, $R_f = 100 \Omega$, e os resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7, nota-se claramente a robustez da metodologia empregada, o “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” foi capaz de identificar corretamente os estados do sistema, demonstrando assim sua baixa sensibilidade à resistência de falta.

8.3.1.2 Influência da Localização da Falta

Quanto a influência exercida pela distância em que a falta ocorre, é notório que faltas aplicadas no início do alimentador serão de maior facilidade de classificação que faltas aplicadas no fim do alimentador, isso porque faltas ocorridas no início do alimentador geram correntes elevadíssimas, enquanto faltas ocorridas no fim do alimentador geram correntes inferiores. Isto é observado na metodologia empregada, basta observar que para faltas no início do alimentador os índices d_a e/ou d_b e/ou d_c (2 destes) possuem valores extremos, conseqüentemente os índices d_1 , d_2 e d_3 são dispersos (Anexo B – página 81), enquanto em faltas no fim do alimentador são mais próximos (Anexo B – página 87). Contudo, pelos resultados obtidos pelo “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” têm-se também uma baixa sensibilidade à variação deste fator de influência.

8.3.1.3 Influência do Ângulo de Inserção de Falta

A metodologia empregada nesta dissertação elimina qualquer influência do ângulo de inserção de falta sobre o diagnóstico do estado do sistema. Analisando os índices d_1 , d_2 e d_3 ,

presentes no Anexo B (comparar as tabelas presentes nas páginas 81 e 108), observa-se a insignificante variação destes para diferentes ângulos de inserção de falta.

8.3.1.4 Influência do Carregamento do Sistema

A redução do carregamento do sistema torna os índices d_1 , d_2 e d_3 , em caso de falta, mais dispersos quando comparados ao carregamento nominal (comparar as tabelas presentes nas páginas 84 e 102). Isso deve-se ao fato das correntes nominais, para carregamentos menores, serem também menores, ocorrendo uma falta, a razão entre a corrente de falta e a nominal proporcionará valores maiores para baixos carregamentos, o que ocasionará a dispersão dos índices. Avaliando os resultados obtidos pelo “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” nota-se a baixa influência do carregamento do sistema no diagnóstico.

8.3.2 Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância

As Tabelas 8 e 9 apresentam detalhadamente os resultados obtidos pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”, e subseqüentemente também será realizada uma análise crítica dos fatores que influenciam no desempenho deste módulo.

Tabela 8: Capacidade de identificação do sistema em operação normal pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”.

Estado do Sistema	Carregamento do Sistema		
	100 %	80 %	60 %
Operação Normal	100 %	100 %	100 %

Tabela 9: Percentual de acerto do “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”.

Tipo de Falta	Carregamento do Sistema		
	100 %	80 %	60 %
<i>a-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>b-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>c-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ab-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>bc-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ca-g</i>	100 %	100 %	100 %
<i>ab</i>	100 %	100 %	86,7 %
<i>bc</i>	100 %	100 %	86,7 %
<i>ca</i>	100 %	100 %	86,7 %
<i>abc(g)</i>	100 %	100 %	100 %

Primeiramente, deve-se ressaltar, que o erro de classificação do “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”, encontrado nas faltas fase-fase para carregamento de 60 %, consiste na classificação errônea do nível de impedância da falta, e não do tipo de falta.

Feito esta observação, será realizada a análise crítica dos fatores que influenciam no diagnóstico do estado do sistema. Esta análise será realizada diferentemente do que foi feito para o “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância”, onde discutiu-se separadamente cada fator de influência. Neste, em uma única discussão, serão englobados todos os fatores, focando nos parâmetros mais críticos.

Antes de iniciar a discussão, deve-se destacar também, que a influência de cada fator no comportamento dos índices d_1 , d_2 e d_3 continua a mesma. Por conseguinte, na abordagem relacionada ao “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” tem-se um maior número de conjuntos nebulosos, devido sua capacidade de discriminação de níveis de impedância. Desta forma, uma não dispersão (não caracterização plena) dos índices poderá com maior facilidade ocasionar erros de diagnóstico.

8.3.2.1 Análise dos Fatores que Influenciam no Diagnóstico

A identificação do sistema operando normalmente foi realizada corretamente pelo “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância”. Quanto à classificação de faltas, obteve-se 86,7 % de acertos nas faltas fase-fase com 60 % de carregamento e 100 % de acerto para as demais. Este erro de diagnóstico de impedância de falta, já que o tipo de falta foi classificado corretamente, ocorreu basicamente por causa da influência conjunta de 3 fatores: carregamento do sistema, localização da falta e a resistência de falta, os quais serão explicados no próximo parágrafo. O ângulo de inserção de falta não possui influência sobre este diagnóstico.

A redução do carregamento do sistema juntamente com a inserção de falta no início do alimentador fez com d_a e/ou d_b e/ou d_c (2 destes) tivessem valores extremos, mesmo considerando a resistência de falta alta, a qual teoricamente seria um atenuador destes índices. Isso fez com que o “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” classificasse a falta de alta impedância como sendo de baixa, ou seja, a alta resistência de falta não foi capaz de sobrepor os efeitos da localização e do carregamento fazendo com que o módulo a classificasse como sendo de baixa impedância. Esta conclusão pode ser facilmente entendida observando a influência de cada fator separadamente, como foi feito em 8.3.1.1, 8.3.1.2 e 8.3.1.4.

8.4 Conclusão

Foram apresentados, neste capítulo, os resultados obtidos na aplicação da metodologia para diagnóstico do estado do sistema de distribuição de energia elétrica. Analisando as Tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 verifica-se a robustez e eficiência dos “Módulos Classificadores”.

Com objetivo de contemplar de forma integral o entendimento de todo o processo de classificação e de compreensão de resultados, relatou-se detalhadamente como os parâmetros (resistência de falta, localização, ângulo de inserção e carregamento do sistema) influenciam no diagnóstico do estado do sistema.

