DOUGLAS ALEXANDRE DE ANDRADE GARCIA

**Metodologia de Diagnóstico Automática de Falhas de
Curto-Circuito em Alimentadores Primários de Sistemas de
Distribuição Reticulados tipo *Spot***

**São Paulo
2006**

DOUGLAS ALEXANDRE DE ANDRADE GARCIA

**Metodologia de Diagnóstico Automático de Falhas de
Curto-Circuito em Alimentadores Primários de Sistemas de
Distribuição Reticulados tipo *Spot***

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira

São Paulo
2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Garcia, Douglas Alexandre de Andrade

Metodologia de diagnóstico automático de falhas de curto circuito em alimentadores primários de sistemas de distribuição reticulados tipo *spot* / D.A. de A. Garcia. -- São Paulo, 2006. 177 p.

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

1.Diagnóstico de falhas 2.Localização de faltas 3.Sistemas de distribuição reticulados 4.Redes neurais (Metodologia) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

À minha família, Claudia e Igor 'Matman', com amor e carinho. À natureza, com votos que ela resista.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira pelas diretrizes e pela amizade

Ao Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni e ao Prof. Dr. Luiz Carlos Magrini pelas importantes contribuições a este trabalho por ocasião do exame de Qualificação.

À Escola Politécnica da USP e ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP, pela oportunidade de poder trabalhar com pesquisas.

Ao Prof. Dr. Octavio Ferreira. Affonso pelo incentivo e pelos cafés.

Ao Prof. Dr. Guilherme de Andrade Garcia, grande irmão e amigo.

Ao amigo Alcântaro Lemes Rodrigues, pela ajuda com o tema Redes Neurais e com o trabalho.

Aos meus pais, Fernando e Alba, pelo incentivo constante e seguro nos caminhos do saber.

À minha esposa Claudia e meu filho Igor, pelo estímulo, compreensão e dedicação.

“O ano se acaba e mais um equinócio se aproximava. No mundo dos homens, um novo ano estava para chegar, com todas as suas alegrias e esperanças. Contudo para esse pai e filho, restava apenas a determinação de alcançar seu propósito indomável seguindo pela estrada do Meifumadô. Ela estava lá, imutável, estendendo-se diante deles, sem fim...”

Kazuo Koike
Goseki Kojima
Lobo Solitário

RESUMO

Este trabalho de pesquisa apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico automático de falhas do tipo curto-circuito de baixa impedância em circuitos alimentadores de média tensão de sistemas reticulados de distribuição de energia elétrica tipo *spot network*. O diagnóstico compreende a identificação do tipo de curto-circuito ocorrido e a sua localização. A metodologia está baseada no treinamento e uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs). Os parâmetros para treinamento das RNAs são obtidos a partir de padrões de comportamento elétrico de curtos circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos à terra, obtidos por simulação de um circuito de distribuição real localizado na cidade de Brasília.

Para obtenção do comportamento elétrico do circuito de distribuição foi utilizado o aplicativo de simulação ATP (*Alternative Transient Program*); para estruturação, treinamento e testes das RNAs da metodologia de diagnóstico foi utilizado o *software* Matlab (aplicativo de RNA). Os principais resultados dos testes das RNAs da metodologia são apresentados. Tais resultados demonstram a viabilidade científica e tecnológica de se aplicar a metodologia desenvolvida como ferramenta de diagnóstico em tempo real de auxílio dos departamentos de engenharia de operação e manutenção de concessionárias elétricas.

Este trabalho também apresenta as principais possibilidades de continuidade desta pesquisa científica e tecnológica baseada em redes neurais artificiais na área de diagnóstico automático de sistemas reticulados.

ABSTRACT

This work presents the development of an automatic failure diagnostic methodology for low impedance short circuit in mid voltage feeders of distribution spot networks systems. The developed methodology has the feature to identify the type of short circuit and its location.

An Artificial Neural Network technique was employed. The parameters used to train the Artificial Neural Networks are obtained based upon patterns in simulations of real cases for short circuit behavior in mono-phase, bi-phase and tri-phase to ground configuration. The input data for the simulation was based on a real distribution circuit belonging to the Power Utility CEB located in Brasília-Brazil. The simulation program ATP (Alternative Transient Program) was used to obtain the electric behavior of the circuit in the distribution network. As for the Artificial Neural Network simulation, trainings and tests Matlab was employed.

As a main contribution the results of this work shows the technical feasibility to apply such methodology as a important real time diagnostic tool to support the system operation and maintenance departments of power utilities that uses spot network topologies. Furthermore, it is presented the possibilities to continue this research related to automatic diagnostics for network distribution systems based on Artificial Neural Networks technique.

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1: PREÂMBULO -----	1
1.1	INTRODUÇÃO -----	1
1.2	OBJETIVOS -----	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO -----	4
2	CAPÍTULO 2: SISTEMAS RETICULADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA -----	7
2.1	HISTÓRICO DOS SISTEMAS RETICULADOS -----	7
2.2	ARQUITETURAS DO SISTEMA RETICULADO -----	9
2.3	ITENS QUE CONSTITUEM UM SISTEMA RETICULADO -----	11
2.4	A IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS RETICULADOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO -----	18
2.5	MELHORIAS SUGERIDAS PARA O SISTEMA RETICULADO -----	27
2.6	ESTUDO SOBRE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS NO SISTEMA RETICULADO -----	30
3.	CAPÍTULO 3: CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS RETICULADOS <i>SPOT</i> DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA -----	32
3.1.	COMPORTAMENTO DE UMA FALHA TRIFÁSICA EM UM SISTEMA RETICULADO TIPO <i>SPOT NETWORK</i> -----	32
3.2.	ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO NO ALIMENTADOR DE UM SISTEMA RETICULADO <i>SPOT</i> POR MEIO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS -----	38
3.3.	PARÂMETROS PARA SIMULAÇÕES DE FALHAS NOS CIRCUITOS ALIMENTADORES DE UM SISTEMA RETICULADO <i>SPOT</i> -----	46
3.4.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA NO ALIMENTADOR 1, SEM CARGA -----	53
3.5.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA NO ALIMENTADOR 1, SEM CARGA -----	66

3.6.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NO ALIMENTADOR 1, SEM CARGA-----	77
3.7.	INFLUÊNCIA DA CARGA NAS CORRENTES DOS TRANSFORMADORES DURANTE FALHA FASE-TERRA-----	89
3.8.	VERIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS CORRENTES EM FUNÇÃO DO PONTO DE FALHA – CORRENTES NA FASE A. -----	96
3.9.	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA IMPEDÂNCIA DURANTE FALHA DO SISTEMA RETICULADO -----	100
3.10.	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA RETICULADO SIMULADO -----	102
4.	CAPÍTULO 4:: DESENVOLVIMENTO, APLICAÇÃO E RESULTADOS DE METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS EM SISTEMAS RETICULADOS <i>SPOT</i> BASEADA EM REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS (RNA) -----	104
4.1.	APLICAÇÃO DE RNA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	105
4.2.	TOPOLOGIA DE OPERAÇÃO DA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS SUPORTADA PELO USO DE RNAS -----	107
4.3.	MÉTODO DE TREINAMENTO DAS RNAS-----	111
4.4.	METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM ALIMENTADORES DE MT DE SISTEMAS RETICULADOS DE DISTRIBUIÇÃO TIPO <i>SPOT</i> -----	112
4.5.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “TIPO DE CURTO”-----	116
4.6.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 1FTx”-----	120
4.7.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 1FTy”-----	124
4.8.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 2FTx”-----	129
4.9.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 2FTy”-----	134
4.10.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 3FTx”-----	139
4.11.	DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 3FTy”-----	143
4.12.	CONSIDERAÇÕES FINAIS REFERENTES AOS TESTES DA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS -----	147

5.	CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E DESMEMBRAMENTOS DO TRABALHO DE PESQUISA	149
5.1.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS	150
5.2.	DESMEMBRAMENTOS FUTUROS DESTE TRABALHO DE PESQUISA	151
A.	APÊNDICE: REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)	153
A.1.	INTRODUÇÃO A RNA	153
A.2.	DEFINIÇÃO DE RNA	155
A.3.	HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA RNA	158
A.4.	PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DE RNA	162
A.5.	OPERAÇÃO DAS RNA	164
	LISTA DE REFERÊNCIAS	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Confiabilidade de diferentes sistemas de distribuição. _____	22
Tabela 2-2 – Receita Anual Líquida (sistema hipotético)- R\$mil; São Paulo-2004. __	25
Tabela 2-3 – Tempo de retorno de investimentos (sistema hipotético) - anos. _____	25
Tabela 2-4 – Valor presente de um investimento hipotético de US\$ 1 milhão feito nos Estados Unidos e no Brasil, no início de 2006. _____	27
Tabela 2-5 – Tópicos do sistema reticulado a serem trabalhados para melhorar sua condição frente a outros sistemas de distribuição. _____	28
Tabela 4-1 – Estrutura de dados coletados em cada um dos relés digitais em situação curto-circuito nos alimentadores com fluxo reverso de potência. _____	113
Tabela 4-2 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” e percentagem de acerto por tipo de falta. _____	118
Tabela A-1 - Computador convencional versus sistema neural biológico (JAIN <i>et al.</i> , 1996) _____	154
Tabela A-2 - Características de algoritmos de aprendizado mais comuns em RNA (adaptado JAIN <i>et al.</i> , 1995). _____	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Diagrama esquemático da aplicação da metodologia de diagnóstico automático de curtos-circuitos em alimentadores primários de redes de distribuição reticuladas tipo <i>spot</i> .-----	6
Figura 2-1 - Diagrama esquemático de um sistema reticulado <i>grid network</i> de distribuição.-----	9
Figura 2-2 - Diagrama esquemático unifilar de um sistema reticulado <i>spot network</i> de distribuição, com uma Subestação BT de 3 transformadores. -----	10
Figura 2-3 – Subestação de BT com 4 redes BT tipo <i>spot network</i> , alimentados por transformadores de rede – 3 transformadores por rede. -----	12
Figura 2-4 – <i>Network protector</i> fabricado pela Richards Manufacturing Company. ---	13
Figura 2-5 – Ponto de derivação de MT instalado em uma caixa subterrânea de derivação da CEB, localizada sob uma avenida da asa norte de Brasília.-	16
Figura 2-6 – Instalação de Equipamentos da Concessionária AES Eletropaulo até o ano de 2003 em sua área de concessão.-----	20
Figura 2-7 – Instalação de Sistemas Reticulados pela Concessionária Eletropaulo até o ano de 2003 em sua área de concessão.-----	21
Figura 3-1 - Arranjo para análise da falha em um circuito reticulado tipo <i>spot network</i> .-----	33
Figura 3-2 - Diagrama de impedância P.U. da falha em um circuito reticulado tipo <i>spot network</i> -----	34

- Figura 3-3 - Diagrama esquemático de curto-circuito em um alimentador de um sistema reticulado *spot* de três alimentadores, indicando a contribuição dos outros dois alimentadores para a falha por meio do barramento de BT. ----- 35
- Figura 3-4 – Diagrama de impedância P.U. da falha em um circuito reticulado tipo *spot network*-----37
- Figura 3-5 - Circuito equivalente do Diagrama de impedância P.U. de falha trifásica à terra em um circuito reticulado tipo *spot network*. ----- 37
- Figura 3-6 - Diagrama unifilar do circuito equivalente de Thévenin, visto a partir do protetor de redes instalado no ramal do alimentador em falha. ----- 38
- Figura 3-7 – Diagrama unifilar simplificado (apenas uma câmara transformadora de BT) de um sistema reticulado *spot*, com falhas no Alimentador 1 localizadas: a) a jusante do local de instalação do transformador do reticulado, e (b) a montante do local de sua instalação. ----- 39
- Figura 3-8 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação anterior à abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS1. Defeito a jusante da câmara transformadora. ----- 41
- Figura 3-9 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação logo após a abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e antes da abertura do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS2. Defeito a jusante da câmara transformadora. ----- 42
- Figura 3-10 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação anterior à abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS1. Defeito a montante da câmara transformadora. ----- 43

Figura 3-11 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação logo após a abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e antes da abertura do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS2. Defeito a montante da câmara transformadora.-----	44
Figura 3-12 - Configuração da rede utilizada nas simulações. -----	48
Figura 3-13 - Secção do cabo subterrâneo considerado. -----	50
Figura 3-14 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 3F-terra – P00).-----	54
Figura 3-15 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 3F-terra – P00). ----	54
Figura 3-16 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra – P00).-----	55
Figura 3-17 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 (curto 3F-terra – P00). -----	56
Figura 3-18 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 (curto 3F-terra – P00). -----	56
Figura 3-19 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra – P00). -----	57

Figura 3-20 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra – P00).	57
Figura 3-21 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 3F-terra, P15).	58
Figura 3-22 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 3F-terra, P15).	58
Figura 3-23 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1 (curto 3F-terra, P15).	59
Figura 3-24 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra, P15).	59
Figura 3-25 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 3F-terra, P15).	60
Figura 3-26 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 3F-terra, P15).	60
Figura 3-27 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 3F-terra, P30).	61
Figura 3-28 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 3F-terra, P30).	61
Figura 3-29 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara	

transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra, P30). -----	62
Figura 3-30 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 3F-terra, P30). -----	63
Figura 3-31 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 3F-terra, P30). -----	63
Figura 3-32 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 3F-terra). -----	64
Figura 3-33 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos: a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 3F-terra). -----	65
Figura 3-34 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 2F-terra –P00). -----	66
Figura 3-35 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 2F-terra –P00). -----	67
Figura 3-36 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 2F-terra –P00). -----	67

Figura 3-37 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 2F-terra –P00). -----	68
Figura 3-38 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 e b) TR7-2 (curto 2F-terra –P00). -----	68
Figura 3-39 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 2F-terra –P15). -----	69
Figura 3-40 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 2F-terra –P15). -----	70
Figura 3-41 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 2F-terra –P15). -----	70
Figura 3-42 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 2F-terra –P15). -----	71
Figura 3-43 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 2F-terra –P15). -----	71
Figura 3-44 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 2F-terra –P30). -----	72
Figura 3-45 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 2F-terra –P30). -----	73

- Figura 3-46 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V
 – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7
 (curto 2F-terra –P30). ----- 73
- Figura 3-47 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2
 (curto 2F-terra –P30). ----- 74
- Figura 3-48 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2
 (curto 2F-terra –P30). ----- 74
- Figura 3-49 – Gráfico de tensão (V) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformadores TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ;
 b) detalhe (curto 2F-terra).----- 75
- Figura 3-50 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe
 (curto 2F-terra). ----- 76
- Figura 3-51 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe
 (curto 2F-terra). ----- 76
- Figura 3-52 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto fase-terra –P00).----- 77

- Figura 3-53 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto fase-terra –P00). --- 78
- Figura 3-54 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto fase-terra –P00).----- 78
- Figura 3-55 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto fase-terra –P00).----- 79
- Figura 3-56 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto fase-terra –P00).----- 79
- Figura 3-57 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto fase-terra –P15).----- 80
- Figura 3-58 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto fase-terra –P15). --- 81
- Figura 3-59 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto fase-terra –P15).----- 81
- Figura 3-60 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto fase-terra –P15).----- 82

Figura 3-61 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto fase-terra –P15).-----	82
Figura 3-62 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto fase-terra –P30).-----	83
Figura 3-63 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto fase-terra –P30). ---	84
Figura 3-64 – Gráfico de tensão (volts) <i>versus</i> tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto fase-terra –P30).-----	84
Figura 3-65 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto fase-terra –P30).-----	85
Figura 3-66 – Gráfico de corrente (A) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto fase-terra –P30).-----	85
Figura 3-67 – Gráfico de tensão (V) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformadores TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado, b) detalhe (curto fase-terra). -----	86
Figura 3-68 – Gráfico de tensão (V) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformadores TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado, b) detalhe (curto fase-terra). -----	87

- Figura 3-69 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto fase-terra).----- 87
- Figura 3-70 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto fase-terra).----- 88
- Figura 3-71 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 89
- Figura 3-72 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 90
- Figura 3-73 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 90
- Figura 3-74 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 91

Figura 3-75 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 91

Figura 3-76 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 92

Figura 3-77 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 92

Figura 3-78 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 93

Figura 3-79 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 93

Figura 3-80 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. ----- 94

Figura 3-81 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. -----	94
Figura 3-82 – Gráfico de corrente (ampéres) <i>versus</i> tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador. -----	95
Figura 3-83 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto fase-terra, situação SS1.-----	96
Figura 3-84 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto dupla fase-terra, situação SS1. -----	97
Figura 3-85 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS1.-----	97
Figura 3-86 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto fase-terra, situação SS2.-----	98
Figura 3-87 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto dupla fase-terra, situação SS2. -----	99