Os resultados obtidos foram extremamente satisfatórios e incentivadores. Por conseguinte, visando maximizar o desempenho do processo, pode-se incorporar ao sistema um procedimento adaptativo, o qual obterá o posicionamento dos vértices dos conjuntos nebulosos, que definem o desempenho da inferência. Uma forma de implementar este

dispositivo é através do emprego das redes neurais ([6, 24]), principalmente as arquiteturas ART (*Adaptive Resonance Theory*) ([6]).

Capítulo 9.

Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros

9.1 Conclusões

Consciente dos danos causados pelos curtos-circuitos nos sistemas de energia elétrica e da necessidade de ferramentas de auxílio à tomada de decisão, propôs-se nesta dissertação o desenvolvimento de algoritmos inteligentes modulares para realização do diagnóstico (robusto e rápido) do estado do sistema.

A metodologia empregada baseia-se nas informações de corrente elétrica das três fases na saída do alimentador da subestação. Buscou-se estabelecer um procedimento de extração das características do estado do sistema com baixa sensibilidade ao perfil da carga, localização da falta, distorção da forma de onda, etc. Neste sentido, foram usados os conceitos da lógica nebulosa para extrair o conhecimento do processo e, assim, realizar a automação de forma eficiente.

Ao longo do trabalho, implementaram-se dois “Módulos Classificadores”. Primeiramente, o “Módulo Classificador Sem Distinção de Níveis de Impedância” que detecta e classifica o estado do sistema, e após, o “Módulo Classificador Com Distinção de Níveis de Impedância” que fornece a informação adicional do nível de impedância da falta.

Os resultados referentes aos diagnósticos realizados pelos “Módulos Classificadores” foram apresentados no Capítulo 8. Observa-se que a metodologia empregada obteve ótimos resultados, já que nos dois módulos o percentual de acerto foi acima de 95 %.

Entre os fatores que afetam o desempenho desses módulos destacaram-se o carregamento do sistema, a resistência de falta e a localização da falta. Sendo que, dentre esses, a variação do carregamento do sistema foi a que ocasionou menor influência. Contudo, a influência destes fatores não foi suficiente para que os “Módulos Classificadores” classificassem erroneamente o tipo de falta, demonstrando a *robustez* do procedimento adotado. O tempo de simulação de cada caso foi aproximadamente de 10^{-1} s, o que comprova a *rapidez* de diagnóstico usando de sistemas inteligentes (lógica nebulosa).

Sendo assim, pode-se considerar a metodologia proposta como sendo encorajadora e promissora.

9.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Visando otimizar os resultados obtidos e aperfeiçoar a metodologia proposta, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Inclusão de um módulo neural baseado nas arquiteturas ART;
- Aplicação desta metodologia em outras subestações de distribuição de energia elétrica;
- Aperfeiçoamento do modelo do sistema, *e.g.*, implementação de cargas não-lineares, geração distribuída, etc;
- Estudo de caso utilizando dados obtidos de alimentadores reais.

Referências

- [1] ALAG, S.; AGOGINO, A. M. ;MORJARIA, M. A methodology for intelligent sensor measurement, validation, fusion, and fault detection for equipment monitoring and diagnosis. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, London, n.15, p. 307-320, 2001.
- [2] ALMEIDA, M. A. D. **Apostila de proteção de sistemas elétricos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2000.
- [3] Alternative Transients Program (ATP), RuleBook, **EMTP-ATP Users Group**, SINTEF Energy Research, Canada, 2007.
- [4] BUTLER, K. L.; MOMOH, J. A. ;SOBAJIC, D. J. Field studies using a neural-net-based approach for fault diagnosis in distribution networks. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, New York, v.144, n.5, p. 429-436, 1997.
- [5] CARDOSO, G.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Sba Controle & Automação**, São Paulo, v.15, n.2, p. 215-229, 2004.
- [6] CARPENTER, G. A. ; GROSSBERG, S. A self-organizing neural network for supervised learning, recognition and prediction. **IEEE Communications Magazine**, New York, v.30, n.9, p. 38-49, 1992.
- [7] CHEN, G. ; PHAM, T. T. **Introduction to fuzzy systems**. New York: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [8] CRAN, A. J. **Investigation into harmonics and switching transients at substations equipped with capacitor banks using ATP software**. Queensland: Faculty of Engineering & Physical Systems Central Queensland University.

- [9] FELTRIN, A. P. ; MANTOVANI, J. R. S. **Apostila de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005.
- [10] GUIGUER, S. **Proteção de sistemas de distribuição**. Porto Alegre: Sagra, 1988.
- [11] JOTA, F. G. ; JOTA, P. R. S. High impedance fault identification using a fuzzy reasoning system. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, New York, v.145, n.6, p. 656-662, 1998.
- [12] KEZUNOVIC, M. ;VASILIC, S. Fuzzy ART neural network algorithm for classifying the power system faults. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.20, n.2, p. 1306-1314, 2005.
- [13] KEZUNOVIC, M. ; ZHANG, N. Implementing an advanced simulation tool for comprehensive fault analysis. **IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition**, Asia-Pacific, Dalian, China, p. 1-6, August 2005.
- [14] KEZUNOVIC, M. Intelligent applications in substations: disturbance analysis. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, New York, v.1, p. 719-723, 2004.
- [15] KEZUNOVIC, M. ; ABUR, A. Merging the temporal and spatial aspects of data and information for improved power system monitoring applications. **Proceedings of the IEEE**, New York, v.93, n.11, p. 1909-1119, 2005.
- [16] KEZUNOVIC, M. Practical applications of automated fault analysis. **Proceedings of International Conference on Power System Technology**, Perth, Austrália, Vol. 2, p. 819-824, 2000.
- [17] LEÃO, R. P. S. **Elementos de sistemas de potência**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará/Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.
- [18] 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.
- [19] MAHANTY, R. N. AND DUTTA GUPTA, P.B. A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only. **Electric Power Systems Research**, Lausanne,

v.77, n.6/7, p. 501–507, 2007.

- [20] MAHSEREDJIAN, J. ;BENMOUYAL, G. A link between EMTP and MATLAB for user-defined modeling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.13, n.2, p.667-674, 1998.
- [21] Matlab, **The language of technical computing**, Versão 7.0.1.24704 (R14) Service Pack 1, Copyright, The MathWorks, Inc., 2004.
- [22] McDONALD, J. D. **Electric power substations engineering**. New York: CRC Press, 2003.
- [23] McNEIL, F. M. ; THRO, E. **Fuzzy logic a practical approach**. Boston: Academic Press, 1994.
- [24] MINUSSI, C. R. **Apostila de redes neurais artificiais**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.
- [25] 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**. Projeto ANEEL-Grupo Rede-FEPISA, Proc. 0388-020/2004, Março 2007. (Relatório Técnico-Científico)
- [26] MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Massachusetts: The MIT Press 1996.
- [27] ROMERO, R.; SILVA, I. ; RIDER M. Uma metaheurística eficiente para a otimização de problemas complexos em sistemas de energia elétrica. In: **ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA**, 16, Salvador, p. 423-428, 2006.
- [28] SANTOSO, S.; POWERS, E. J. ; GRADY, W. M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.12, n.3, p.1250-1257, 1997.
- [29] TERANO, T.; SUGENO, M.; ASAI, K. **Applied fuzzy systems**. Boston: Academic Press, 1994.

- [30] Users' Manual, ATPDRAW, version 3.5, **EMTP-ATP Users Group**, SINTEF Energy Research, Noruega, 2002.
- [31] VIJAYAKUMAR, R. ;HARISHANKAR, T. Substation automation using ART 1 based neural network. In: **IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND CONTROL (IA & C'95)**, n.95TH8005, Hyderabad, India, p. 323-328, 1995 .
- [32] WAKILEH, J. J. ; PAHWA, A. Optimization of distribution system design to accomodate cold load pickup. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.12, n.1, p.339-345, 1997.
- [33] YOUSSEF, O. A. S. Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.19, n.2, p.582-589, 2004.
- [34] ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, New York, v.8, n.3, p.338-353, 1965.

Anexo A

Sistema de Distribuição Simulado no ATP

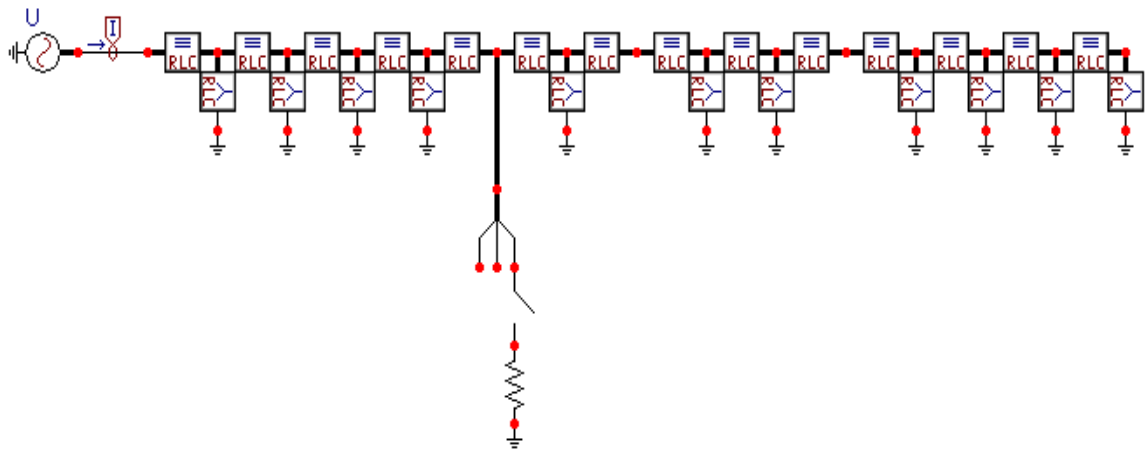


Figura 28: Implementação do sistema de distribuição simulado.

Anexo B

Características dos Estados do Sistema

Tabela 10: Comportamento dos índices d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 sob as diversas condições de falta.

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V_a)	R_f (Ω)	100 % do carregamento				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-G	0	0.1	0.8950	0.0940	-0.9890	1	1
		2	0.7953	0.1628	-0.9581	1	1
		10	0.5275	0.2494	-0.7768	1	1
		50	0.1921	0.1556	-0.3476	1	1
		100	0.1064	0.0956	-0.2020	1	1
B-G	0	0.1	-0.9879	0.8901	0.0978	1	1
		2	-0.9579	0.7948	0.1630	1	1
		10	-0.7766	0.5275	0.2491	1	1
		50	-0.3473	0.1924	0.1549	1	1
		100	-0.2022	0.1071	0.0951	1	1
C-G	0	0.1	0.0962	-0.9884	0.8922	1	1
		2	0.1631	-0.9579	0.7949	1	1
		10	0.2493	-0.7767	0.5274	1	1
		50	0.1552	-0.3473	0.1920	1	1
		100	0.0954	-0.2021	0.1067	1	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra 1)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.8850	0.9885	-0.1034	1	1
		2	-0.7942	0.9580	-0.1639	1	1
		10	-0.5271	0.7768	-0.2496	1	1
		50	-0.1920	0.3476	-0.1556	1	1
		100	-0.1070	0.2023	-0.0953	1	1
AC-G	0	0.1	0.9887	-0.0910	-0.8977	1	1
		2	0.9580	-0.1622	-0.7959	1	1
		10	0.7767	-0.2491	-0.5277	1	1
		50	0.3474	-0.1550	-0.1924	1	1
		100	0.2020	-0.0955	-0.1065	1	1
BC-G	0	0.1	-0.0939	-0.8942	0.9881	1	1
		2	-0.1629	-0.7950	0.9579	1	1
		10	-0.2490	-0.5276	0.7766	1	1
		50	-0.1551	-0.1921	0.3472	1	1
		100	-0.0953	-0.1067	0.2020	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0624	0.0069	-0.0693	0	1
		2	0.0037	0.0018	-0.0055	0	1
		10	0.000857	-0.000069	-0.000788	0	1
		50	0.000278	0.000136	-0.000414	0	1
		100	-0.000114	-0.000160	0.000274	0	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra I)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.8727	0.9855	-0.1128	0	1
		2	-0.8161	0.9680	-0.1520	0	1
		10	-0.6457	0.8597	-0.2140	0	1
		50	-0.3311	0.4643	-0.1332	0	1
		100	-0.2078	0.2847	-0.0769	0	1
		0.1	0.9858	-0.1115	-0.8743	0	1
AC	0	2	0.9684	-0.1506	-0.8178	0	1
		10	0.8598	-0.2136	-0.6462	0	1
		50	0.4643	-0.1333	-0.3310	0	1
		100	0.2847	-0.0768	-0.2080	0	1
		0.1	-0.1156	-0.8692	0.9849	0	1
		2	-0.1519	-0.8162	0.9681	0	1
BC	0	10	-0.2140	-0.6456	0.8597	0	1
		50	-0.1332	-0.3310	0.4642	0	1
		100	-0.0770	-0.2076	0.2845	0	1