Figura 3-88 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS2.-----	99
Figura 3-89 – Gráfico comparativo da variação dos valores de impedância vista dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS2, impedância de falha nula.-----	101
Figura 3-90 – Gráfico comparativo da variação dos valores de impedância vista dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS2, impedância de curto de 1 ohm.-----	102
Figura 4-1 – Algoritmo de aprendizado <i>backpropagation</i> , decrito no Apêndice A. ---	109
Figura 4-2 – Estrutura da RNA para classificação e localização de falhas segundo metodologia proposta.-----	110
Figura 4-3 – Simbologia para representação das funções de ativação dos neurônios das RNAs em treinamento: a) log-sigmoidal; b) tan-sigmoidal; c) purelin.--	110
Figura 4-4 – Fluxograma da metodologia de diagnóstico automático de falha de curto circuito baseada em RNA (tipo e coordenada x_0, y_0 da falha).-----	115
Figura 4-5 – Treinamentos de RNA “Tipo de Curto”, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.-----	116
Figura 4-6 – Curva de treinamentos da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto”, função <i>Postreg</i> do Matlab, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados. -----	117
Figura 4-7 – Comparativo entre os dados esperados e os dados de saída da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” para identificação do tipo de falha, para 334 pontos de curto circuito com 0%, 50% e 100% da carga máxima.-----	119

Figura 4-8 – Comparativo entre os dados esperados e os dados de saída da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto”, para 36 pontos de curto circuito com 30% e 70% da carga máxima. -----	119
Figura 4-9 – Treinamentos da RNA 1FTx, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 705 RNAs viáveis.-----	120
Figura 4-10 – Curva de treinamento da RNA 12-29-8 1FTx, função <i>Postreg</i> do Matlab, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.	121
Figura 4-11 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 12-29-8 1FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.-----	123
Figura 4-12 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 12-29-8 1FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.-----	123
Figura 4-13 – Treinamentos da RNA 1FTy, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 148 RNAs viáveis.-----	125
Figura 4-14 – Curva de treinamento da RNA 25-51-11 1FTy, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados. -----	126
Figura 4-15 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-11 1FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.-----	128
Figura 4-16 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-11 1FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.-----	128
Figura 4-17 – Treinamentos da RNA 2FTx, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 206 RNAs viáveis.-----	130
Figura 4-18 – Curva de treinamento da RNA 25-51-8 2FTx, função <i>Postreg</i> do Matlab, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.	131

Figura 4-19 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-8 2FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.-----	133
Figura 4-20 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-8 2FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.-----	133
Figura 4-21 – Treinamentos da RNA 2FTy, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 383 RNAs viáveis.-----	135
Figura 4-22 – Curva de treinamento da RNA 20-27-10 2FTy, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados. -----	136
Figura 4-23 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-27-10 2FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.-----	138
Figura 4-24 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-27-10 2FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.-----	138
Figura 4-25 – Treinamentos da RNA 3FTx, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 661 RNAs viáveis.-----	139
Figura 4-26 – Curva de treinamento da RNA 22-30-12 3FTx, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados. -----	140
Figura 4-27 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 22-30-12 3FTx, com 0%, 50% e 100% de carga. -----	142
Figura 4-28 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 22-30-12 3FTx, com 0%, 50% e 100% de carga. -----	142
Figura 4-29 – Treinamentos da RNA 3FTy, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 154 RNAs viáveis.-----	144
Figura 4-30 – Curva de treinamento da RNA 22-33-8 3FTy, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados. -----	145

Figura 4-31 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-25-9 3FTy, com 0%, 50% e 100% de carga. -----	146
Figura 4-32 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-25-9 3FTy, com 0%, 50% e 100% de carga.-----	147
Figura A-1 - Estrutura resumida neurônio biológico -----	157
Figura A-2 - Elemento computacional ou nó e funções de transferência -----	158
Figura A-3 - Uma taxonomia das RNA (JAIN <i>et al.</i> , 1995)-----	163
Figura A-4 - Algoritmo de aprendizado <i>backpropagation</i> . -----	169

CAPÍTULO 1

PREÂMBULO

1.1 INTRODUÇÃO

Sistemas Reticulados são sistemas de distribuição de energia elétrica desenvolvidos a partir do início do século XX como alternativa ao Sistema Radial no fornecimento de energia elétrica. Nos Sistemas Reticulados cargas de toda uma região são supridas por uma rede de circuitos de baixa tensão interconectados e alimentados por vários transformadores ligados em paralelo. Estes, por sua vez, são alimentados por circuitos alimentadores primários independentes, minimizando o problema de quedas da rede de média tensão quando da falha de um destes alimentadores. É um sistema que opera em contingenciamento baseado na comutação automática das proteções dos transformadores, sendo geralmente subterrâneos. Permitem com isto uma maior confiabilidade na continuidade do fornecimento em caso de falha nos alimentadores primários, nos transformadores ou nos próprios elementos de proteção, além de melhores índices de qualidade de energia fornecida aos consumidores. Em sistemas de distribuição, grande parte da energia elétrica fornecida aos consumidores nas grandes metrópoles ocorre por meio dos sistemas reticulados, sendo mais utilizados nas áreas urbanas com grande densidade de carga.

Atualmente as companhias elétricas buscam atingir metas cada vez mais restritas de parâmetros de qualidade de energia (DUGAN, 2002), fiscalizados por seus órgãos reguladores. Com isso, sistemas de distribuição de energia elétrica que apresentem melhores performances de qualidade passaram a ser vistos sob uma nova ótica para as companhias: a de melhoria de seus índices de qualidade da energia fornecida. Este é o caso dos sistemas reticulados na distribuição de energia elétrica, que apresenta os melhores parâmetros em quase todos os índices comparativos.

Entretanto os sistemas reticulados apresentam problemas no que diz respeito aos custos de instalação, reposição e manutenção de seus equipamentos (transformadores, protetores de rede, chaves de média tensão e cabos, quase sempre subterrâneos), além do problema da idade do parque instalado nos países em desenvolvimento como o Brasil. Isto se deve à necessidade de maiores investimentos para manutenção e principalmente expansão da rede (comparativamente, um sistema reticulado precisa de maiores investimentos quando comparado a outros sistemas de distribuição), e que acarretou na diminuição das pesquisas associadas ao seu desenvolvimento, mesmo em detrimento da sua principal virtude: a alta disponibilidade da energia fornecida aos consumidores.

A grande disponibilidade de fornecimento com maiores custos tem causado grandes discussões na última década no Brasil, pois ao mesmo tempo em que se busca uma melhor qualidade de fornecimento de energia elétrica também se busca redução de custos. Esforços têm sido aplicados na busca de alternativas econômica e tecnicamente viáveis aos sistemas reticulados, como os Encontros Técnicos de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica (AES ELETROPAULO, 2005), ocorridos em 2003, 2004 e 2005 na cidade de São Paulo, onde foram apresentadas novas configurações de sistemas de distribuição e alternativas para melhoria dos sistemas existentes (sistemas reticulados tradicionais).

Num outro extremo existem países com melhores condições de investimento como os Estados Unidos. Os norte americanos buscam continuamente o desenvolvimento e a expansão dos sistemas com melhores características de qualidade de energia fornecida aos clientes (caso do reticulado), clientes estes que passam a exigir, cada vez mais, melhores padrões de fornecimento num ciclo virtuoso de melhorias no fornecimento de energia elétrica. Apontam ainda para um futuro com forte automatismo das redes de distribuição com uso de ADA (*Advanced Distribution Automation*), cujos maiores benefícios são (CIRED, 2005):

- integração de sistemas elétricos flexíveis como fontes distribuídas e equipamentos eletrônicos inteligentes;
- sistemas de comunicação e controle baseados em arquiteturas abertas;

- ferramentas de análise em tempo real para otimização de fornecimento de energia, gerenciamento de demanda, eficiência, confiabilidade e qualidade de energia.

A motivação deste trabalho é a busca por alternativas tecnológicas ao Sistema Reticulado que levem a minimizar seus custos e melhorar sua operacionalidade, quer seja no monitoramento da rede, na análise da longevidade dos seus equipamentos ou no gerenciamento da operação da mesma (três frentes básicas de melhorias de um sistema elétrico).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho propõe uma metodologia de localização automática de falhas nos circuitos de média tensão de um sistema de distribuição reticulado, baseada no uso de inteligência artificial por meio de algoritmos de RNA (Redes Neurais Artificiais, descritas no Apêndice A) com o objetivo de reduzir o tempo de localização do ponto de falha, frente aos métodos tradicionais.

Embora as instalações elétricas subterrâneas (quase que a totalidade dos sistemas reticulados de distribuição são subterrâneos) estejam protegidas da ação do tempo, o que lhes confere intrinsecamente uma maior confiabilidade quando comparada com instalações aéreas, suas falhas são difíceis de serem localizadas e por isso consomem maior tempo de manutenção. A metodologia proposta neste trabalho de pesquisa visa a otimização dos tempos de reparo e com isso facilitando a localização de uma falha, que é um problema para as equipes de manutenção de sistemas subterrâneos. Isto se verifica principalmente em locais onde a idade do parque instalado de sistemas de distribuição reticulados leva a uma taxa de falhas naturalmente mais elevada.

Tal metodologia pode ser aplicada em sistemas de supervisão tipo SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) onde são avaliadas as informações recebidas de uma rede de relés digitais que monitoram um sistema reticulado (os relés disponibilizariam valores de tensões e correntes de curto circuito para o sistema de supervisão). Tais relés são configurações modernas daqueles utilizados na proteção dos

sistemas reticulados (protetores de rede) onde, além de sua função de proteção, também possui uma plataforma de monitoramento do sistema, viabilizado economicamente pela disponibilidade de implementação de plataformas conjuntas de proteção e monitoramento (DUNCAN, 2004; GARCIA et al., 2004).

A análise da localização do ponto de falha por um algoritmo baseado em RNA acontece pouco tempo após a falha ocorrida, por estarem todos os relés interligados ao sistema supervisor, estando limitada à finalização da transmissão dos dados da falha. Este processo automatiza a localização da falha, pois permite uma comunicação imediata com o departamento de engenharia de manutenção ao término do procedimento de análise.

Gouvêa e Belvedere (2003) indicam a oportunidade atual de aperfeiçoamentos em sistemas de distribuição por meio do desenvolvimento de sistemas econômicos de automação e supervisão, integrados com a utilização de indicadores de defeito. Já Meliopoulos *et al.* (2004) notam que são requeridos novos métodos tanto na manipulação das informações disponíveis quanto na disponibilização destas informações aos operadores. Neste contexto uma nova ferramenta de supervisão é proposta neste trabalho de pesquisa: a localização automática de uma falha do tipo curto circuito de baixa impedância, orientada ao sistema de distribuição reticulado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO

O Capítulo 1 introduz os sistemas de distribuição reticulados e a problemática da detecção de falhas em instalações subterrâneas. Em seguida apresenta uma proposta para melhorar o tempo de detecção de falhas nestes sistemas, objetivo deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o histórico do desenvolvimento dos sistemas reticulados, sua importância e arquitetura. Em seguida, expõe análises comparativas dos sistemas de distribuição e possíveis melhorias que podem ser aplicadas nos sistemas reticulados para sua viabilidade econômica.

O Capítulo 3 trata do embasamento teórico para a proposição de localização de falhas por meio de sinais de tensão e corrente obtidos na baixa tensão. Estrutura-se um

modelo de circuito de distribuição reticulado tipo *spot* como referência para estudos, estipulando seus parâmetros elétricos a serem utilizados na simulação de seu comportamento no final do capítulo.

O Capítulo 4 mostra a metodologia proposta para diagnóstico automático de falhas nos circuitos alimentadores de um sistema reticulado tipo *spot*. O modelo para simulação foi desenvolvido a partir de um sistema elétrico real de distribuição de energia elétrica (sistema reticulado *spot* da cidade de Brasília). O diagnóstico automático compreende:

- a caracterização do tipo de curto circuito (três tipos considerados: curto circuito monofásico à terra, dupla fase à terra e três fases à terra);
- a determinação da coordenada geográfica do local do curto-circuito.

Tanto a caracterização do tipo de curto-circuito quanto a sua localização são efetuados por RNAs treinadas com registros de falhas simuladas obtidas em simulação. Estas, por serem baseadas em um sistema real de distribuição, puderam ser estruturadas o mais próximo da realidade possível quanto aos parâmetros elétricos deste sistema. O *software* utilizado para a caracterização dos parâmetros elétricos de curto-circuito foi o ATP (*Alternative Transiente Program*).

Em uma aplicação em tempo real, proposta como continuidade deste trabalho de pesquisa, o sistema atuará no contexto apresentado na Figura 1-1, onde sinais trifásicos de tensão e corrente serão coletados de situações de curto-circuito ocorridos no sistema reticulado e servirão de parâmetros de entrada para as RNAs previamente treinadas (RNATr). Neste caso então, estes dados elétricos serão coletados e transmitidos em tempo real por relés digitais instalados nos equipamentos de proteção de potência reversa.

Figura 1-1 - Diagrama esquemático da aplicação da metodologia de diagnóstico automático de curtos-circuitos em alimentadores primários de redes de distribuição reticuladas tipo *spot*.

Conforme explanado, os registros de falhas obtidos por meio de simulação são apresentados no Capítulo 3 deste trabalho. Os treinamentos das redes neurais artificiais propostas na metodologia de diagnóstico automático de falhas tipo curto-circuito são efetuados no Capítulo 4, assim como a sistemática de operação automática ilustrada na Figura 1-1.

No Capítulo 5 os resultados da metodologia proposta de diagnóstico automático de falhas são comentados no contexto de perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS RETICULADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS RETICULADOS

Os primeiros testes com sistemas reticulados de distribuição em corrente alternada datam de 1907 na cidade de Memphis (EUA). Os transformadores de rede eram supridos por alimentadores primários lançados em valetas, conectados a uma rede de cabos de baixa tensão cujos circuitos são protegidos com fusíveis. Em 1921, em Seattle (EUA), melhorias foram implementadas com a utilização dos primeiros protetores de rede que automaticamente desarmavam quando submetidos à potência reversa, mas tinham que ser rearmados manualmente. Em 1922 os primeiros protetores de rede completamente automáticos (desarmavam e rearmavam sob condições pré-estabelecidas) foram utilizados em New York (EUA) pela United Electric Light and Power Company. Eles apresentavam um sistema trifásico com tensão 208/120V ligação estrela (IEEE Std C37.108, 2002).

Os sistemas reticulados de distribuição utilizados hoje em dia são muito parecidos com o sistema instalado em 1922, exceto por trabalharem com tensões variadas (de primário e secundário), apresentarem uma configuração alternativa conhecida como *spot network* (vista a seguir) e seus equipamentos de proteção de baixa tensão *network protectors* (protetores de rede) terem atualmente tecnologia microprocessada em vez da configuração eletromecânica original.

Atualmente existem poucos fabricantes do equipamento *network protector*. Os que mais se destacam são a Eaton/Cutler-Hammer e a ETI/Richards Manufacturing

Company, ambos nos EUA. Tais equipamentos utilizam relés de proteção digitais que possuem algumas funções de monitoramento da rede de baixa tensão. A fabricante GE vendeu sua fábrica de protetores de rede (direitos e responsabilidades) para a ETI/Richards e a Westinghouse Co. vendeu sua fábrica de protetores (direitos e responsabilidades) para a Eaton/Cutler-Hammer.

O alto custo dos protetores de rede importados e a dificuldade de gerenciamento da rede têm onerado a manutenção dos sistemas reticulados já instalados em países em desenvolvimento, questionando-se por vezes sua continuidade. Este fato tem feito com que as concessionárias brasileiras busquem alternativas que vão em sentidos opostos: tanto a verificação de alternativas ao sistema reticulado como também alternativas que garantam sua viabilidade.

Essas alternativas podem ser verificadas pelo desenvolvimento de projetos de pesquisa como aqueles realizados pela CEB (Companhia Energética de Brasília) e o IEE/USP (Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo), AES Eletropaulo e a EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) e também entre a AES Eletropaulo e o fabricante de produtos eletroeletrônicos Moeller.

Dos projetos brasileiros que buscam a viabilidade do sistema reticulado surgiram relés acopláveis aos protetores de rede tanto antigos (Westinghouse ou GE) como novos (Richards ou Cutler-Hammer) e servem como alternativa para minimizar os custos de troca de relés danificados. Os já referidos fatores econômicos têm gerado pressão de mercado e protetores de rede completos têm sido lançados no Brasil pelas empresas Moeller e Pextron (fabricante de relés de proteção) em parceria com Beghin (fabricante de disjuntores). Todas são alternativas mais baratas para o mercado brasileiro (em torno de 50% do preço do produto importado segundo último pregão realizado pela CEB no final do ano de 2005) frente aos produtos importados em sua função básica de protetor de redes, mas ainda pouco testados e sem função alguma de monitoramento. Além disso, os dois fabricantes norte-americanos possuem um sistema de monitoramento embutido em seus protetores cujo protocolo de comunicação com seu relé é proprietário (tal supervisor é vendido como acessório a um custo relativamente alto).