Estado do Sistema	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
Operação Normal	-0.000168	0.000416	-0.000248	0	0

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	0	0.1	0.6959	0.2117	-0.9076	1	1
		2	0.6234	0.2349	-0.8582	1	1
		10	0.4239	0.2444	-0.6683	1	1
		50	0.1569	0.1327	-0.2897	1	1
		100	0.0874	0.0802	-0.1676	1	1
B-G	0	0.1	-0.8983	0.6813	0.2171	1	1
		2	-0.8538	0.6178	0.2360	1	1
		10	-0.6673	0.4234	0.2439	1	1
		50	-0.2894	0.1573	0.1321	1	1
		100	-0.1670	0.0876	0.0794	1	1
C-G	0	0.1	0.2149	-0.9022	0.6873	1	1
		2	0.2357	-0.8552	0.6195	1	1
		10	0.2441	-0.6673	0.4232	1	1
		50	0.1325	-0.2895	0.1571	1	1
		100	0.0799	-0.1674	0.0875	1	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.6656	0.9031	-0.2374	1	1
		2	-0.6118	0.8561	-0.2443	1	1
		10	-0.4223	0.6679	-0.2455	1	1
		50	-0.1570	0.2897	-0.1327	1	1
		100	-0.0871	0.1675	-0.0804	1	1
AC-G	0	0.1	0.9049	-0.2005	-0.7044	1	1
		2	0.8567	-0.2294	-0.6273	1	1
		10	0.6678	-0.2429	-0.4249	1	1
		50	0.2895	-0.1324	-0.1571	1	1
		100	0.1674	-0.0798	-0.0876	1	1
BC-G	0	0.1	-0.2070	-0.6933	0.9003	1	1
		2	-0.2331	-0.6214	0.8545	1	1
		10	-0.2440	-0.4232	0.6672	1	1
		50	-0.1322	-0.1572	0.2894	1	1
		100	-0.0793	-0.0878	0.1671	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0649	0.0080	-0.0729	0	1
		2	0.0201	0.0053	-0.0254	0	1
		10	0.0017	0.0014	-0.0031	0	1
		50	0.000329	-0.000184	-0.000144	0	1
		100	0.0000646	-0.000253	-0.000393	0	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V_a)	R_f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
AB	0	0.1	-0.5941	0.8783	-0.2842	0	1
		2	-0.5579	0.8481	-0.2902	0	1
		10	-0.4502	0.7258	-0.2756	0	1
		50	-0.2376	0.3823	-0.1448	0	1
		100	-0.1498	0.2341	-0.0843	0	1
AC	0	0.1	0.8789	-0.2827	-0.5962	0	1
		2	0.8492	-0.2883	-0.5609	0	1
		10	0.7270	-0.2735	-0.4535	0	1
		50	0.3825	-0.1440	-0.2385	0	1
		100	0.2341	-0.0838	-0.1502	0	1
BC	0	0.1	-0.2968	-0.5745	0.8713	0	1
		2	-0.2970	-0.5471	0.8441	0	1
		10	-0.2755	-0.4501	0.7256	0	1
		50	-0.1449	-0.2372	0.3821	0	1
		100	-0.0845	-0.1493	0.2337	0	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	0	0.1	0.4970	0.2501	-0.7471	1	1
		2	0.4578	0.2484	-0.7062	1	1
		10	0.3391	0.2244	-0.5635	1	1
		50	0.1403	0.1211	-0.2614	1	1
		100	0.0800	0.0741	-0.1541	1	1
B-G	0	0.1	-0.7251	0.4759	0.2492	1	1
		2	-0.6926	0.4458	0.2469	1	1
		10	-0.5605	0.3373	0.2232	1	1
		50	-0.2607	0.1404	0.1202	1	1
		100	-0.1536	0.0803	0.0733	1	1
C-G	0	0.1	0.2498	-0.7341	0.4844	1	1
		2	0.2475	-0.6975	0.4500	1	1
		10	0.2236	-0.5610	0.3374	1	1
		50	0.1206	-0.2607	0.1402	1	1
		100	0.0736	-0.1536	0.0800	1	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.4535	0.7364	-0.2829	1	1
		2	-0.4330	0.6996	-0.2666	1	1
		10	-0.3349	0.5621	-0.2272	1	1
		50	-0.1399	0.2612	-0.1213	1	1
		100	-0.0798	0.1540	-0.0742	1	1
AC-G	0	0.1	0.7407	-0.2312	-0.5095	1	1
		2	0.7018	-0.2361	-0.4658	1	1
		10	0.5622	-0.2211	-0.3411	1	1
		50	0.2610	-0.1202	-0.1408	1	1
		100	0.1538	-0.0734	-0.0803	1	1
BC-G	0	0.1	-0.2367	-0.4929	0.7296	1	1
		2	-0.2406	-0.4544	0.6950	1	1
		10	-0.2229	-0.3378	0.5607	1	1
		50	-0.1203	-0.1403	0.2606	1	1
		100	-0.0734	-0.0801	0.1535	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0568	0.0077	-0.0644	0	1
		2	0.0302	0.0063	-0.0365	0	1
		10	0.0040	0.0021	-0.0062	0	1
		50	0.000599	0.000189	-0.000788	0	1
		100	0.000398	0.000083	-0.000481	0	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.3233	0.6832	-0.3599	0	1
		2	-0.3125	0.6604	-0.3478	0	1
		10	-0.2759	0.5747	-0.2988	0	1
		50	-0.1780	0.3297	-0.1517	0	1
		100	-0.1209	0.2095	-0.0885	0	1
AC	0	0.1	0.6837	-0.3592	-0.3244	0	1
		2	0.6613	-0.3467	-0.3146	0	1
		10	0.5765	-0.2964	-0.2801	0	1
		50	0.3301	-0.1506	-0.1795	0	1
		100	0.2096	-0.0882	-0.1214	0	1
BC	0	0.1	-0.3805	-0.2856	0.6660	0	1
		2	-0.3631	-0.2845	0.6476	0	1
		10	-0.3031	-0.2680	0.5711	0	1
		50	-0.1517	-0.1777	0.3294	0	1
		100	-0.0883	-0.1206	0.2089	0	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V_a)	R_f (Ω)	Início do alimentador (Barra 1)				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-G	0	0.1	0.9134	0.0791	-0.9925	1	1
		2	0.8293	0.1416	-0.9708	1	1
		10	0.5843	0.2428	-0.8271	1	1
		50	0.2307	0.1772	-0.4078	1	1
		100	0.1311	0.1135	-0.2446	1	1
B-G	0	0.1	-0.9918	0.9093	0.0825	1	1
		2	-0.9707	0.8287	0.1419	1	1
		10	-0.8269	0.5840	0.2429	1	1
		50	-0.4078	0.2305	0.1773	1	1
		100	-0.2443	0.1307	0.1135	1	1
C-G	0	0.1	0.0811	-0.9921	0.9110	1	1
		2	0.1419	-0.9707	0.8288	1	1
		10	0.2431	-0.8269	0.5838	1	1
		50	0.1776	-0.4080	0.2303	1	1
		100	0.1139	-0.2443	0.1304	1	1

Estado do sistema	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Operação Normal	0.000382	-0.000121	-0.000261	0	0

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra 1)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.9050	0.9921	-0.0871	1	1
		2	-0.8282	0.9707	-0.1425	1	1
		10	-0.5838	0.8270	-0.2432	1	1
		50	-0.2306	0.4078	-0.1772	1	1
		100	-0.1306	0.2444	-0.1138	1	1
AC-G	0	0.1	0.9923	-0.0767	-0.9156	1	1
		2	0.9708	-0.1412	-0.8296	1	1
		10	0.8270	-0.2426	-0.5844	1	1
		50	0.4080	-0.1776	-0.2304	1	1
		100	0.2446	-0.1135	-0.1311	1	1
BC-G	0	0.1	-0.0792	-0.9127	0.9919	1	1
		2	-0.1417	-0.8290	0.9707	1	1
		10	-0.2430	-0.5839	0.8269	1	1
		50	-0.1773	-0.2305	0.4078	1	1
		100	-0.1137	-0.1305	0.2442	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0633	0.0067	-0.0699	0	1
		2	0.0037	0.0013	-0.0050	0	1
		10	0.000223	0.000620	-0.000843	0	1
		50	-0.000072	-0.000157	0.000229	0	1
		100	0.000028	0.000308	-0.000336	0	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra I)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.8957	0.9901	-0.0944	0	1
		2	-0.8478	0.9780	-0.1302	0	1
		10	-0.6945	0.8966	-0.2022	0	1
		50	-0.3813	0.5337	-0.1524	0	1
		100	-0.2468	0.3396	-0.0927	0	1
AC	0	0.1	0.9903	-0.0933	-0.8970	0	1
		2	0.9783	-0.1290	-0.8492	0	1
		10	0.8968	-0.2020	-0.6948	0	1
		50	0.5340	-0.1526	-0.3814	0	1
		100	0.3401	-0.0928	-0.2473	0	1
BC	0	0.1	-0.0967	-0.8930	0.9897	0	1
		2	-0.1300	-0.8480	0.9780	0	1
		10	-0.2024	-0.6943	0.8966	0	1
		50	-0.1525	-0.3813	0.5338	0	1
		100	-0.0927	-0.2470	0.3397	0	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	0	0.1	0.7460	0.1894	-0.9355	1	1
		2	0.6814	0.2170	-0.8984	1	1
		10	0.4899	0.2498	-0.7397	1	1
		50	0.1966	0.1576	-0.3542	1	1
		100	0.1118	0.0989	-0.2107	1	1
B-G	0	0.1	-0.9288	0.7332	0.1956	1	1
		2	-0.8951	0.6762	0.2189	1	1
		10	-0.7388	0.4889	0.2498	1	1
		50	-0.3538	0.1962	0.1576	1	1
		100	-0.2106	0.1116	0.0990	1	1
C-G	0	0.1	0.1932	-0.9317	0.7385	1	1
		2	0.2185	-0.8962	0.6778	1	1
		10	0.2500	-0.7391	0.4891	1	1
		50	0.1579	-0.3536	0.1958	1	1
		100	0.0994	-0.2107	0.1113	1	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.7198	0.9322	-0.2125	1	1
		2	-0.6710	0.8968	-0.2258	1	1
		10	-0.4881	0.7392	-0.2511	1	1
		50	-0.1960	0.3539	-0.1580	1	1
		100	-0.1116	0.2106	-0.0990	1	1
AC-G	0	0.1	0.9336	-0.1804	-0.7532	1	1
		2	0.8974	-0.2126	-0.6847	1	1
		10	0.7394	-0.2491	-0.4903	1	1
		50	0.3540	-0.1573	-0.1967	1	1
		100	0.2108	-0.0992	-0.1116	1	1
BC-G	0	0.1	-0.1864	-0.7438	0.9302	1	1
		2	-0.2162	-0.6795	0.8957	1	1
		10	-0.2495	-0.4895	0.7389	1	1
		50	-0.1578	-0.1958	0.3536	1	1
		100	-0.0991	-0.1115	0.2105	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0671	0.0077	-0.0748	0	1
		2	0.0208	0.0055	-0.0262	0	1
		10	0.0021	0.000475	-0.0026	0	1
		50	0.000048	0.000540	-0.000588	0	1
		100	-0.000059	-0.000021	0.000081	0	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.6643	0.9139	-0.2496	0	1
		2	-0.6299	0.8911	-0.2612	0	1
		10	-0.5230	0.7919	-0.2689	0	1
		50	-0.2930	0.4584	-0.1654	0	1
		100	-0.1903	0.2907	-0.1004	0	1
AC	0	0.1	0.9148	-0.2479	-0.6669	0	1
		2	0.8923	-0.2589	-0.6334	0	1