Já o mercado norte americano continua firme no que diz respeito à manutenção e ampliação dos sistemas reticulados de distribuição, com forte tendência ao monitoramento e automatização de procedimentos.

2.2 ARQUITETURAS DO SISTEMA RETICULADO

Atualmente coexistem duas estruturas básicas de distribuição de baixa tensão em redes: o reticulado em grade (*grid network*) e o reticulado pontual (*spot network*). Uma estrutura unifilar do sistema reticulado tipo grade pode ser vista na Figura 2-1, na qual se verifica a presença de alimentadores primários de MT (média tensão) independentes para os transformadores da rede, além de seus secundários de BT (baixa tensão) ligados em paralelo na mesma rede em pontos distintos. A quantidade e a localização dos transformadores vão depender da demanda de potência em cada setor da rede. Cada subestação de BT abriga um transformador.

Figura 2-1 - Diagrama esquemático de um sistema reticulado *grid network* de distribuição.

A configuração do sistema reticulado do tipo *spot network* é ilustrada na Figura 2-2, onde encontram-se alimentadores primários independentes para os transformadores da rede, além de seus secundários de baixa tensão ligados em paralelo na mesma rede. Porém, os secundários dos transformadores estão ligados no mesmo ponto da rede, diferentemente do sistema *grid network*. Uma única Subestação de BT pode abrigar todos os transformadores do reticulado.

Figura 2-2 - Diagrama esquemático unifilar de um sistema reticulado *spot network* de distribuição, com uma Subestação BT de 3 transformadores.

Ambas as configurações de reticulado oferecem opção do fornecimento de energia elétrica em contingência, o que garante ótimos índices de qualidade de energia. Conforme relata Fanning (2003), novas tecnologias em processos industriais e comerciais criaram um ambiente onde alguns usuários têm tolerância zero a qualquer tipo de interrupção do fornecimento de energia, no qual um segundo de parada equivale tanto quanto uma hora devido aos seus processos críticos terem se interrompidos, estando seus produtos perdidos a um custo significante. Sistemas de distribuição

reticulado são, portanto, uma resposta aos requisitos de alta confiabilidade destes sensíveis processos.

2.3 ITENS QUE CONSTITUEM UM SISTEMA RETICULADO

São utilizados basicamente cinco componentes em sistemas reticulados de distribuição, tanto no sistema *Spot Network* quanto no sistema *Grid Network*, ilustrados respectivamente na Figura 2-1 e na Figura 2-2:

- Transformadores de Distribuição de BT;
- Protetores de rede;
- Chaves primárias de MT;
- Cabos alimentadores de MT;
- Caixas de derivação de MT.

2.3.1. Transformadores

Os transformadores dedicados a sistemas reticulados são aqueles construídos para obter maior flexibilidade e confiabilidade aos sistemas reticulados, devendo atender aos requisitos do meio físico de instalação, inclusive necessitando ser estanques em caso de subestações subterrâneas inundáveis (nestes casos são pressurizados com nitrogênio). Com relação ao sistema elétrico, por trabalharem em contingência, estão sujeitos a sobrecargas de curta duração, necessitando desta forma possuir um sistema de proteção adequado a esta característica. Suas potências variam de 500 kVA até 2.500 kVA, com tensões primárias variando de 2,5 kV até 34,5 kV. Suas classes de isolamento são geralmente de 65°C (temperatura de 110°C para o ponto quente no núcleo para 30°C de temperatura ambiente).

Figura 2-3 – Subestação de BT com 4 redes BT tipo *spot network*, alimentados por 12 transformadores de rede – 3 transformadores por rede.

2.3.2. Protetor de Rede (*Network Protector*)

Um protetor de rede é um disjuntor de baixa tensão com comutação automática de liga-desliga-religa, comandado por um relé específico de potência reversa, desenvolvido com a finalidade de evitar o fluxo reverso de potência em sistemas reticulados em caso de falha nos alimentadores primários dos transformadores aos quais estão acoplados (a falha de vários alimentadores simultaneamente é menos provável), falha do próprio transformador ou da chave primária de MT. A Figura 2-4 ilustra um *network protector* importado, fabricado pela Richards Manufacturing Company.

Estes protetores têm seu funcionamento automático baseado na verificação das condições do reticulado onde estão conectados, operando adequadamente sob condições pré-programadas, para conectar e desconectar da rede de baixa tensão o transformador ao qual está ligado. Por isso é imprescindível a utilização dos protetores de rede caso deseje-se um funcionamento do reticulado nos moldes aos quais foram projetados: altíssima disponibilidade de energia para os consumidores.

Figura 2-4 – *Network protector* fabricado pela Richards Manufacturing Company.

Os requisitos de funcionamento dos protetores de rede são normatizados segundo a Norma *IEEE Standard Requirements for Secondary Network Protectors* (IEEE Std C57.12.44, 2000). Tal Norma trata basicamente da performance elétrica, mecânica e de segurança que os protetores devem satisfazer para serem utilizados em proteção de redes. No Brasil não há nenhuma norma nem projeto de norma no Cobei (Comitê Brasileiro de Eletricidade, ligado à ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas) referente aos protetores de rede. A ABNT é o organismo no Brasil dedicando à coordenação das atividades de produção e disseminação de Normas Técnicas de interesse do setor eletroeletrônico nacional. Outros países do mundo que se utilizam de sistemas reticulados também não possuem normas dedicadas aos protetores de rede, já que os Estados Unidos é o país que abriga os dois únicos fabricantes de equipamentos *Network Protector*.

Os protetores de rede são conectados nos terminais de baixa tensão dos transformadores. Sua saída é ligada ao barramento de baixa tensão que atende aos consumidores e modo de operação pode ser dividido basicamente entre abertura e

religamento automático dos contatos de potência, assim descritos (IEE Std. C57.12.44, 2000):

Operação de Abertura dos Contatos de Potência: os contatos de potência do protetor de rede devem abrir automaticamente caso o fluxo de potência trafegue da rede BT para o transformador. Terá de operar em falhas do circuito primário e também do transformador ao qual está ligado. Também deverá atuar no caso de corrente reversa de magnetização do transformador via enrolamentos de BT (surge potência reversa com corrente de 3º harmônico), onde não haveria uma falha do sistema elétrico. Pode ter ajustes opcionais de: a) tempo de retardo de operação para casos específicos de variações cíclicas do fluxo de potência, também conhecidas como *pumping*; b) ângulo de operação em potência não reversa, mas que denota falha no primário, situação descrita como característica *Watt-Var* (ocorre no uso do sistema com cargas especiais, com fatores de potência diversos).

Operação de Fechamento dos Contatos de Potência: o protetor de rede deverá fechar seus contatos de potência automaticamente, para garantir que um fluxo de potência ativa ou reativa seja mantido no sentido do transformador para a rede. Para tanto, deve verificar condições de diferença de tensão e fase entre as tensões trifásicas da rede e do transformador (tensão eficaz do transformador ligeiramente superior à da rede e diferença de fase situada entre +85° e -15°, tendo como referência a tensão da rede).

2.3.3. Chaves de MT, Alimentadores de MT e Caixas de derivação de MT

As chaves de média tensão (ou chaves primárias) são chaves instaladas no lado primário dos transformadores. Podem ser a óleo (mais antigas e ultrapassadas) ou a SF6, possuindo tensões primárias desde 2,5 kV até 34,5 kV.

Os alimentadores de MT são cabos provenientes das subestações de subtransmissão, com classe de tensão até 35 kV. Os circuitos alimentadores geralmente são em número de 4, com uma redundância de alimentação dos circuitos do reticulado *spot* variando de 2 até geralmente 4 transformadores dependendo da carga local. Já nos reticulados *grid* o número de transformadores a princípio é indefinido, mas é mantido em quantidades em torno de 10 a 20 transformadores, pois em caso de desligamento nas subestações de subtransmissão a região de um município afetada por falta de energia fica delimitada. Outras configurações menos comuns também existem, com número variado de alimentadores e transformadores.

A distribuição geralmente é feita por via subterrânea, garantindo uma menor taxa de falhas dos alimentadores e diminuição do número de operações dos protetores de rede. As caixas de derivação são caixas instaladas ao longo da distribuição dos alimentadores com a finalidade de ramificação de ramais secundários para alimentação de subestações/câmaras situadas ao longo de seu percurso, onde ficam instalados os transformadores de baixa tensão.

Nestas caixas ficam instalados os derivadores MT acopláveis. Geralmente são nelas que ocorrem os problemas de falha nos alimentadores devido a problemas de perda de isolamento na conexão por excesso de umidade ou até mesmo alagamento das mesmas. A Figura 2-5 ilustra uma caixa de derivação de MT, ponto de grande probabilidade de falha nos alimentadores primários.

Figura 2-5 – Ponto de derivação de MT instalado em uma caixa subterrânea de derivação da CEB, localizada sob uma avenida da asa norte de Brasília.

2.3.4. Funcionamento dos Relés Direcionais de Potência

Um relé direcional de potência utilizado como protetor de redes, baseado na Norma *IEEE Standard Requirements for Secondary Network Protectors* (IEEE Std C57.12.44, 2000), atua sobre dois padrões de curvas: as de abertura ou *tripping* e as de fechamento ou *closing* dos contatos de potência.

Closing

Um protetor de redes deverá fechar automaticamente seus contatos de potência se o sentido do fluxo desta, após o fechamento, for do transformador (a montante) para a rede BT onde estão os consumidores (a juzante), permanecendo nesta condição. Para garantir que tanto a potência ativa quanto a potência reativa tenham o sentido transformador-rede a diferença de fase entre cada uma das tensões trifásicas da rede (V_{REDE}) com relação à tensão do transformador de sua fase de referência (V_{TRAFO}) deverá estar entre 85° e -15° (regiões de potência ativa e reativa positivas). Ou seja, a condição:

$$\vec{V}_{TRAFO} - \vec{V}_{REDE} = \vec{V}_{CLOSING} \quad (2-1)$$

deverá atender estas condições para todas as fases. O módulo $V_{CLOSING}$ é ajustável entre 0,5 e 2,0 volts.

A explicação para estes valores de defasagens indicados na referida Norma é a seguinte: pela existência de circuitos em paralelo com o circuito aberto em questão, chega-se que a impedância dominante no circuito é a impedância do transformador. Como a relação X/R geralmente fica entre 3,5 e 8,0 esta impedância, que está entre 74° e 83° ($\arctg 3,5 = 74,1^\circ$ e $\arctg 8 = 82,9^\circ$), estabelecerá os vetores de corrente. Para garantir que as potências ativa e reativa sejam positivas o ângulo de fase deverá estar entre os 85° (com certa folga) e -15° ($85^\circ - 90^\circ = -5^\circ$, admitindo-se uma folga de 10° advindas da prática, perfazendo-se o limite de -15°). Estes são os limites para que as potências não se estabeleçam em quadrantes que não sejam positivos para ambas.

Tripping

Um protetor de redes deverá abrir automaticamente seus contatos de potência se o sentido do fluxo de sua potência trifásica for do reticulado para o transformador. Deverá abrir em caso de falha no circuito primário, no próprio transformador, ou mesmo na corrente de magnetização do transformador dos enrolamentos de baixa tensão. Estas condições são conhecidas como características watt (de potência ativa) de potência reversa, nas quais o valor máximo é obtido com um ângulo de 180° entre tensão e corrente de fase ($V.I.\cos 180^\circ$ dará uma potência máxima negativa, já que $\cos 180^\circ = -1$). Opcionalmente um protetor de redes deverá abrir seus contatos de potência na condição conhecida como watt-var, onde o valor máximo de potência negativa é obtido com um ângulo de 120° entre tensão e corrente de fase. Estes ajustes são estabelecidos conforme a característica da carga local. Os valores da corrente de *trip* (corrente máxima reversa permitida) são também ajustáveis e vão de 0,05% até 5,0% da corrente nominal do equipamento (por exemplo, para corrente nominal de 1.500 A de fase ter-se-ia uma faixa de ajuste de 0,75 A até 75 A).

Estes ajustes de fase são necessários porque nas instalações elétricas coexistem relés eletromecânicos (antigos, em que os ajustes são feitos para o máximo torque na bobina de *trip* do relé) e relés eletrônicos (que devem se adaptar às características dos relés eletromecânicos para operarem de maneira equivalente). Embora os relés eletrônicos possam operar em qualquer fator de potência (reversa, no caso), a Norma

deve atender, e atende, a qualquer um dos relés instalados, pois estes vão coexistir na prática no momento das substituições por manutenção.

Existe ainda uma condição de tempo de retardo do *trip* para a situação de *pumping* (desligamento e religamento que ocorrem repetidas vezes e que podem danificar o motor de carregamento das molas do dispositivo de potência). Caso a potência reversa se mantenha após este período pré-ajustada, o *trip* é então acionado. No caso de retardo do *trip*, deve-se acionar uma proteção extra de sobrecorrente que varia de 50% a 200% da corrente nominal do protetor de redes, como medida de segurança pelo fato de haver um temporizador impedindo que o *trip* seja acionado.

Mesmo a última revisão da Norma sendo do ano 2000, esta contempla a grande quantidade de relés eletromecânicos instalados. Muitas das considerações feitas para religamento e desligamento se baseiam no torque trifásico que um sistema em certas condições de fase oferece, não sendo necessárias em uma análise por *software*. Entretanto devem-se manter nos relés digitais certos padrões de regulação quando estes são utilizados com relés eletromecânicos num mesmo sistema reticulado (LEE, 2000). Por exemplo, é preciso tratar a potência reversa como a soma fasorial das potências monofásicas para não haver nenhum tipo de efeito não considerado quando da operação simultânea. Ou mesmo o padrão de resposta da proteção “watt-var” ser mantida (“necessária” na presença de proteções individuais por fase nos alimentadores primários), mesmo sabendo-se que esta foi derivada de uma inversão na sequência de tensões e correntes das bobinas de torque do relé eletromecânico e cuja resposta em 120° foi o valor mais razoável conseguido na época de seu desenvolvimento.

2.4. A IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS RETICULADOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

2.4.1. Representatividade dos Sistemas Reticulados

A importância dos sistemas reticulados pode ser verificada pela sua presença em praticamente todas as grandes metrópoles em todos os países do mundo. Só nos Estados

Unidos são mais de 260 cidades que utilizam sistemas reticulados (BURKE, 1994). Embora a maioria dos sistemas de distribuição nos EUA seja aérea, os sistemas de distribuição subterrâneos estão aumentando em popularidade devido basicamente a fatores estéticos e de confiabilidade (BROWN, 2002). A maioria dos sistemas reticulados é subterrânea simplesmente pelo fato desses serem instalados quase que em sua totalidade em área de grande densidade, onde o espaço disponível é restrito (WILLIS, 1997). A dificuldade de manutenção pelo espaço restrito impõe um sistema subterrâneo mais confiável – o sistema de distribuição reticulado.

Para se ter uma idéia da representatividade do sistema reticulado no Brasil a concessionária de distribuição da cidade de São Paulo, AES Eletropaulo, dona do maior sistema reticulado do país, possui um sistema de distribuição com as seguintes características (KUADA, 2004):

- 15 reticulados independentes em 21 kV;
- 60 circuitos primários, com 1.029 km de cabos;
- 2.255 câmaras transformadoras com protetores;
- 1,28 GVA de potência instalada;
- 120.000 unidades consumidoras;
- densidade de carga de 75,4 MVA / km² no sistema.

A representatividade da concessionária AES Eletropaulo para análise do desenvolvimento de sistemas reticulados se dá pela sua capacidade em atender uma grande região metropolitana, como são as regiões nos Estados Unidos que utilizam sistemas reticulados (BURKE, 1994). Suas instalações atendem a cidade de São Paulo e mais 23 municípios no seu entorno. Entre seus ativos estão 132 estações transformadoras de distribuição (ETD), totalizando 12,6 GVA de potência instalada, 1,7 mil km de circuito de subtransmissão (138/88 kV) e uma rede de aproximadamente 311 mil km de condutores aéreos, 10 mil km de condutores subterrâneos e 1,2 milhão de postes, atendendo 5 milhões de unidades consumidoras (AES ELETROPAULO, 2005).

Aproximadamente 10% da energia fornecida aos consumidores da AES Eletropaulo é feita por meio do sistema reticulado. Grande parte deste fornecimento é feito na cidade de São Paulo, dentre os 24 municípios atendidos pela concessionária. Além disso, a demanda média em toda a concessionária por unidade consumidora é de

2,5 kVA/unidade. A demanda no sistema reticulado é de 10,7 kVA/unidade consumidora, aproximadamente 4,3 vezes superior, característica de alta densidade de carga do sistema reticulado.

A maior parte dos sistemas de rede instalados na concessionária AES Eletropaulo foi realizado nas décadas de 1970, 1980 e 1990, com uma média de 630 equipamentos (cada equipamento representa um transformador e suas proteções – chave primária, protetor de rede, conectores, cabeamento, etc.) por década, conforme mostra a Figura 2-6 (DIAS, 2004).

Figura 2-6 – Instalação de Equipamentos da Concessionária AES Eletropaulo até o ano de 2003 em sua área de concessão.

Pela Figura 2-6 tem-se uma impressão de regularidade no ritmo de instalação do sistema reticulado da AES Eletropaulo. Entretanto, grande parte da infra-estrutura de seus 15 sistemas reticulados foi instalada na década de 70 (conforme indica a Figura 2-7) com implantação de 6 sistemas. O que houve a partir de então foi uma regularidade de instalações dos equipamentos (indicada pela Figura 2-6) e operacionalização destes sistemas previamente instalados, além da compra de equipamentos de reposição com uma involução do número de sistemas instalados. Tal involução denota uma diminuição

no interesse da mesma no sistema reticulado, associada principalmente aos custos relativos inerentes do sistema, tendo ocorrido em todas as concessionárias brasileiras que utilizam sistemas de distribuição reticulados (as mais representativas no Brasil são Ceb, Cemig, Light, Copel) pelo mesmo motivo.

Figura 2-7 – Instalação de Sistemas Reticulados pela Concessionária Eletropaulo até o ano de 2003 em sua área de concessão.

2.4.2. Confiabilidade dos Sistemas Reticulados

A Sessão 5 – *Power Distribution System Development* – da 18ª. Conferência Internacional em Distribuição de Energia (CIRED, 2005) formulou o seguinte questionamento: “O número de artigos recebidos do Brasil e da África do Sul comprovam que os sistemas de distribuição nestes países estão sob uma importante reestruturação. Como está sendo considerada a confiabilidade neste estágio? Existem penalidades a serem pagas no caso de não serem atingidas metas de continuidade do fornecimento?”. Esta indagação mostra a direção tomada pela comunidade internacional quanto à confiabilidade dos sistemas de distribuição e sua preocupação quanto aos rumos que países como o Brasil estão tomando.

Embora seja consenso que sistemas reticulados possuam maior confiabilidade frente a outros tipos de instalações, conforme comparativo indicado na Tabela 2-1 (BURKE, 1994), seu maior custo de instalação e manutenção, além de um maior tempo de paradas, tem provocado buscas por alternativas técnicas que tornem viáveis sua aplicação (principalmente em países onde a combinação de alto endividamento e taxas de juros elevadas provoca um prolongamento do retorno de investimentos).

Tabela 2-1 – Confiabilidade de diferentes sistemas de distribuição.

Tipo de Sistema → de Distribuição	Radial aéreo	Primá- rio anel	Radial subter- râneo	Primário Seletivo	Secundá- rio Seletivo	Reticulado <i>grid</i>	Reticulado <i>spot</i>
Paradas por ano	0,3-1,3	0,4-0,7	0,4-0,7	0,1-0,5	0,1-0,5	0,005- 0,02	0,02-0,10
Duração média das paradas	90 min.	65 min.	60 min.	180 min.	180 min.	135 min.	180 min.
Interrupções momentâneas por ano	5-10	10-15	4-8	4-8	2-4	0	0-1
Duração total das paradas por ano	27 - 117 min.	26 - 45 min.	24 - 42 min.	18 - 90 min.	18 - 90 min.	0,68 - 2,7 min.	3,6 - 18 min.

Sistemas subterrâneos apresentam naturalmente um menor índice de falhas por estarem menos expostos a agentes externos como quedas de galhos e de árvores, acidentes automobilísticos com postes, intempéries e outros menos comuns. A duração de uma parada tende a ser maior, pois existe a característica natural das falhas serem mais difíceis de localizar e reparar quando comparadas com um sistema aéreo.

O custo de uma parada de 2 horas nos Estados Unidos tem um valor médio de US\$1,50/kW, dólar de 1980 (BURKE, 1994), que corrigidos para valores atuais (inflação média dos EUA de 4,5% a.a. e taxa de câmbio de R\$2,50/US\$) remete a um custo por parada de 2 horas da ordem de R\$11,00/kW, aproximadamente (ou R\$5,50/kWh). Estes valores são cerca de 50% superiores ao custo do kWh interrompido da concessionária AES Eletropaulo, que é de R\$3,56/kWh (BRUNHEROTO, 2004). Este valor superior nos Estados Unidos do custo do kWh diminui o tempo de retorno do investimento em sistemas com menor duração de paradas no ano, caso dos reticulados *spot* e *grid* (conforme indica comparativo “Duração total das paradas por ano” na Tabela 2-1), contribuindo com uma parcela maior de receita líquida anual.

Uma análise comparativa de perda de receita líquida anual, supondo-se que o sistema reticulado *grid* fosse transformado em primário seletivo (transformação tecnicamente mais simples), deve levar em conta que a duração total das paradas por ano do sistema primário seletivo é aproximadamente 30 vezes superior, segundo a Tabela 2-1. Supondo ainda que todo o sistema de distribuição reticulado da AES Eletropaulo, com 1,28 GVA de potência instalada, fosse tipo *grid*, ter-se-ia uma perda de arrecadação líquida anual de R\$ 5,95 milhões, baseado na diferença das arrecadações para ambos os sistemas para 2,7 minutos de parada média:

- Reticulado *grid*:

$$(1,28.10^6 \text{ kVA}).(2,7 \text{ minutos}).(1 \text{ hora}/60 \text{ minutos}).(\text{R}\$3,56/\text{kWh}) = \text{R}\$ 205 \text{ mil.}$$

- Primário seletivo:

$$(1,28.10^6 \text{ kVA}).(30 \cdot 2,7 \text{ minutos}).(1 \text{ hora}/60 \text{ minutos}).(\text{R}\$3,56/\text{kWh}) = \text{R}\$ 6,15 \text{ milhões.}$$

Os custos de instalação do sistema reticulado no Brasil aumentam à medida que se têm:

- menores custos por kWh interrompido (associado principalmente ao menor custo de mão de obra das concessionárias de países em desenvolvimento);
- maiores custos com equipamentos importados;
- menores custos com penalidades dos organismos reguladores com qualidade de fornecimento da energia.

Estas condições são encontradas via de regra nos países em desenvolvimento, em oposição aos países desenvolvidos.

2.4.3. Análises Comparativas dos Sistemas de Distribuição

Mesmo levando em consideração que os melhores índices de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor em horas) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor em número de interrupções) – índices de qualidade de energia – (DUGAN, 2002) sejam do sistema reticulado quando comparado ao sistema radial (pela própria concepção de trabalho automático em contingência e instalação subterrânea do sistema reticulado), a idade avançada do parque instalado brasileiro (maioria com mais de 20 anos de uso) e custos de reposição destes equipamentos têm preocupado seus gestores.

Pesquisas têm sido publicados na busca por alternativas aos sistemas reticulados, e poucos relativos ao seu desenvolvimento. Conforme sugerem Gouveia e Belvedere (2003), análises econômicas de alternativas de configurações de redes subterrâneas permitem concluir pela viabilidade da transformação gradativa do sistema reticulado para a configuração sistema primário seletivo. Várias configurações por eles analisadas atendem requisitos técnicos pré-estabelecidos pela concessionária AES Eletropaulo, embora a configuração em sistema reticulado apresente maior nível de confiabilidade apresentando, porém, maiores custos.

Já Brunheroto *et al.* (BRUNHEROTO, 2004) também descrevem o alto custo de instalação do sistema reticulado, mostrando que o tempo de retorno do investimento para um sistema de distribuição hipotético de 20 MVA é aproximadamente quatro vezes maior para este tipo de sistema do que para o sistema aéreo nu. Discorrem ainda sobre a maior confiabilidade de energia fornecida aos consumidores pelo sistema reticulado. A Tabela 2-2 e a Tabela 2-3 apresentam comparações de receita líquida e tempo de retorno dos sistemas de distribuição mais utilizados, para a seguinte configuração hipotética:

1. Área de 1 km², constituída de 100 quadras de 88 m x 88 m;
2. Largura das vias públicas: 12 m (calçadas: 2m, rua: 8 m);
3. Carga uniformemente distribuída;
4. Entradas de consumidores: 10 / calçada / quadra;
5. Consumidores trifásicos alimentados em baixa tensão;
6. Densidades de carga 5, 10 e 20 MVA/km²;
7. Máxima queda de tensão nos circuitos secundários: 3 %.

Tabela 2-2 - Receita Anual Líquida (sistema hipotético)- R\$mil; São Paulo-2004.

Potência Tipo de Sistema	5 MVA	10 MVA	20 MVA
Aéreo Nu	542	1.102	2.319
Aéreo Compacto	572	1.111	2.408
Subterrâneo	635	1.262	2.547

Tabela 2-3 – Tempo de retorno de investimentos (sistema hipotético) - anos.

Potência Tipo de Sistema	5 MVA	10 MVA	20 MVA
Aéreo Nu	7,6	3,6	1,8
Aéreo Compacto	7,5	3,6	1,7
Subterrâneo	--	19,4	7,9

Numa análise qualitativa o Sistema Reticulado apresenta os melhores índices de qualidade de energia (DEC no mínimo cinco vezes menor e FEC pelo menos dez vezes menor que o sistema Radial Aéreo). A contrapartida é seu custo superior de instalação em áreas medianamente povoadas, como a densidade de carga utilizada no caso hipotético. Embora, segundo Willis (1997), essa diferença seja menos significativa para regiões urbanas de grande densidade populacional e de carga, onde o sistema de distribuição deve ser subterrâneo (não há espaço para ligações aéreas, além das manutenções e reparos serem complicados devido ao tráfego),.

Outro fator que contribui para uma decisão de investimento, senão o principal em época de concessionárias privatizadas, é a análise do valor presente do investimento que possui uma premissa de que um valor gasto no futuro é menor que um valor gasto no presente, exceto em casos evidentes (WILLIS, 1997). Uma análise de valor presente leva em conta principalmente taxa de juros, tornando investimentos de melhor qualidade questionáveis frente a soluções menos onerosas, principalmente em países com elevadas taxas de juros como o Brasil, desestimulando, por exemplo, a expansão de sistemas elétricos mais complexos. Já em países com economias estáveis não há o problema acentuado no cálculo do valor presente, onde se busca a excelência no fornecimento da energia elétrica principalmente pelo nível mais exigente tanto dos órgãos reguladores quanto do consumidor no que diz respeito à qualidade da energia fornecida.

O Valor Presente (V. P.) é o valor equivalente hoje de um investimento aplicando-se fatores de correção até uma data futura. Sua relação com o investimento e o período analisado é a seguinte:

$$V. P. = D \times P^t \quad (2-2)$$

onde:

- D: montante do dinheiro a ser gasto hoje;
- t : anos à frente onde se avalia o montante do dinheiro gasto hoje;
- P: fator de valor presente anual.

O fator de valor presente anual P é dado por:

$$P = \frac{1}{(1 + d)} \quad (2-3)$$

onde d representa a taxa de desconto (valor percentual).

Um comparativo do valor presente de um investimento hipotético de 1 milhão de dólares entre uma concessionária brasileira e uma norte-americana, com uma taxa de desconto baseada unicamente nas taxas de juros do início de 2006 do Brasil (15% ao ano) e Estados Unidos (5% ao ano), sem acrescentar fatores inflacionários, taxa de risco e falta de fundos para investimento, leva a valores presentes para ambos os investimentos dados pela Tabela 2-4, para 5 anos à frente.

Tabela 2-4 - Valor presente de um investimento hipotético de US\$ 1 milhão feito nos Estados Unidos e no Brasil, no início de 2006.

	Investimento inicial (US\$)	Taxa de desconto (taxa de juros)	Fator de valor presente anual	Tempo de análise (anos)	Valor presente do investimento (US\$)
Brasil	$1 \cdot 10^6$	15%	0.870	5	498 mil
Estados Unidos	$1 \cdot 10^6$	5%	0.952	5	773 mil

A diferença entre os valores presentes de investimento vistos na Tabela 2-4 pode ser decisiva na determinação de investir em um sistema de distribuição ou outro, em detrimento da qualidade de energia ou outros fatores.

Ao Sistema Reticulado ainda pesam os custos de manutenção preventiva (pela dificuldade de acesso aos equipamentos subterrâneos), o tempo de localização de defeitos (característica dos sistemas subterrâneos) e tempo de restabelecimento do cliente (inerentes a sistemas subterrâneos com condições ambientais críticas, como caixas inundáveis, por exemplo).

2.5. MELHORIAS SUGERIDAS PARA O SISTEMA RETICULADO

Como proposições de melhorias ao Sistema Reticulado sugere-se as contribuições a cada um dos itens que pesam contra o mesmo em análises comparativas

dos sistemas de distribuição indicados no Item 2.4. A Tabela 2-5 apresenta tais tópicos e sugestões para cada um deles.

Tabela 2-5 - Tópicos do sistema reticulado a serem trabalhados para melhorar sua condição frente a outros sistemas de distribuição.

Tópico	Proposição
CUSTO DE INSTALAÇÃO	Diminuição dos custos do equipamento <i>Network Protector</i> , importado. Testes segundo as normas específicas nos produtos em nacionalização.
CUSTO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	Monitoramento dos equipamentos, da rede elétrica, das condições ambientais das caixas ou subestações, incorporando manutenção preditiva. Buscar no mercado alternativas tecnológicas que considerem monitoramento dos equipamentos.
TEMPO DE LOCALIZAÇÃO DE DEFEITO	Sistema automático de reconhecimento do tipo de defeito e sua localização.
TEMPO DE RESTABELECIMENTO DO CLIENTE	Interação dos sistemas de monitoramento e de reconhecimento do tipo de defeito e sua localização com a equipe de manutenção. Automatização do processo.

Atualmente é economicamente inviável a instalação em larga escala de equipamentos exclusivos para monitoramento em BT pelos custos envolvidos (GARCIA et al., 2004). Ao implementar-se um relé com as funções de proteção do equipamento *network protector* acrescido de funções de monitoramento de equipamentos e qualidade de energia, pode-se obter um meio de operacionalizar novas tecnologias para o sistema reticulado de distribuição. Ambos os ambientes de *software* (de proteção e de monitoramento), desenvolvidos sobre uma mesma estrutura de *hardware* com custo mais competitivo, com sistema supervisorio de protocolo aberto, garantem:

- menores custos com manutenção preventiva, pela identificação prévia de alterações funcionais dos equipamentos do sistema (perda da pressurização utilizada em equipamentos estanques, demanda acima da

capacidade dos componentes, alteração na temperatura de transformadores, etc.) e da rede elétrica (coleta de parâmetros de funcionamento do sistema: demanda, qualidade da energia fornecida e registros de falhas), além da verificação das condições ambientais (inundação, violação de portas de acesso, perda da ventilação forçada dos transformadores, etc.), com possibilidade de alteração remota de parâmetros de funcionamento do equipamento *Network Protector*;

- menor tempo de localização de defeitos pelo desenvolvimento de um sistema automático de reconhecimento do tipo de falha e sua localização, baseado em dados colhidos da rede elétrica de baixa tensão como *status* dos equipamentos do reticulado de baixa tensão, valores de correntes (inclusive curto-circuito) e de tensões, fluxo de potência, *time stamp* com relógio de tempo real, localização das unidades por GPS etc., a funcionar em sistema supervisório da empresa;
- menor tempo de restabelecimento da energia para os consumidores e maior segurança para as equipes de manutenção pela indicação das condições do ambiente das instalações dos equipamentos (temperatura, inundação, gases explosivos, nível de oxigênio), do tipo da falha e sua provável localização.
- menores custos de manutenção e expansão do sistema reticulado por meio da nacionalização do equipamento *Network Protector*.

Dentre estas melhorias sugeridas inclui-se o tema deste trabalho: o diagnóstico de curtos circuitos que abrange a identificação do tipo e sua localização nos alimentadores de média tensão por meio do treinamento de redes neurais artificiais com registros simulados de tais falhas. Falhas que requerem uma manutenção rápida para liberação do circuito afetado, pois quanto mais rápida for tal localização, menores chances de um desligamento do consumidor. Pode haver também um súbito aumento de carga do transformador que continua alimentado, podendo este inclusive passar a trabalhar em sobrecarga, o que não é incomum.

2.6. ESTUDO SOBRE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS NO SISTEMA RETICULADO

A identificação de falhas em sistemas de distribuição apresenta dois focos: a localização na média tensão e na baixa tensão. Como os sistemas reticulados possuem alimentadores radiais de distribuição em média tensão, sistemas de localização de falhas seguem topologias tradicionais por meio de sinais injetados na linha já desligada (reflectometria). Medições de sinais de tensão e corrente feitas na SE de média tensão podem ser também utilizadas aplicando-se técnicas de localização de falhas para circuitos de distribuição radiais. Medições de falhas nos alimentadores primários por meio de leituras de sinais na baixa tensão não foram detectados na literatura. Diferentes técnicas são discutidas a seguir.