		10	0.7931	-0.2667	-0.5264	0	1
		50	0.4589	-0.1649	-0.2940	0	1
		100	0.2913	-0.1005	-0.1908	0	1
BC	0	0.1	-0.2596	-0.6496	0.9092	0	1
		2	-0.2664	-0.6220	0.8885	0	1
		10	-0.2688	-0.5231	0.7919	0	1
		50	-0.1657	-0.2926	0.4583	0	1
		100	-0.1008	-0.1898	0.2906	0	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	0	0.1	0.5654	0.2456	-0.8110	1	1
		2	0.5267	0.2492	-0.7759	1	1
		10	0.4044	0.2407	-0.6451	1	1
		50	0.1782	0.1461	-0.3243	1	1
		100	0.1037	0.0925	-0.1962	1	1
B-G	0	0.1	-0.7933	0.5454	0.2479	1	1
		2	-0.7648	0.5150	0.2497	1	1
		10	-0.6425	0.4021	0.2404	1	1
		50	-0.3240	0.1779	0.1461	1	1
		100	-0.1961	0.1035	0.0926	1	1
C-G	0	0.1	0.2473	-0.8008	0.5536	1	1
		2	0.2498	-0.7688	0.5191	1	1
		10	0.2407	-0.6430	0.4023	1	1
		50	0.1466	-0.3243	0.1777	1	1
		100	0.0931	-0.1964	0.1033	1	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.5245	0.8023	-0.2778	1	1
		2	-0.5032	0.7704	-0.2672	1	1
		10	-0.4000	0.6438	-0.2438	1	1
		50	-0.1778	0.3241	-0.1463	1	1
		100	-0.1035	0.1961	-0.0926	1	1
AC-G	0	0.1	0.8060	-0.2295	-0.5766	1	1
		2	0.7724	-0.2386	-0.5338	1	1
		10	0.6441	-0.2381	-0.4061	1	1
		50	0.3244	-0.1464	-0.1780	1	1
		100	0.1964	-0.0931	-0.1034	1	1
BC-G	0	0.1	-0.2352	-0.5619	0.7971	1	1
		2	-0.2435	-0.5233	0.7668	1	1
		10	-0.2399	-0.4028	0.6427	1	1
		50	-0.1461	-0.1780	0.3241	1	1
		100	-0.0926	-0.1035	0.1961	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0613	0.0072	-0.0685	0	1
		2	0.0322	0.0065	-0.0387	0	1
		10	0.0041	0.0023	-0.0064	0	1
		50	0.000172	-0.000140	-0.00003	0	1
		100	0.000051	-0.000245	0.000194	0	1

80 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.4097	0.7571	-0.3474	0	1
		2	-0.3959	0.7369	-0.3410	0	1
		10	-0.3496	0.6576	-0.3080	0	1
		50	-0.2293	0.4041	-0.1748	0	1
		100	-0.1583	0.2645	-0.1062	0	1
AC	0	0.1	0.7586	-0.3454	-0.4132	0	1
		2	0.7387	-0.3387	-0.4000	0	1
		10	0.6601	-0.3052	-0.3549	0	1
		50	0.4048	-0.1742	-0.2306	0	1
		100	0.2650	-0.1059	-0.1591	0	1
BC	0	0.1	-0.3652	-0.3790	0.7442	0	1
		2	-0.3541	-0.3732	0.7273	0	1
		10	-0.3110	-0.3444	0.6554	0	1
		50	-0.1749	-0.2292	0.4041	0	1
		100	-0.1061	-0.1582	0.2642	0	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V_a)	$R_f (\Omega)$	Início do alimentador (Barra A)				
			d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
A-G	0	0.1	0.9873	0.0126	-0.9998	1	1
		2	0.9157	0.0772	-0.9929	1	1
		10	0.6959	0.2116	-0.9075	1	1
		50	0.3112	0.2143	-0.5256	1	1
		100	0.1832	0.1496	-0.3328	1	1
		0.1	-0.9998	0.9871	0.0128	1	1
B-G	0	2	-0.9929	0.9157	0.0772	1	1
		10	-0.9075	0.6958	0.2117	1	1
		50	-0.5260	0.3113	0.2147	1	1
		100	-0.3337	0.1835	0.1502	1	1
		0.1	0.0127	-0.9998	0.9871	1	1
		2	0.0772	-0.9929	0.9157	1	1
C-G	0	10	0.2116	-0.9075	0.6960	1	1
		50	0.2142	-0.5256	0.3114	1	1
		100	0.1494	-0.3327	0.1833	1	1
		Estado do sistema	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
Operação Normal	-0.000127	-0.000191	0.000319	0	0		

OBS: Para estes casos os curtos-circuitos foram aplicados na Barra A, a qual corresponde ao ponto que fica a 2 km da fonte, ou seja, foi aplicado curto-circuito no primeiro trecho do sistema (na linha), entre as barras 0 e 1.