- Chen e Zhang (CHEN e ZHANG, 2005) elaboraram um trabalho de detecção e proteção de falhas tipo curto-circuito em circuitos de baixa tensão, apresentando filtros digitais com tecnologia de transformada *wavelet*. Foi desenvolvido um equipamento com tecnologia DSP (*Digital Signal Processing*) para aplicação do filtro. Concluem que o equipamento desenvolvido pode ser aplicado em detecções de baixa tensão, pois apresenta elevada imunidade a ruídos intrínsecos a estes níveis de tensão.
- Thukaram, Khincha e Vijaynarasimha (THUKARAM *et al.*, 2005) apresentaram um trabalho de localização de faltas em sistemas radiais de distribuição por meio do uso de RNA para levantamento dos padrões de falhas simuladas. Informações de todas as chaves e fusíveis do sistema de distribuição radial avaliado devem ser lidas para se estabelecer o “caminho” do curto, com alto grau de dependência de funcionamento de todos os equipamentos do sistema de monitoramento. Exibiram erros de 100 a 300 metros quando se considerou todos os valores possíveis simulados. Quando se separou por tipo de falta houve uma queda do erro absoluto para a faixa de até 50 metros (média de 10 metros).
- Navaneethan, Soraghan, Siew, McPherson e Galé (NAVANEETHAM *et al.*, 2001) realizaram um trabalho de detecção de falhas em circuitos subterrâneos de distribuição em baixa tensão. A técnica consiste em

melhorar o processo *off-line* de análise de reflectometria, fazendo um pré-tratamento do sinal para eliminação de reflexões que confundem a análise, permitindo um resultado automático com erros de 2 metros em circuitos de 150 metros.

- Bo, Weller e Redfern (BO *et al.*, 1999) criaram uma técnica de localização de falhas em sistemas de distribuição (média tensão) que utiliza sinais transitórios de alta frequência gerados durante tais falhas, medidos por meio de circuitos acoplados capacitivamente aos cabos de distribuição. O tempo de duração e tráfego dos sinais acoplados de alta frequência é utilizado para determinação do ponto de falha. A técnica não depende de impedância da falha ou do tipo da mesma, mas sim de equipamentos com altas taxas de aquisição, pois trabalha nas faixas de frequência da ordem de 200 MHz para precisão de 2 metros.
- Das, Sachdev e Sidhu (DAS *et al.*, 2000) mostraram um protótipo de localização de falhas em circuitos de subtransmissão e de distribuição radiais. A técnica está baseada na medição da componente fundamental de frequência de tensão e corrente vistos do relé de proteção da SE, estimando-se as falhas pela relação destes fasores. O protótipo foi testado em laboratório, apresentando relativa precisão: para circuitos da ordem de grandeza de 2 km detectou erros de medição de aproximadamente 50 m; para circuitos de 20 km de extensão o erro apresentado foi de aproximadamente 300 m.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS RETICULADOS *SPOT* DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O entendimento de uma falha em um sistema reticulado é de suma importância quando se avalia seu comportamento e se tem interesse na sua caracterização. No caso do uso de resultados de simulações de situações de falha como subsídios para o desenvolvimento de uma técnica, metodologia ou algoritmo, sua compreensão e abrangência dão a medida do sucesso de tais aplicações. No caso deste trabalho, que utiliza registros de simulações para desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico automático (que inclui tipo de falha e sua localização) baseada em RNA, uma análise criteriosa do comportamento do circuito é de suma importância, pois os resultados esperados da metodologia exigem dados rigorosos para seu treinamento e validação.

A opção do uso de registros reais não é viável, pois no caso de falhas tipo curto-circuito o tempo para aquisição de uma massa de dados para viabilização de uma RNA é demasiado longo, uma vez que os eventos não são freqüentes. Uma outra alternativa seria a montagem de um modelo reduzido, mas como o número de equipamentos utilizados em um sistema de distribuição reticulado representativo é demasiado grande seus custos seriam elevados.

3.1. COMPORTAMENTO DE UMA FALHA TRIFÁSICA EM UM SISTEMA RETICULADO TIPO *SPOT NETWORK*

Este item apresenta, de forma esquemática, o comportamento de uma falha trifásica que ocorre em um elemento de média tensão. A análise do comportamento de

uma falha em um sistema reticulado auxilia o entendimento do comportamento de todo o sistema. A Figura 3-1 ilustra um circuito reticulado tipo *spot network* imediatamente antes do desligamento do protetor de redes. A falha ilustrada é um curto-circuito trifásico à terra, onde se assumem as seguintes hipóteses:

- o ramal do transformador 1 está desligado para manutenção (protetor aberto manualmente há algum tempo);
- houve um curto circuito trifásico junto aos terminais MT do transformador 3, com a proteção do alimentador 3 indicada na Figura 3-1 na condição ABERTA;
- consumidores sem carga representativa no momento da falha;
- barramento de MT com tensão estabilizada;
- transformadores de 1000 kVA, 380/220 V, secundário em Y, impedância de 5%, $\theta_Z \cong 80^\circ$ (ângulo da impedância), corrente nominal de 1515 A.

Figura 3-1 - Arranjo para análise da falha em um circuito reticulado tipo *spot network*.

Para a hipótese descrita o circuito equivalente em P. U é ilustrado na Figura 3-2.

Figura 3-2 - Diagrama de impedância P.U. da falha em um circuito reticulado tipo *spot network*.

Na Figura 3-2 os fasores $\dot{V}$ e $\dot{I}$ são encontrados a partir de valores de base de potência de 1000kVA e de tensão 380Y/220 volts. Assim sendo:

$$\dot{V} = 0,5 \angle 0^\circ \text{ P. U.} \quad (3-1)$$

$$\dot{I} = (-1 \angle 0^\circ) / (2 \cdot 0,05e^{j80}) = 10 \angle 100^\circ \quad (3-2)$$

A corrente e a tensão da fase A do protetor são, pelas hipóteses:

$$\dot{I}_A = (10 \angle 100^\circ) \cdot [1000 / (\sqrt{3} \cdot 380)] = 15,19 \angle 100^\circ \text{ kA} \quad (3-3)$$

$$\dot{V}_A = (0,5 \angle 0^\circ) \cdot (220) = 110 \angle 0^\circ \text{ V} \quad (3-4)$$

Em relação ao nível de tensão mostrado pela equação (3-5) haveria um afundamento da mesma para metade da tensão nominal. Isto perduraria enquanto não houvesse o desligamento do ramal em curto pelo protetor de redes número 3, restabelecendo-se então a condição de tensão nominal nos consumidores. Estes valores são considerados para as hipóteses assumidas.

A Figura 3-3 ilustra uma falha do tipo curto circuito em um dos alimentadores do sistema reticulado *spot* (neste caso com 3 alimentadores que alimentam um número n de subestações de BT). Neste caso um número n de sinais elétricos trifásicos para estudo da localização da falha estaria disponível caso houvesse um sistema de monitoramento instalado, possibilidade viável economicamente no uso de relés multifuncionais com plataforma conjunta de proteção-monitoramento (GARCIA et al., 2004) e que são a

plataforma de aquisição de dados para a metodologia proposta neste trabalho. Quando o sistema reticulado passa a ter um número considerável de ramificações de alimentadores troncos e ramais derivados deste tronco, além de inúmeras subestações com número variado de transformadores, surge a necessidade do uso de simuladores para se obter resultados objetivos.

Figura 3-3 - Diagrama esquemático de curto-circuito em um alimentador de um sistema reticulado *spot* de três alimentadores, indicando a contribuição dos outros dois alimentadores para a falha por meio do barramento de BT.

A análise do comportamento elétrico de um sistema reticulado por um especialista pode ser eficaz em pequenos trechos ou análises mais simples, mas quando se trata de possibilidades variadas de pontos de falha (contribuições incrementais nas impedâncias “vistas” por cada um dos protetores de rede) realizar esta tarefa fica inviável. Sistemas computacionais dão então agilidade e, no caso do uso de RNA, uma margem de tolerância a variações dos dados de entrada. Essa margem de tolerância para RNA vai depender da topologia escolhida e de seu treinamento.

As RNA, por sua capacidade de generalização, adaptabilidade, robustez e tolerância a falhas e ruídos se mostra como uma ferramenta poderosa de análise (HAYKIN, 2002). Ao se constatar que todas as possibilidades de falhas no sistema reticulado nunca são cobertas durante o treinamento da rede (os locais de curto-circuito podem ser considerados infinitos na visualização do sistema de distribuição como algo contínuo e não discreto) uma ferramenta de análise que leve em conta tolerâncias e ruídos se mostra atraente. Por mais que um algoritmo seja desenvolvido, dificilmente ocorrerá um caso empírico de acordo com o modelo utilizado para treinamento devido às infinitas possibilidades de ponto de falha. Entretanto, quanto maior o número de situações reais utilizadas no treinamento da RNA maior será sua capacidade de sucesso, além do fato de que n medições da mesma falha contribuem para uma melhor decisão sobre sua característica.

Para a condição de curto-circuito em um dos alimentadores primários tem-se um modelo de circuito equivalente com várias fontes (referente aos outros alimentadores), contribuindo para a condição de falha. Na Figura 3-4 o modelo completo de um alimentador é ilustrado atuando como fonte para uma falha em outro alimentador, na qual são incluídas as impedâncias dos cabos, dos consumidores e dos transformadores.

Figura 3-4 – Diagrama de impedância P.U. da falha em um circuito reticulado tipo *spot network*.

A análise do circuito em falha pode ser simplificada com a verificação do circuito equivalente de Thévenin a partir do protetor de redes ligado ao ramal do alimentador em falha. Tal equivalente é obtido por meio das tensões e correntes naquele ponto no instante do defeito. Entretanto, há de se considerar que cada par de sinais de tensão e corrente capturados em cada relé digital do protetor de redes equivale a uma fonte de Thévenin, neste caso de falha trifásica.

Figura 3-5 - Circuito equivalente do Diagrama de impedância P.U. de falha trifásica à terra em um circuito reticulado tipo *spot network*.

O circuito da Figura 3-5 pode ser expandido para aquele mostrado na Figura 3-6, que indica a contribuição de N fontes equivalentes Thévenin referentes às N subestações BT que contribuirão como fontes para a falha no alimentador.

Figura 3-6 - Diagrama unifilar do circuito equivalente de Thévenin, visto a partir do protetor de redes instalado no ramo do alimentador em falha.

A seguir são analisadas, para um sistema de distribuição reticulado tipo *spot*, os principais tipos de falhas cujos resultados de suas simulações são utilizados na metodologia de diagnóstico automático de falhas apresentada no Capítulo 4.

3.2. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO NO ALIMENTADOR DE UM SISTEMA RETICULADO *SPOT* POR MEIO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

São apresentadas neste item análises relativas às correntes de falha nos alimentadores de um sistema reticulado tipo *spot network*, por meio de diagramas de seqüência de fase – componentes simétricas (STEVENSON, 1978; OLIVEIRA, 1996), com a finalidade de melhor compreender o comportamento das tensões e correntes durante o defeito sugerido.

Considere-se uma rede simplificada de um sistema reticulado *spot* com apenas uma câmara transformadora (CT) de baixa tensão (BT), na qual ocorre um defeito num dos alimentadores primários conforme Figura 3-7, em duas situações distintas.

Figura 3-7 – Diagrama unifilar simplificado (apenas uma câmara transformadora de BT) de um sistema reticulado *spot*, com falhas no Alimentador 1 localizadas: a) a jusante do local de instalação do transformador do reticulado, e (b) a montante do local de sua instalação.

A razão da representação de posições diferenciadas de curto na Figura 3-7 é para demonstrar que cada uma delas apresenta um diagrama de seqüência de fase diferenciado. Ao se montar uma rede com várias câmaras transformadoras uma análise deste tipo se torna praticamente inviável.

São considerados para análises as condição de operação de chaves de proteção indicadas na Figura 3-7 divididas da seguinte maneira:

- Condição pré-falha: situação **SS0**;
- Condição de operação sob falha: situação **SS1**;
- Condição após desligamento de D1 (disjuntor do alimentador defeituoso) e antes do desligamento de P1 (protetor de redes do transformador ligado ao alimentador sob falha): situação **SS2**;
- Condição após desligamento de D1 e de P1: situação **SS3**.

Diagramas de seqüência com as conexões para diferentes tipos de curto-circuito (curto-circuito trifásico-terra, curto-circuito 2 fases-terra e curto-circuito fase-terra), para as situações SS1 e SS2, desprezando-se a carga, são apresentadas nas seguintes figuras:

- Figura 3-8: situação SS1 para falha a jusante da câmara transformadora;
- Figura 3-9: situação SS2 para falha a jusante da câmara transformadora;
- Figura 3-10: situação SS1 para falha a montante da câmara transformadora;
- Figura 3-11: situação SS2 para falha a montante da câmara transformadora.

Legenda para a Figura 3-8, a Figura 3-9, a Figura 3-10 e a Figura 3-11:

- Z_{s0}, Z_{s1}, Z_{s2} : impedâncias seqüenciais equivalentes do sistema.
- $Z_{c0}, Z_{c'0}, Z_{c''0}$: impedâncias de seqüência zero de trechos de cabo.
- $Z_{c1}, Z_{c'1}, Z_{c''1}$: impedâncias de seqüência positiva de trechos de cabo.
- $Z_{c2}, Z_{c'2}, Z_{c''2}$: impedâncias de seqüência negativa de trechos de cabo.
- $Z_{Tr0}, Z_{Tr1}, Z_{Tr2}$: impedâncias seqüenciais do transformador (CT) .
- I_0, I_1, I_2 : correntes de seqüência zero, positiva e negativa.
- $I_{cabo 0}, I_{cabo 1}, I_{cabo 2}$: correntes de seqüência zero, positiva e negativa no cabo do alimentador com defeito.
- $I_{Tr0}, I_{Tr1}, I_{Tr2}$: correntes de seqüência zero, positiva e negativa no transformador.

Figura 3-8 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação anterior à abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS1. Defeito a jusante da câmara transformadora.

a) Curto-circuito trifásico-terra.

b) Curto-circuito fase-terra.

c) Curto-circuito 2 fases-terra.

Figura 3-9 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação logo após a abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e antes da abertura do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS2. Defeito a jusante da câmara transformadora.

Figura 3-10 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação anterior à abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS1. Defeito a montante da câmara transformadora.

a) Curto-circuito trifásico-terra.

b) Curto-circuito fase-terra.

c) Curto-circuito 2 fases-terra.

Figura 3-11 - Diagramas de seqüência para diferentes tipos de curto-circuito - situação logo após a abertura do disjuntor do alimentador defeituoso e antes da abertura do protetor do transformador ligado a esse alimentador – SS2. Defeito a montante da câmara transformadora.

Na situação SS1 existem contribuições dos transformadores do reticulado na alimentação da falha pelo caminho paralelo vindo do outro alimentador, por meio dos dois transformadores em série do modelo apresentado na Figura 3-7 (potência reversa do transformador ligado ao alimentador 1). Entretanto, essa contribuição depende do tipo de falha, conforme comparativo da Figura 3-8 e da Figura 3-10.

Com o defeito ocorre a abertura do disjuntor do alimentador sob falha (situação SS2). Há também a abertura do protetor de redes situado no secundário do transformador ligado ao alimentador defeituoso, eliminando as correntes de falha (situação SS3).

O tempo de atuação do protetor depende dos ajustes dessa proteção onde é provável que a atuação se dê após a abertura do disjuntor do alimentador. Neste caso há alimentação da falha exclusivamente pelo alimentador 2, ainda por meio dos dois transformadores em série, até que haja a abertura do protetor. Essa alimentação também depende do tipo de falha, conforme comparativo da Figura 3-9 e da Figura 3-11. Nestas figuras são apresentados, para a situação SS2, os diagramas sequenciais com as conexões para diferentes tipos de curto-circuito, desprezando a carga para simplificação.

Na situação SS1 haverá, normalmente, passagem da corrente de falha nos secundários dos transformadores nos 3 tipos de falha. Na situação SS2 haverá passagem da corrente de falha nos secundários dos transformadores apenas nas falhas 3 fases-terra e 2 fases-terra. Na falha fase-terra o circuito equivalente fica aberto, não permitindo a passagem da corrente de falha. Este fato é muito importante na determinação de uma metodologia de localização do defeito, pois no caso da falha fase-terra há dificuldades de reconhecimento de um padrão de comportamento.

Como para a situação SS1 existem 2 caminhos paralelos para as correntes de falha (pelo alimentador defeituoso e pelos transformadores). As correntes de falha que passam pelos transformadores são bem menores na situação SS1 do que na situação SS2 para falhas trifásica-terra e 2 fases-terra, devido ao fato de que a maior parte da corrente de falha na situação SS1 passa pelo alimentador com defeito.

3.3. PARÂMETROS PARA SIMULAÇÕES DE FALHAS NOS CIRCUITOS ALIMENTADORES DE UM SISTEMA RETICULADO *Spot*

Foram realizadas simulações de vários tipos de falhas e em várias condições, para verificação dos comportamentos e padrões das formas de onda de tensão e corrente e fornecimento de parâmetros para determinação de uma metodologia de localização do defeito ocorrido. O simulador escolhido para fornecer tais parâmetros de estudo foi o ATP (*Alternative Transients Program*) que é uma versão gráfica do EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), fornecido pela *Canadian/American EMTP Users Group*, com modelagem que considera as características não lineares do transformador sob falha pelas características de saturação do mesmo e o modelo de impedância dos cabos. Foram realizadas duas formas de simulação:

- no domínio do tempo, com a obtenção dos valores instantâneos das grandezas ao longo do tempo;
- em regime permanente, com a obtenção dos fasores das grandezas.

A configuração da rede de distribuição utilizada foi: sistema de distribuição subterrâneo reticulado tipo *spot network* com tensão primária de 13,8 kV e secundária de 380/220 V, 3 alimentadores primários e 8 câmaras transformadoras, cada uma com número variado de transformadores com potências nominais de 500 kVA ou 1000 kVA.

A Figura 3-12 mostra a configuração do sistema reticulado hipotético montado para simulação, baseado em dados fornecidos pela concessionária de distribuição de energia elétrica CEB (Brasília, Brasil, em 2005). Sua legenda é a seguinte:

- três circuitos alimentadores de média tensão: Circuito 1, Circuito 2 e Circuito 3;
- oito câmaras transformadoras com 2 ou 3 transformadores ligados em cada uma;
- cada transformador possui a seguinte legenda: TRX-Y, onde X indica o número da câmara transformadora (de 1 a 8) e Y indica o número do transformador na câmara;
- 30 pontos de simulação de falha distantes 100m um do outro, distribuídos junto aos cabos tronco, indicados como PN, onde N é o número do ponto;

- 20 pontos de simulação de falha distantes 100m um do outro, distribuídos junto aos cabos ramais, indicados como **TXPN**, onde X indica o número da câmara transformadora atendida pelo ramal (variando de 1 a 8) e N é o número do ponto;
- 8 barras de baixa tensão com a legenda **TXSF-L**, onde X indica o número da câmara transformadora (de 1 a 8) e F indica a fase da barra (A, B ou C).

Os parâmetros dos componentes utilizados nas simulações estão descritos a seguir, baseados nos componentes da Figura 3-12.

DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA RETICULADO *SPOT* - 13800/380V

Figura 3-12 - Configuração da rede utilizada nas simulações.

3.3.1. Fonte

A fonte para a análise do circuito proposto está localizada na subestação de distribuição (SE AT/MT), com as seguintes características (WESTINGHOUSE, 1964):

- Potência de curto-circuito admitida no ponto de alimentação da SE AT/MT: Trifásico: 2000 MVA.
- Transformadores de potência AT/MT da SE: 3 x 25 MVA trifásicos em paralelo.
- Impedância: 15 %.
- Potência de base: 25 MVA.
- Tensões nominais: 138/13,8 kV.
- Ligação: delta-estrela.

3.3.2. Cabos dos Alimentadores

Para a representação dos cabos foi usado o modelo de parâmetros distribuídos do ATP com os parâmetros de entrada calculados por meio de sua rotina *Cable Constants*, considerando os seguintes dados:

3.3.2.1. Condutores

- a) Tronco: condutor: 95 mm², cobre; blindagem: 20 mm², cobre
- b) Ramais de derivação para as câmaras transformadoras: condutor: 35 mm², cobre; blindagem: 20 mm², cobre.

3.3.2.2. Dimensões

(Nota: Espessuras das isolações e secções das blindagens compatíveis com cabo de classe 15 kV utilizado na AES Eletropaulo).

Figura 3-13 - Secção do cabo subterrâneo considerado.

a) Condutor: 95 mm², cobre; blindagem: 20 mm², cobre, onde, para a Figura 3-13, tem-se:

- $R1 = 0 \text{ mm}$ (raio do canal central do condutor);
- $R2 = 15,8 \text{ mm}$ (raio sobre o condutor);
- $R3 = 39,3 \text{ mm}$ (raio sobre a isolação);
- $R4 = 46 \text{ mm}$ (raio sobre a blindagem);
- $R5 = 51,8 \text{ mm}$ (raio externo).

b) Condutor: 35 mm², cobre; blindagem: 20 mm², cobre, onde, para a Figura 3-13, tem-se:

- $R1 = 0 \text{ mm}$ (raio do canal central do condutor);
- $R2 = 15,8 \text{ mm}$ (raio sobre o condutor);
- $R3 = 39,3 \text{ mm}$ (raio sobre a isolação);
- $R4 = 46 \text{ mm}$ (raio sobre a blindagem);
- $R5 = 51,8 \text{ mm}$ (raio externo).

3.3.3. Transformadores das Câmaras Subterrâneas

3.3.3.1. Ligação: delta-estrela

Correspondências entre enrolamentos de MT e BT consideradas para as simulações:

- AB/an;
- BC/bn;
- CA/cn .

Se as ligações reais forem diferentes, não haverá comprometimento dos resultados, pois as convenções quanto às denominações das fases não são relevantes neste estudo.

3.3.3.2. Potências e impedâncias

- 500 kVA: $z=5\%$; $x/r = 4,5$.
- 1000 kVA: $z=5,75\%$; $X/R = 5,5$.

Os valores de potências e impedâncias são compatíveis com especificações da companhia CPFL (*Transformador de Distribuição Trifásico Pedestal - 2003*); da companhia Westinghouse (*Electrical Transmission and Distribution Reference Book – 1964*) e da norma IEEE Std. 141-1991 (*Recommended Practices for Electric Power Distribution for Industrial Plants*).

3.3.3.3. Corrente de excitação

Foi utilizada uma corrente de excitação em tensão nominal de 1,6%, (CPFL, 2003), além de uma curva de saturação $v \times i$ hipotética, sem histerese, com relação linear até 1.1 pu da tensão nominal e inclinação de 30% para valores superiores.

3.3.3.4. Perda em vazio dos transformadores

Para cálculo da resistência equivalente do ramo de magnetização, foram utilizados as seguintes perdas:

- Trafo de 500 kVA: 1300 W (CPFL,2003).
- Trafo de 1000 kVA: admitido o dobro da perda em vazio do trafa de 500 kVA, ou 2600 W.

3.3.4. Aterramentos

Considerações sobre aterramentos utilizados:

- a) Resistência equivalente da malha de aterramento: $0,5 \Omega$;
- b) Resistência de aterramento ao longo dos alimentadores: 10Ω ;
- c) Blindagens dos cabos conectados aos aterramentos nos locais: SE, troncos (em pontos de derivação de ramais) e ramais (nos locais dos transformadores);
- d) Aterramento comum (único) para todos os alimentadores nos diversos pontos.

3.3.5. Cargas

Admitida carga indutiva com $FP=0,9$ representada pelo modelo RL série (resistência e indutância em série), com potência aparente igual à soma das potências dos transformadores da câmara transformadora menos a potência de um dos transformadores. Ligação admitida: estrela aterrada.

3.3.6. Tipos de Curto-Circuito

Tipos de curto-circuito considerados:

- a) 3 fases-terra;
- b) duas fases-terra;
- c) uma fase-terra;
- d) situações sem e com impedâncias de defeito.

3.3.7. Tempos de Operação das Proteções

Para as simulações foram admitidos os seguintes instantes e ocorrência de curto-circuito e tempos de operação das proteções:

- a) Instante de ocorrência do curto-circuito: 50 ms.
- b) Instante de abertura do disjuntor do alimentador com defeito: aproximadamente 150ms (100 ms após o instante de ocorrência de curto-circuito + tempo até a passagem pelo zero).
- c) Instante de abertura dos protetores dos transformadores ligados ao alimentador com defeito: aproximadamente 300 ms (250 ms após o instante de ocorrência de curto-circuito + tempo até a passagem pelo zero).

3.3.8. Formas de Simulação

Foram realizadas 3 formas de simulação:

- a) simulação no domínio do tempo, com a finalidade de verificar o comportamento das tensões e correntes ao longo do tempo pela visualização das formas de onda;
- b) cálculo em regime permanente relativo à situação com defeito antes da abertura do disjuntor do alimentador e dos protetores, visando determinar os valores em regime nesta situação;
- c) cálculo em regime permanente relativo à situação com defeito, após a abertura do disjuntor do alimentador mas antes da abertura dos protetores, procurando determinar os valores em regime nesta situação.

3.4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO-TERRA NO ALIMENTADOR 1, SEM CARGA

São mostrados a seguir os resultados das simulações de curto circuito trifásico nos alimentadores de média tensão, referentes a alguns pontos do sistema de distribuição reticulado referidos na Figura 3-12.

3.4.1. Curto-Circuito Trifásico à terra no Ponto P00 – Início do Alimentador, sem carga.

Como o curto-circuito é junto à SE de Distribuição há um afundamento completo da tensão dos três alimentadores enquanto não ocorre o desarme do disjuntor da SE (situação SS1). Já na situação SS2 a tensão irá retomar aproximadamente à metade da tensão nominal até o momento do restabelecimento completo, quando todos os protetores de rede ligados ao alimentador 1 têm se desarmado. Ou seja:

- 0 a 50 ms: situação pré falha (situação SS0);
- 50 a 150 ms: situação SS1, com afundamento de tensão máximo na barra devido ao curto-circuito (tensões nulas por curto-circuito ser no início do alimentador, junto à barra da SE);

- 150 a 300 ms: situação SS2, onde as tensões não se normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Após 300 ms: normalização com a abertura dos protetores (situação SS4).

Algumas formas de onda de tensão e corrente da simulação da falha, tanto da média tensão como da baixa tensão, são mostradas a seguir.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE.

Figura 3-14 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 3F-terra – P00).

b) Correntes na saída do Alimentador 1.

Figura 3-15 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 3F-terra – P00).

c) Tensões nas cargas dos transformadores das câmaras transformadoras CT1 e CT7, localizadas respectivamente a 300m e 3200 m da SE de distribuição.

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão máximo devido ao curto-circuito (tensões nulas por curto-circuito ser no início do alimentador, junto à barra da SE);
- situação SS2: As tensões não se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito - ficam em torno de 50% do nível normal;
- normalização com a abertura de todos os protetores de rede do alimentador 1.

Figura 3-16 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra – P00).

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7

Comentários:

- situação SS1: Não há sobrecorrentes nos transformadores no início do curto-circuito, até a abertura do disjuntor do alimentador com defeito, devido à queda total de tensão na barra da SE;
- situação SS2: Sobrecorrentes nos transformadores após a abertura do disjuntor do alimentador com defeito; correntes um pouco maiores nos transformadores da CT1 do que da CT7 (defeito mais próximo à CT1).

Figura 3-17 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 (curto 3F-terra – P00).

Figura 3-18 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 (curto 3F-terra – P00).

Figura 3-19 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra – P00).

Figura 3-20 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra – P00).

3.4.2. Curto-Circuito Trifásico à terra no Ponto P15 – Aproximadamente na Metade do Alimentador, sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões não se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

Figura 3-21 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 3F-terra, P15).

b) Correntes nas saídas do Alimentador 1

Figura 3-22 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 3F-terra, P15).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão a partir da ocorrência de curto-circuito;
- situação SS2: as tensões não se normalizam com a abertura do disjuntor do alimentador com defeito; ficam em torno de 50% do nível normal;
- Normalização com a abertura dos protetores.

Figura 3-23 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1 (curto 3F-terra, P15).

Figura 3-24 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra, P15).

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7

Comentários:

- situação SS1: sobrecorrentes nos transformadores desde o início do curto-circuito; correntes bem maiores nos transformadores da CT7 do que da CT1;
- situação SS2: aumento da sobrecorrentes nos transformadores após a abertura do disjuntor do alimentador com defeito.

a) TR1-1.

b) TR1-2.

Figura 3-25 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 3F-terra, P15).

a) TR7-1

b) TR7-2

Figura 3-26 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 3F-terra, P15).

3.4.3. Curto-Circuito Trifásico à terra no final do alimentador 1 - Ponto P30, sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões não se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores de rede.

Figura 3-27 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 3F-terra, P30).

b) Correntes nas saídas do Alimentador 1

Figura 3-28 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 3F-terra, P30).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão a partir da ocorrência de curto-circuito;
- situação SS2: as tensões não se normalizam com a abertura do disjuntor do alimentador com defeito; ficam em torno de 50% do nível normal;
- Normalização com a abertura dos protetores.

a)

b)

Figura 3-29 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 3F-terra, P30).

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7

Comentários:

- situação SS1: sobrecorrentes nos transformadores desde o início do curto-circuito; correntes bem maiores nos transformadores da CT7 do que da CT1;
- situação SS2: aumento das sobrecorrentes nos transformadores após a abertura do disjuntor do alimentador com defeito.

a) TR1-1

b) TR1-2

Figura 3-30 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 3F-terra, P30).

a) TR7-1

b) TR7-2

Figura 3-31 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 3F-terra, P30).

3.4.4. Comparativo de Correntes em Função da Localização do Ponto de Falha, para Falhas tipo Trifásio-Terra, sem Carga.

São apresentadas a seguir as correntes no lado do secundário dos transformadores da CT1 e CT7, com falha no Alimentador 1, na fase A.

a) Correntes para 3 locais de falha

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica corrente para falha no ponto P00;
- curva em verde indica corrente para falha no ponto P15;
- curva em azul indica corrente para falha no ponto P30.

Figura 3-32 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 3F-terra).

Comentários:

- situação SS1: há influência nítida do local do defeito nas correntes; entretanto, os níveis das correntes são baixos;
- situação SS2: há influência do local de defeito nas correntes, mas as diferenças relativas não são muito grandes; os níveis das correntes são elevados.

a) Correntes para 3 locais de falha

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica corrente para falha no ponto P00;
- curva em verde indica corrente para falha no ponto P15;
- curva em azul indica corrente para falha no ponto P30.

Figura 3-33 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos: a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 3F-terra).

Comentários:

- situação SS1: há influência nítida do local do defeito nas correntes; as correntes são bem maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: há influência do local de defeito nas correntes, mas as diferenças relativas não são muito grandes; os níveis das correntes são elevados.

3.5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-FASE-TERRA NO ALIMENTADOR 1, SEM CARGA

São mostrados a seguir os resultados das simulações de curto circuito dupla fase-terra nos alimentadores de média tensão, referentes a alguns pontos do sistema de distribuição reticulado referidos na Figura 3-12.

3.5.1. Curto-Circuito Dupla Fase à Terra no Ponto P00 – Início do Alimentador, sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE

Figura 3-34 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 2F-terra –P00).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão máximo na barra, em 2 fases, devido ao curto-circuito (tensões nulas por curto-circuito ser no início do alimentador, junto à barra da SE);
- situação SS2: as tensões não se normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

b) Correntes nas saídas do Alimentador 1

Figura 3-35 – Gráfico de corrente (ampéres) versus tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 2F-terra – P00).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

Figura 3-36 – Gráfico de tensão (volts) versus tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 2F-terra – P00).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão nas 3 fase devido ao curto-circuito, com afundamento máximo em uma das fases (devido ao curto-circuito ser no início do alimentador, junto à barra da SE);
- situação SS2: as tensões não se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7.

Figura 3-37 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 2F-terra –P00).

Figura 3-38 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 e b) TR7-2 (curto 2F-terra –P00).

Comentários:

- situação SS1: não há sobrecorrente nos transformadores devido ao curto-circuito ser no início do alimentador (tensão nula em 2 fases);
- situação SS2: sobrecorrente nas 3 fases; sendo de maior intensidade em uma das fases (A) do que em outras duas fases (a corrente maior é aproximadamente a soma das correntes das outras duas fases, com sinal oposto); correntes das fases B e C são quase iguais.

3.5.2. Curto-Circuito Dupla Fase à Terra no Ponto P15 – Meio do Alimentador – sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE

Figura 3-39 – Gráfico de tensão (volts) versus tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 2F-terra –P15).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra, em 2 fases, devido ao curto-circuito;

- situação SS2: as tensões não se normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

b) Correntes nas saídas do Alimentador 1

Figura 3-40 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 2F-terra – P15).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

a)

b)

Figura 3-41 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 2F-terra – P15).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão nas 3 fases devido ao curto-circuito, com afundamento maior em uma das fases do que nas outras;
- situação SS2: as tensões não se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7

Figura 3-42 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 2F-terra –P15).

Figura 3-43 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 2F-terra –P15).