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra A)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.9869	0.9998	-0.0130	1	1
		2	-0.9157	0.9929	-0.0772	1	1
		10	-0.6958	0.9075	-0.2117	1	1
		50	-0.3117	0.5257	-0.2140	1	1
		100	-0.1841	0.3332	-0.1491	1	1
AC-G	0	0.1	0.9998	-0.0124	-0.9874	1	1
		2	0.9929	-0.0772	-0.9157	1	1
		10	0.9075	-0.2117	-0.6958	1	1
		50	0.5255	-0.2143	-0.3113	1	1
		100	0.3328	-0.1494	-0.1833	1	1
BC-G	0	0.1	-0.0126	-0.9872	0.9998	1	1
		2	-0.0772	-0.9157	0.9929	1	1
		10	-0.2116	-0.6960	0.9075	1	1
		50	-0.2149	-0.3110	0.5259	1	1
		100	-0.1507	-0.1826	0.3333	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0198	0.0051	-0.0249	0	1
		2	-0.000105	0.000299	-0.000194	0	1
		10	0.000205	-0.000255	0.00005	0	1
		50	-0.000820	0.000536	0.000284	0	1
		100	-0.0013	0.000906	0.000417	0	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra A)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.9871	0.9998	-0.0127	0	1
		2	-0.9462	0.9970	-0.0508	0	1
		10	-0.8088	0.9569	-0.1481	0	1
		50	-0.4968	0.6639	-0.1671	0	1
		100	-0.3414	0.4521	-0.1106	0	1
AC	0	0.1	0.9998	-0.0125	-0.9873	0	1
		2	0.9970	-0.0508	-0.9462	0	1
		10	0.9569	-0.1481	-0.8089	0	1
		50	0.6640	-0.1672	-0.4968	0	1
		100	0.4521	-0.1109	-0.3412	0	1
BC	0	0.1	-0.0128	-0.9870	0.9998	0	1
		2	-0.0508	-0.9462	0.9970	0	1
		10	-0.1480	-0.8089	0.9569	0	1
		50	-0.1455	-0.5296	0.6751	0	1
		100	-0.1095	-0.3437	0.4532	0	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	0	0.1	0.8006	0.1596	-0.9602	1	1
		2	0.7463	0.1893	-0.9356	1	1
		10	0.5717	0.2449	-0.8165	1	1
		50	0.2542	0.1896	-0.4438	1	1
		100	0.1493	0.1270	-0.2763	1	1
B-G	0	0.1	-0.9560	0.7902	0.1658	1	1
		2	-0.9335	0.7421	0.1914	1	1
		10	-0.8161	0.5711	0.2450	1	1
		50	-0.4439	0.2541	0.1898	1	1
		100	-0.2760	0.1489	0.1271	1	1
C-G	0	0.1	0.1631	-0.9578	0.7947	1	1
		2	0.1907	-0.9342	0.7435	1	1
		10	0.2448	-0.8162	0.5713	1	1
		50	0.1895	-0.4440	0.2545	1	1
		100	0.1268	-0.2762	0.1494	1	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.7793	0.9582	-0.1788	1	1
		2	-0.7378	0.9346	-0.1967	1	1
		10	-0.5707	0.8163	-0.2457	1	1
		50	-0.2542	0.4438	-0.1896	1	1
		100	-0.1488	0.2761	-0.1272	1	1
AC-G	0	0.1	0.9591	-0.1527	-0.8063	1	1
		2	0.9349	-0.1858	-0.7491	1	1
		10	0.8163	-0.2442	-0.5721	1	1
		50	0.4439	-0.1897	-0.2542	1	1
		100	0.2762	-0.1268	-0.1494	1	1
BC-G	0	0.1	-0.1579	-0.7990	0.9569	1	1
		2	-0.1890	-0.7449	0.9339	1	1
		10	-0.2449	-0.5713	0.8162	1	1
		50	-0.1895	-0.2545	0.4441	1	1
		100	-0.1268	-0.1495	0.2762	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0695	0.0072	-0.0767	0	1
		2	0.0215	0.0056	-0.0270	0	1
		10	0.0013	0.000965	-0.0022	0	1
		50	0.000113	-0.000213	0.00010	0	1
		100	0.000424	-0.00005	-0.000371	0	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.7405	0.9464	-0.2059	0	1
		2	-0.7103	0.9311	-0.2208	0	1
		10	-0.6104	0.8597	-0.2494	0	1
		50	-0.3689	0.5594	-0.1905	0	1
		100	-0.2494	0.3740	-0.1246	0	1
AC	0	0.1	0.9471	-0.2040	-0.7431	0	1
		2	0.9321	-0.2186	-0.7134	0	1
		10	0.8605	-0.2477	-0.6128	0	1
		50	0.5596	-0.1904	-0.3692	0	1
		100	0.3742	-0.1245	-0.2497	0	1
BC	0	0.1	-0.2132	-0.7304	0.9436	0	1
		2	-0.2244	-0.7052	0.9296	0	1
		10	-0.2490	-0.6109	0.8599	0	1
		50	-0.1904	-0.3690	0.5594	0	1
		100	-0.1251	-0.2491	0.3742	0	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	0	0.1	0.6457	0.2288	-0.8745	1	1
		2	0.6095	0.2380	-0.8475	1	1
		10	0.4886	0.2499	-0.7385	1	1
		50	0.2347	0.1796	-0.4143	1	1
		100	0.1406	0.1208	-0.2613	1	1
B-G	0	0.1	-0.8620	0.6284	0.2336	1	1
		2	-0.8394	0.5991	0.2403	1	1
		10	-0.7366	0.4866	0.2500	1	1
		50	-0.4140	0.2343	0.1797	1	1
		100	-0.2612	0.1402	0.1210	1	1
C-G	0	0.1	0.2315	-0.8674	0.6359	1	1
		2	0.2393	-0.8424	0.6031	1	1
		10	0.2497	-0.7370	0.4873	1	1
		50	0.1793	-0.4140	0.2346	1	1
		100	0.1205	-0.2610	0.1406	1	1