Comentários:

- situação SS1: há sobrecorrentes nos transformadores quando ocorre o curto-circuito, sendo de maior intensidade em uma das fases (A) do que em outras duas fases; sobrecorrentes consideravelmente maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: sobrecorrente nas 3 fases; sendo de maior intensidade em uma das fases (A) do que em outras duas fases (a corrente maior é aproximadamente a soma das correntes das outras duas fases, com sinal oposto); correntes das fases B e C são quase iguais.

3.5.3. Curto-Circuito Dupla Fase à Terra no Ponto P30 – Extremo do Alimentador – sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE

Figura 3-44 – Gráfico de tensão (volts) versus tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto 2F-terra –P30).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra, em 2 fases, devido ao curto-circuito;

- situação SS2: as tensões não se normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

b) Correntes nas saídas dos Alimentador 1

Figura 3-45 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto 2F-terra –P30).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

a)

b)

Figura 3-46 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto 2F-terra –P30).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão nas 3 fase devido ao curto-circuito, com afundamento maior em uma das fases do que nas outras;
- situação SS2: as tensões não se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;
- Normalização com a abertura dos protetores.

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7

Figura 3-47 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto 2F-terra –P30).

Figura 3-48 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto 2F-terra –P30).

Comentários:

- situação SS1: há sobrecorrentes nos transformadores devido quando ocorre o curto-circuito, sendo de maior intensidade em uma das fases (A) do que em outras duas fases; sobrecorrentes bem maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: sobrecorrente nas 3 fases; sendo de maior intensidade em uma das fases (A) do que em outras duas fases (a corrente maior é aproximadamente a soma das correntes das outras duas fases, com sinal oposto); correntes das fases B e C são quase iguais.

3.5.4. Comparativo de Tensões e Correntes em Função da Localização do Ponto de Falha, para Falhas tipo Dupla Fase-Terra, sem Carga.

São apresentadas as tensões no lado do secundário dos transformadores da CT1, com falha no Alimentador 1 na fase A.

Tensões na carga:

a) Tensões para 3 locais de falha

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica tensão para falha no ponto P00;
- curva em verde indica tensão para falha no ponto P15;
- curva em azul indica tensão para falha no ponto P30.

Figura 3-49 – Gráfico de tensão (V) versus tempo (segundos) no secundário dos transformadores TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 2F-terra).

São apresentadas a seguir as correntes no lado do secundário dos transformadores da CT1 e CT7, com falha no Alimentador 1, na fase A (correntes na fase de maior corrente de falha).

Figura 3-50 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 2F-terra).

Figura 3-51 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto 2F-terra).

Comentários:

- situação SS1: há influência nítida do local do defeito nas correntes; as correntes são bem maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: há influência do local de defeito nas correntes, mas as diferenças relativas não são muito grandes; os níveis das correntes são elevados.

3.6. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA NO ALIMENTADOR 1, SEM CARGA

São exibidos a seguir os resultados das simulações de curto circuito fase-terra nos alimentadores de média tensão, referentes a alguns pontos do sistema de distribuição reticulado referidos na Figura 3-12.

3.6.1. Curto-Circuito Fase-Terra no Ponto P00 – Início do Alimentador, sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE.

Figura 3-52 – Gráfico de tensão (volts) versus tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto fase-terra –P00).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra, em 1 fase, devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito, diferentemente de curto-circuito 3FT e 2FT.

b) Correntes nas saídas do Alimentador 1.

Figura 3-53 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto fase-terra – P00).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7.

Figura 3-54 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto fase-terra –P00).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão em 2 fases devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7.

Figura 3-55 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto fase-terra –P00).

Figura 3-56 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto fase-terra –P00).

Comentários:

- situação SS1: não há sobrecorrentes nos transformadores pelo fato de curto-circuito ser no início do alimentador;
- situação SS2: não há sobrecorrentes nos transformadores, apenas pequena corrente (capacitâncias dos cabos).

3.6.2. Curto-Circuito Fase-Terra no Ponto P15 – Meio do Alimentador, sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE

Figura 3-57 – Gráfico de tensão (volts) versus tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto fase-terra –P15).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra, em 1 fase, devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito, diferentemente de curto-circuito 3FT e 2FT;

b) Correntes nas saídas do Alimentador

Figura 3-58 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto fase-terra – P15).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

Figura 3-59 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto fase-terra –P15).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão em 2 fases devido ao curto-circuito;

- situação SS2: as tensões se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito;

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7

Figura 3-60 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto fase-terra –P15).

Figura 3-61 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto fase-terra –P15).

Comentários:

- situação SS1: há sobrecorrentes nos transformadores, sendo maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: não há sobrecorrentes nos transformadores, apenas pequena corrente (capacitâncias dos cabos);

3.6.3. Curto-Circuito Fase-Terra no Ponto P30 – Final do Alimentador, sem carga.

a) Tensões na barra de 13,8 kV da SE.

Figura 3-62 – Gráfico de tensão (volts) versus tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição (curto fase-terra –P30).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão na barra, em 1 fase, devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões normalizam totalmente após abertura do disjuntor do alimentador com defeito, diferentemente de curto-circuito 3FT e 2FT.

b) Correntes nas saídas do Alimentador 1.

Figura 3-63 – Gráfico de corrente (ampères) *versus* tempo (segundos) na barra de 13,8 kV da SE de distribuição, alimentador 1 (curto fase-terra – P30).

c) Tensões nas cargas dos transformadores da CT1 e CT7

Figura 3-64 – Gráfico de tensão (volts) *versus* tempo (segundos) na barra BT de 380 V – secundário dos transformadores: a) TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1; b) TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 (curto fase-terra –P30).

Comentários:

- situação SS1: afundamento de tensão em 2 fases devido ao curto-circuito;
- situação SS2: as tensões se normalizam após abertura do disjuntor do alimentador com defeito.

d) Correntes no secundário dos transformadores TR1 e TR7.

Figura 3-65 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT1: a) TR1-1 ; b) TR1-2 (curto fase-terra –P30).

Figura 3-66 – Gráfico de corrente (A) *versus* tempo (segundos) no secundário dos transformadores da câmara transformadora CT7: a) TR7-1 ; b) TR7-2 (curto fase-terra –P30).

Comentários:

- situação SS1: há sobrecorrentes nos transformadores, sendo maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: não há sobrecorrentes nos transformadores, apenas pequena corrente (capacitâncias dos cabos);

3.6.4. Comparativo de Tensões e Correntes em Função da Localização do Ponto de Falha, para Falhas tipo Fase-Terra, sem Carga.

São apresentadas as tensões e correntes no lado do secundário dos transformadores da CT1 e CT7, com falha no Alimentador 1 na fase A.

Tensões na carga em TR1:

a) Tensões para 3 locais de falha

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica tensão para falha no ponto P00;
- curva em verde indica tensão para falha no ponto P15;
- curva em azul indica tensão para falha no ponto P30.

Figura 3-67 – Gráfico de tensão (V) versus tempo (segundos) no secundário do transformadores TR1-1 e TR1-2 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado, b) detalhe (curto fase-terra).

Tensões na carga em TR7:

a) Tensões para 3 locais de falha.

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica tensão para falha no ponto P00;
- curva em verde indica tensão para falha no ponto P15;
- curva em azul indica tensão para falha no ponto P30.

Figura 3-68 – Gráfico de tensão (V) versus tempo (segundos) no secundário do transformadores TR7-1 e TR7-2 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado, b) detalhe (curto fase-terra).

Correntes na CT1, TR1-1.

a) Correntes para 3 locais de falha

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica corrente para falha no ponto P00;
- curva em verde indica corrente para falha no ponto P15;
- curva em azul indica corrente para falha no ponto P30.

Figura 3-69 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto fase-terra).

Correntes na CT7, TR7-1.

a) Correntes para 3 locais de falha

b) detalhe das curvas.

Legenda:

- curva em vermelho indica corrente para falha no ponto P00;
- curva em verde indica corrente para falha no ponto P15;
- curva em azul indica corrente para falha no ponto P30.

Figura 3-70 – Gráfico de corrente (A) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para três pontos de falha distintos (P00, P15 e P30): a) curvas no período simulado ; b) detalhe (curto fase-terra).

Comentários:

- situação SS1: há influência nítida do local do defeito nas correntes; as correntes são bem maiores na CT7 do que na CT1;
- situação SS2: não há sobrecorrentes.

3.7. INFLUÊNCIA DA CARGA NAS CORRENTES DOS TRANSFORMADORES DURANTE FALHA FASE-TERRA

São analisadas as correntes no secundário dos transformadores, num comparativo de situação de falha com e sem carga, para os pontos P00, P15 e P30.

Verificou-se que as correntes de carga dificultam a caracterização das correntes de falha, quando as correntes de falha e de carga são da mesma ordem de grandeza.

3.7.1. Simulação de Variação de Carga nas Correntes do Transformador TR1-1 da Câmara Transformadora CT1.

Defeito no ponto P00:

a) Sem carga

b) Com carga

Figura 3-71 – Gráfico de corrente (ampères) versus tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P15:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-72 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P30:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-73 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-1 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

3.7.2. Simulação de Variação de Carga nas Correntes do Transformador TR1-2 da Câmara Transformadora CT1.

Defeito no ponto P00:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-74 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P15:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-75 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P30:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-76 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR1-2 da câmara transformadora CT1 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

3.7.3. Simulação de Variação de Carga nas Correntes do Transformador TR7-1 da Câmara Transformadora CT7.

Defeito no ponto P00:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-77 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P15:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-78 – Gráfico de corrente (ampères) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P30:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-79 – Gráfico de corrente (ampères) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-1 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

3.7.4. Simulação de Variação de Carga nas Correntes do Transformador TR7-2 da Câmara Transformadora CT7.

Defeito no ponto P00:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-80 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P00: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P15:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-81 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P15: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

Defeito no ponto P30:

a) Sem carga.

b) Com carga.

Figura 3-82 – Gráfico de corrente (ampéres) *versus* tempo (segundos) no secundário do transformador TR7-2 da câmara transformadora CT7 para o ponto de falha P30: a) curvas sem carga; b) curva com 50% da carga nominal do transformador.

3.8. VERIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS CORRENTES EM FUNÇÃO DO PONTO DE FALHA – CORRENTES NA FASE A.

Neste item são avaliadas as variações dos valores de corrente dos transformadores que estão ligados ao Alimentador 1 (TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1), em regime permanente, quando se compara com os vários pontos de falha simultaneamente. São analisadas as situações SS1 e SS2 e seus resultados.

3.8.1. Variações de Corrente de Falha na Situação SS1.

Figura 3-83 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto fase-terra, situação SS1.

Figura 3-84 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto dupla fase-terra, situação SS1.

Figura 3-85 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS1.

Comentários:

- Verifica-se que as correntes assumem valores máximos para o ponto de defeito mais próximo do transformador em questão e, de uma forma geral, tendem a diminuir conforme o ponto de defeito se distancia do transformador. Isso indica uma possibilidade de se identificar um

comportamento das correntes que possa ajudar na localização do ponto de defeito.

- Aparentemente o defeito em ponto muito próximo à barra de MT da SE tende a quebrar um comportamento simples em função da distância entre transformador e ponto de defeito, devido ao fato de causar grande queda de tensão durante a falha.
- As correntes nos transformadores próximos à SE são relativamente baixas, podendo sofrer influência significativa das correntes de carga e dificultar o discernimento entre a corrente de carga e a contribuição à corrente de defeito.

3.8.2. Variações de Corrente de Falha na Situação SS2.

Figura 3-86 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto fase-terra, situação SS2.

Figura 3-87 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto dupla fase-terra, situação SS2.

Figura 3-88 – Gráfico comparativo da evolução dos valores de corrente dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS2.

Comentários:

- Conforme esperado o defeito fase-terra não produz sobrecorrentes nos transformadores devido à ligação delta-estrela. Portanto, nesse caso, as correntes não fornecem informações que possibilitem associar corrente com a localização do ponto de falha.

- Os defeitos 3FT e 2FT produzem correntes relativamente altas. Isso pode facilitar a indicação do tipo de defeito.
- Nesses casos, as correntes tendem a ser maiores para o defeito no ponto mais próximo ao transformador em questão. Isso indica uma possibilidade de identificar um comportamento das correntes que ajude na localização do ponto de defeito. Entretanto, as diferenças em função da localização do defeito são relativamente pequenas.

3.9. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA IMPEDÂNCIA DURANTE FALHA DO SISTEMA RETICULADO

A Figura 3-89 mostra os valores das impedâncias equivalentes “vistas” de cada transformador em função do ponto de falha. As impedâncias foram calculadas dividindo-se o módulo da tensão pela corrente (no lado do secundário dos transformadores). Considerou-se o caso de defeito trifásico. As impedâncias são dadas em valores por unidade (pu) referente aos valores nominais de cada transformador. A impedância em ohm foi calculada dividindo a tensão (V) pela corrente (A). O valor porcentual foi calculado em relação à impedância de base $Z_{base} = 380^2 / 1.000.000$ para transformador de 1.000 kVA e $Z_{base} = 380^2 / 500.000$ para transformador de 500 kVA. São considerados os transformadores que estão ligados ao alimentador com defeito (Alimentador 1).

Figura 3-89 – Gráfico comparativo da variação dos valores de impedância vista dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS2, impedância de falha nula.

De forma geral, o menor valor de impedância verifica-se com o ponto mais próximo ao transformador. Apenas no caso do transformador T1 não se verifica exatamente esse comportamento (os pontos mais próximos são P05 e P00, o valor mínimo de impedância é observado para o ponto P10).

A menor impedância é verificada no transformador T5. Cabe lembrar que T5 é transformador de 500 kVA cuja impedância nominal é 5%, enquanto os demais transformadores verificados são de 1000 kVA, cujas impedâncias nominais são de 5,75%; isto é, a impedância nominal percentual do T5 é menor do que dos demais.

Verificação com impedância de defeito de 1 Ω /fase, a partir da mesma metodologia, pode ser vista na Figura 3-90.

Figura 3-90 – Gráfico comparativo da variação dos valores de impedância vista dos transformadores TR1-1, TR3-1, TR4-1, TR5-1, TR6-1 e TR7-1, para curto trifásico à terra, situação SS2, impedância de curto de 1 ohm.

De forma geral, mantém-se a tendência de o menor valor de impedância ocorrer para o ponto de defeito mais próximo ao transformador.

3.10. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA RETICULADO SIMULADO

Por meio do comportamento de todas as curvas simuladas foi possível identificar a existência de um comportamento padronizado, tendo como regra geral o fato de

quanto mais afastado da subestação de distribuição, maior será a corrente de curto circuito, passando por um máximo quando o local da falha se aproxima da corrente avaliada.

Este padrão é bem mais acentuado na situação SS1. Já na situação SS2, após o desligamento da proteção da SE de distribuição, existe uma retomada das tensões dos outros alimentadores que não estão sob falha, o que aproxima tais valores de tensão (as variações se tornam praticamente sutis).

Os comportamentos mais acentuados que ocorrem em SS1 tendem a facilitar convergências de algoritmos e a minimizar erros de leitura, facilitando a convergência da metodologia baseada em RNAs apresentada no próximo capítulo. Optou-se pois por estruturar a metodologia de diagnóstico de falhas por RNA nas variações mais acentuadas que ocorrem na situação SS1, a partir dos valores de tensão e corrente medidas nos relés digitais de proteção dos transformadores do sistema reticulado durante uma falha.

Outro fator que se mostrou relevante foi o referente às correntes de carga dos transformadores, principalmente nos casos de falhas fase-terra por apresentarem comportamentos bastante distintos para os casos com e sem carga, para ambas as situações SS1 e SS2. Como parâmetros de entrada da metodologia baseada em RNA são consideradas também situações com e sem carga.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO, APLICAÇÃO E RESULTADOS DE METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS EM SISTEMAS RETICULADOS *SPOT* BASEADA EM REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS (RNA)

Por meio dos avanços dos sistemas de telecomunicações e dos sistemas computacionais, é possível atualmente atender à demanda de sistemas de monitoramento. Todavia existe o problema de extrair a informação ou mesmo interpretá-la devido a grande quantidade de informação disponível.

Este problema motiva a exploração de novas técnicas de processamento de dados como as RNA, as quais têm provado seu potencial em áreas como previsão, aproximação, classificação e controle. O Apêndice A trata de apresentar a teoria que envolve as RNA e está organizado em definição das RNA, sua história e desenvolvimento, como operam por meio de regras e algoritmos e quais as principais topologias. e finalmente a relação das RNA e os sistemas de detecção de falhas.

Com o intuito de desenvolvimento de ferramentas avançadas para sistemas de monitoramento, este capítulo apresenta o desenvolvimento, a aplicação e os resultados de uma metodologia de análise automática de falhas tipo curto-circuito ocorridas nos alimentadores de MT de sistemas reticulados tipo *spot*. A metodologia é baseada em registros obtidos em medições durante eventos de *tripping* por potência reversa dos relés dos equipamentos protetores de rede, que são capazes de realizar leituras de corrente de curto circuito.