60% do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	0	0.1	-0.6103	0.8683	-0.2580	1	1
		2	-0.5886	0.8435	-0.2548	1	1
		10	-0.4849	0.7375	-0.2526	1	1
		50	-0.2342	0.4141	-0.1799	1	1
		100	-0.1402	0.2612	-0.1209	1	1
AC-G	0	0.1	0.8710	-0.2157	-0.6553	1	1
		2	0.8449	-0.2290	-0.6159	1	1
		10	0.7377	-0.2477	-0.4900	1	1
		50	0.4141	-0.1791	-0.2350	1	1
		100	0.2611	-0.1203	-0.1408	1	1
BC-G	0	0.1	-0.2216	-0.6431	0.8647	1	1
		2	-0.2342	-0.6067	0.8409	1	1
		10	-0.2492	-0.4877	0.7369	1	1
		50	-0.1796	-0.2345	0.4141	1	1
		100	-0.1209	-0.1403	0.2612	1	1
ABC(G)	0	0.1	0.0654	0.0069	-0.0724	0	1
		2	0.0348	0.0070	-0.0417	0	1
		10	0.0045	0.0019	-0.0064	0	1
		50	0.000312	0.000379	-0.000690	0	1
		100	0.000036	0.000426	-0.000463	0	1

60 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	0	0.1	-0.5185	0.8345	-0.3160	0	1
		2	-0.5025	0.8184	-0.3159	0	1
		10	-0.4476	0.7521	-0.3045	0	1
		50	-0.3019	0.5054	-0.2035	0	1
		100	-0.2143	0.3462	-0.1319	0	1
AC	0	0.1	0.8363	-0.3133	-0.5230	0	1
		2	0.8203	-0.3127	-0.5076	0	1
		10	0.7545	-0.3010	-0.4534	0	1
		50	0.5059	-0.2026	-0.3032	0	1
		100	0.3464	-0.1316	-0.2148	0	1
BC	0	0.1	-0.3303	-0.4956	0.8260	0	1
		2	-0.3262	-0.4858	0.8120	0	1
		10	-0.3060	-0.4450	0.7510	0	1
		50	-0.2032	-0.3025	0.5057	0	1
		100	-0.1318	-0.2145	0.3463	0	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Início do alimentador (Barra 1)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
A-G	90	0.1	0.8908	0.0972	-0.9881	1	1
		2	0.7948	0.1631	-0.9579	1	1
		10	0.5273	0.2493	-0.7766	1	1
		50	0.1921	0.1554	-0.3474	1	1
		100	0.1065	0.0954	-0.2019	1	1
		0.1	-0.9882	0.8915	0.0968	1	1
B-G	45	2	-0.9579	0.7948	0.1631	1	1
		10	-0.7766	0.5274	0.2492	1	1
		50	-0.3474	0.1922	0.1551	1	1
		100	-0.2043	0.1081	0.0962	1	1
		0.1	0.0957	-0.9885	0.8929	1	1
		2	0.1632	-0.9579	0.7947	1	1
C-G	90	10	0.2493	-0.7766	0.5273	1	1
		50	0.1552	-0.3471	0.1920	1	1
		100	0.0953	-0.2020	0.1067	1	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Meio do alimentador (Barra 7)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB-G	45	0.1	-0.6877	0.9000	-0.2124	1	1
		2	-0.6199	0.8542	-0.2342	1	1
		10	-0.4234	0.6673	-0.2439	1	1
		50	-0.1570	0.2895	-0.1325	1	1
		100	-0.0873	0.1673	-0.0800	1	1
AC-G	90	0.1	0.9023	-0.2272	-0.6751	1	1
		2	0.8550	-0.2389	-0.6161	1	1
		10	0.6672	-0.2440	-0.4232	1	1
		50	0.2894	-0.1324	-0.1570	1	1
		100	0.1673	-0.0798	-0.0875	1	1
BC-G	135	0.1	-0.2348	-0.6683	0.9031	1	1
		2	-0.2433	-0.6127	0.8560	1	1
		10	-0.2455	-0.4221	0.6676	1	1
		50	-0.1326	-0.1570	0.2896	1	1
		100	-0.0797	-0.0875	0.1672	1	1
ABC(G)	90	0.1	-0.0306	-0.0226	0.0531	0	1
		2	-0.0124	-0.0019	0.0143	0	1
		10	-0.0017	0.0011	0.0006	0	1
		50	-0.0001	0	0	0	1
		100	0.0001	0	-0.0001	0	1

100 % do carregamento

Tipo de Falta	Ang. (°) (Ref. V _a)	R _f (Ω)	Fim do alimentador (Barra 14)				
			d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
AB	90	0.1	-0.3026	0.6738	-0.3712	0	1
		2	-0.2972	0.6533	-0.3561	0	1
		10	-0.2727	0.5731	-0.3005	0	1
		50	-0.1784	0.3298	-0.1514	0	1
		100	-0.1210	0.2094	-0.0884	0	1
AC	45	0.1	0.6897	-0.3520	-0.3378	0	1
		2	0.6665	-0.3403	-0.3261	0	1
		10	0.5791	-0.2932	-0.2859	0	1
		50	0.3306	-0.1502	-0.1804	0	1
		100	0.2098	-0.0879	-0.1218	0	1
BC	45	0.1	-0.3653	-0.3131	0.6785	0	1
		2	-0.3518	-0.3053	0.6572	0	1
		10	-0.2989	-0.2758	0.5747	0	1
		50	-0.1513	-0.1784	0.3297	0	1
		100	-0.0882	-0.1208	0.2091	0	1