4.1. APLICAÇÃO DE RNA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Sistemas elétricos de potência são complexos de serem analisados por envolverem inúmeros componentes na sua estrutura. Trabalhos baseados em ferramentas matemáticas que se dispõem a modelar tais sistemas esbarram na complexidade de variáveis impostas pelos arranjos reais quando comparados com arranjos simplificados utilizados em simulação. A evolução das ferramentas computacionais ajuda a diminuir a distância entre casos de êxito simulados e casos reais, deixando as barreiras aos sucessos mais por conta do sucesso da modelagem dos sistemas.

Uma ferramenta como a RNA, que possui uma capacidade intrínseca de representar matematicamente sistemas reais complexos sem a necessidade de modelamentos matemáticos também complexos, têm sido cada vez mais utilizadas em sistemas elétricos de potência. Estudos realizados em 1995 (DILLON; NIEBUR; 1995) já revelaram uma compilação das seguintes aplicações básicas de sistemas de potência:

- Tratamento de alarmes.
- Previsão de carga.
- Diagnostico de falhas.
- Avaliação de estados.
- Análise de estabilidade.
- Planejamento operacional.
- Identificação e controle.

OLESKOVICZ *et al.* (2003) discorrem sobre o emprego de RNA como classificador de padrões de falhas, utilizadas para adquirirem conhecimento para detecção, classificação e localização da falha em sistemas de transmissão em diferentes situações. Também analisando linhas de transmissão SANTOS (2004) emprega uma metodologia de análise de impedâncias vistas do lado da subestação de transmissão que suporta a falha na linha.

Inúmeros trabalhos com linhas de transmissão baseados em RNA surgiram na última década e as pesquisas mais recentes têm se ramificado em análises de sistemas de

distribuição, particularmente radiais. Entretanto, tais aplicações se concentram em medições que ocorrem nas SE de distribuição pela própria característica de radialidade dos sistemas tratados. DAS *et al.* (2000) tratam de um protótipo localizador de falhas para linhas de sub-transmissão e distribuição, que serviu de referência para vários trabalhos que se desenvolveram posteriormente com RNA, utilizando-se da técnica de análise do comportamento da rede.

As maiores barreiras encontradas para localização de falhas de sistemas de distribuição são (THUKARAM *et al.*, 2005):

- Poucas medições disponíveis ao longo do alimentador;
- Medições não disponíveis de disjuntores e status de relés;
- O número de geradores em operação muda ao longo dos dias, com condições de medição diferenciadas.

A solução proposta aos sistemas reticulados contra tais dificuldades foi a de efetuar análises à partir de registros lidos da rede de baixa tensão, minimizando os problemas de número de sinais disponíveis para análise e o problema de geradores em operação ao longo do dia, mas acrescentado o problema da não linearidade dos transformadores. No caso de uma falha, a proposta para minimizar tal dificuldade adicional é justamente buscar a solução no uso das RNA e sua capacidade de solução de problemas complexos com menor grau de formalismo matemático.

RNAs têm sido aplicadas com sucesso em localização de falhas em sistemas de distribuição nas quais informações de estado de relés de proteção e disjuntores são também avaliados (THUKARAM *et al.*, 2005). O uso de RNA para análise dos parâmetros de tensão e corrente na distribuição pode ser encontrado em trabalhos como ZHU *et al.* (1997) e DAS *et al.* (2000), enquanto que na transmissão PURUSHOTHAMA *et al.* (2001) e YANG *et al.* (1992) trabalham o mesmo estilo de análise: a partir da subestação de distribuição ou da subestação de transmissão.

Este trabalho se propõe a analisar o problema de localização de falhas nos alimentadores de MT por meio da metodologia desenvolvida. A mesma utiliza os registros coletados do lado da carga em BT por relés digitais multifunção, sem acréscimo de nenhum tipo de *hardware* adicional (GARCIA *et al.*, 2004). Todo o

processo de análise se dá no nível de um sistema supervisorio por meio do uso de RNAs previamente treinadas com registros simulados de falhas.

4.2. TOPOLOGIA DE OPERAÇÃO DA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS SUPORTADA PELO USO DE RNAs

4.2.1. Operacionalização das RNAs pelos Relés Digitais

O comportamento do circuito reticulado, diferentemente daqueles de distribuição radiais, se mostra bastante complexo pelo fato de apresentarem caminhos de circulação reversa do fluxo de potência.

Como alternativa à proposta de Thukaram *et al.* (2005), em que as informações de todos as chaves e fusíveis de um sistema de distribuição radial devem ser lidos para se estabelecer o “caminho” do curto, a metodologia proposta neste trabalho de pesquisa se baseia na análise de apenas um relé. No caso de falha deste, outros estão disponíveis para análise, podendo ser feita uma análise múltipla para confronto e confirmação de resultados.

A razão de não se trabalhar com RNAs que envolvessem todos os registros coletados dos relé digitais concomitantemente deve-se ao fato de que periodicamente um ou outro relé entra em manutenção, existindo a possibilidade de um deles estar desligado no instante da falha. Mesmo obtendo-se parâmetros de treinamento satisfatórios para uma única RNA mais complexa, com dados simulados de vários relés ao mesmo tempo, caso ocorra de um destes relés falhar a análise ficaria comprometida.

Uma análise do ponto de falha a partir da contribuição de vários relés acaba por fornecer uma análise alternativa para a falha, numa espécie de redundância, tendendo inclusive a minimizar erros por possíveis alterações de leituras, pois cada contribuição não seria considerada mais como absoluta, mas por meio de uma análise estatística.

Como os dados para treinamento das RNA provêm de simulação, não há dificuldade na automatização dos procedimentos de obtenção e treinamento das redes. Além disso, redes mais simples acabaram por se mostrar com convergência mais rápida e com resultados mais precisos, desde que as condições de falha mais significativas tenham sido previamente consideradas no treinamento.

4.2.2. Modelagem de uma RNA

A função principal do treinamento de uma RNA é o de atribuir valores (pesos) às variáveis introduzidas, e ajustá-los à medida que parâmetros simulados são atribuídos a estas variáveis. Nesta fase, conhecida como treinamento da RNA, quanto maior for o número de parâmetros atribuída às variáveis de entrada e saída (padrões), melhor resultado pode-se esperar. Este tipo de treinamento é conhecido como treinamento supervisionado, onde para cada vetor de entrada (conhecido) que é aplicado à RNA, é obtida a saída calculada pela rede, comparando se esta à saída previamente conhecida. Este processo dura até que o erro (diferença entre as saídas esperada e calculada) atinja um valor mínimo programado ou o valor máximo de interações determinadas.

4.2.2.1 Modelo de RNA

Foi escolhida a RNA do tipo MLP (redes de neurônios de multicamadas), com regra de aprendizagem por correção de erros (escolhida por sua característica de aproximação de funções e generalização). A rede tipo MLP utiliza o algoritmo *backpropagation*, descrito mais sucintamente no Apêndice A e representado pela Figura 4-1. Resumidamente possui as seguintes etapas:

- A. Ajuste de parâmetros de treinamento: são parâmetros ajustáveis a taxa de aprendizado, número máximo de interações e erro máximo desejado no treinamento.
- B. Início da rede, com valores aleatórios de peso e polarização (*bias*).
- C. Cálculo do vetor de saída da rede para um vetor de entrada.
- D. Cálculo do erro, comparando-se a saída calculada com o valor esperado.

E. Novo ajuste dos pesos do item B. caso a faixa de erro mínimo desejado ou o número máximo de interações pré-estabelecido não tenham sido atingidos. Caso contrário armazena-se pesos e *bias* dos neurônios artificiais e recomeça-se o ciclo de aprendizagem.

Figura 4-1 – Algoritmo de aprendizado *backpropagation*, decrito no Apêndice A.

4.2.2.2 Estrutura das RNAs

A estrutura das RNAs utilizadas está baseada no exemplo de RNA mostrada na Figura 4-2, com variação da combinação do número de neurônios nas camadas ocultas e das funções de transferência.

Figura 4-2 – Estrutura da RNA para classificação e localização de falhas segundo metodologia proposta.

As camadas ocultas e camada de saída referenciadas na Figura 4-2 apresentam funções de ativação, que são funções que determinam se um sinal é passado de um neurônio para outro, podendo ser suave (função tan-sigmoideal ou log-sigmoideal para funções somente positivas) ou brusca (função purelin, com ativação rápida). Para tais funções utilizadas nos treinamentos foram usados os símbolos indicados na Figura 4-3.

Figura 4-3 – Simbologia para representação das funções de ativação dos neurônios das RNAs em treinamento: a) log-sigmoideal; b) tan-sigmoideal; c) purelin.

O número de neurônios presentes nas camadas ocultas (1^a, 2^a. ou 3^a. na Figura 4-2) não deve ser excessivo para não criar o efeito de memorização dos conjuntos de treinamento, ao invés do aprendizado desejado. Isto ocorre porque durante o processo de treinamento os pesos foram ajustados para uma função de maior grau do que aquela que representa o conjunto de treinamento. A função de maior grau passa por todos os pontos da função de interesse e a rede responde ao seu conjunto de treinamento. Para novos vetores de entrada a rede pode responder com saídas diferentes à função de maior grau (SANTOS, 2004).

O número de camadas pode ser restrito, pois uma RNA composta de 3 camadas pode representar qualquer função com número finito de descontinuidades, desde que possua uma função não linear na camada oculta e um número suficiente de neurônios. As funções não lineares mais utilizadas são a sigmóide ou a tangente hiperbólica, que podem ainda ter suas respostas deslocadas linearmente nos eixos pela ação da polarização (HAYKIN, 1994; JACKSON, 1990; WASSERMAN, 1989).

A partir das considerações sobre modelagem e estrutura da RNA é que estas foram desenvolvidas. Os parâmetros são ajustáveis para obtenção dos melhores resultados frente aos dados a serem apresentados à rede.

4.3. MÉTODO DE TREINAMENTO DAS RNAs

A metodologia de treinamento consistiu em variar o número de camadas ocultas, o número de neurônios nas camadas e a taxa de aprendizagem. Devido aos resultados insatisfatórios obtidos com 2 camadas ocultas optou-se por trabalhar com 3, quantidade esta que se mostrou satisfatória (convergência para a maioria das RNAs propostas). Mantendo-se o número de camadas ocultas fixado em 3, variou-se a quantidade de neurônios em cada uma destas camadas, obtendo-se uma grande combinação de possibilidades para as RNA serem treinadas. A automatização do processo de incremento do número de neurônios permitiu a otimização das simulações, com acompanhamento dos melhores resultados obtidos no decorrer das mesmas.

O algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt foi utilizado em todas as RNAs desenvolvidas, devido às suas vantagens comprovadas frente a outros métodos de treinamentos tradicionais como “aprendizagem rápida” e “convergência confiável” (HAGAN e MENHAJ, 1994).

Os parâmetros de treinamento da RNA foram gerados a partir de simulações do sistema reticulado, idênticas às apresentadas no Capítulo 3, para 336 diferentes combinações de carga para pontos de curto circuito, onde foram levantados sinais de tensão e corrente para os locais onde estavam os relés digitais. A partir das oscilografias simuladas é processada uma etapa de tratamento dos sinais (pré-processamento) para obtenção das tensões, correntes e impedâncias. Tal processamento é realizado para adequar os dados às estruturas das RNAs para seus treinamentos.

Os comprimentos dos trechos dos alimentadores tronco e dos alimentadores ramais têm dimensões variadas para minimizar regras geométricas de aprendizagem da RNA (dimensões descritas no Capítulo 3, Figura 3-12). O alimentador tronco possui derivações a ramais variando de trechos de 300 a 900 m. Os ramais possuem comprimentos de 100 m até 700 m.

4.4. METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM ALIMENTADORES DE MT DE SISTEMAS RETICULADOS DE DISTRIBUIÇÃO TIPO *SPOT*

4.4.1. Fluxo dos Dados Desde a Coleta no Relé Digital Até o Diagnóstico automático da Falha

A coleta de sinais de tensão e de corrente que ocorrem nos relés digitais possui um algoritmo para identificação dos períodos SS0, SS1, SS2 e SS3 para os quais são separados os valores de tensão e corrente para cada um destes 4 períodos, disponibilizando os dados para transmissão por um *link* de comunicação até um computador central da concessionária. Os dados coletados e prontos para transmissão são indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Estrutura de registros de falhas coletadas em cada um dos relés digitais em situação curto-circuito nos alimentadores com fluxo reverso de potência.

Parâmetros	SS0	SS1	SS2	SS3
V_A / I_A	Z_{A0}	Z_{A1}	Z_{A2}	Z_{A3}
V_B / I_B	Z_{B0}	Z_{B1}	Z_{B2}	Z_{B3}
V_C / I_C	Z_{C0}	Z_{C1}	Z_{C2}	Z_{C3}
Carga_{CT}	$X\%$	--	--	--

Os valores de Z indicados na Tabela 4-1 são a divisão dos valores eficazes das tensões e correntes de cada fase lidas no relé. A razão de trabalhar com tais impedâncias equivalentes foi o da simplificação dos treinamentos pois estas reduziam o número de variáveis de entrada nos treinamentos das RNA, facilitando as convergências. Estas impedâncias não podem ser consideradas como impedâncias equivalentes de Thèvenin para todos os casos de tipo de falha ou período (SS0 até SS3). O motivo desta consideração é que existem falhas não simétricas como nos casos de falha 1FT e 2 FT e estas apresentam modelos mais complexos de circuitos equivalentes. Tais impedâncias são consideradas simplesmente parâmetros do sistema, onde não couber uma equivalência com o Teorema de Thèvenin (possibilidade da substituição de um trecho do circuito analisado por uma fonte de tensão e uma carga, sem prejuízo dos parâmetros elétricos de funcionamento do mesmo).

A variável Carga_{CT} indicada na Tabela 4-1 é a carga dos transformadores da CT (Câmara Transformadora) em questão (as 8 CTs simuladas estão indicadas na Figura 3-12), no instante pré-falha (período SS0). A forma de cálculo para tal variável ($X\%$) considera a carga da CT e não a carga do transformador, e está baseada nas seguintes referências de carga plena (100%):

- CT com 2 transformadores: carga 100% equivale à potência nominal de 1 transformador (devido ao trabalho em contingência considera-se a perda de 1 transformador);

- CT com 3 transformadores: carga 100% equivale à potência nominal de 2 transformadores (devido ao trabalho em contingência considera-se a perda de 1 transformador).

Cada processo de identificação de tipo de curto-circuito (1FT, 2FT ou 3FT) de cada relé digital possui seu grupo de RNAs previamente treinadas. Então, para cada relé, tem-se 7 RNAs treinadas:

- 1 RNA para identificação do tipo de falha;
- 3 RNAs de localização da abscissa x da coordenada do ponto de falha (uma para falha 1FT, uma para 2FT e uma terceira para falha 3FT);
- 3 RNAs de localização da ordenada y da coordenada do ponto de falha (uma para falha 1FT, uma para 2FT e uma terceira para falha 3FT).

A metodologia de diagnóstico automático de falhas de curto circuito proposta apresenta o fluxograma descrito na Figura 4-4. As saídas do fluxograma são:

- Tipo de curto-circuito (TCC);
- Coordenada geográfica do local provável do curto-circuito referenciado a uma origem (x_0, y_0) .

Figura 4-4 – Fluxograma da metodologia de diagnóstico automático de falha de curto circuito baseada em RNA (tipo e coordenada x_0, y_0 da falha).

4.5. DESENVOLVIMENTO DA RNA “TIPO DE CURTO”

4.5.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos de RNA “Tipo de Curto”.

Durante o processo de treinamento da RNA “Tipo de Curto” foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, X% (usados pontos de curto circuito com 0%, 50% e 100% de carga).
- Dado de saída: tipo de falha 1FT, 2FT ou 3FT (indicados respectivamente pelos números 0,1; 0,2 e 0,3 durante o treinamento).
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do aplicativo de simulação Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª, 2ª. e 3ª. Camadas Ocultas; Log-Sigmoid na Camada de Saída.
- 3 camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-5 – Treinamentos de RNA “Tipo de Curto”, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.

4.5.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos de RNA “Tipo de Curto”.

Após exaustivos ensaios e testes com diferentes configurações de redes neurais foram selecionadas 304 RNAs viáveis, sendo que a de melhor performance foi a que apresentou combinação de 12 neurônios na 1ª. camada oculta, 25 neurônios na 2ª. camada oculta e 8 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 12-25-8 “Tipo de Curto”).

O Toolbox de RNA do aplicativo de simulação Matlab apresenta uma função que mostra uma regressão linear entre os registros de falhas simuladas de entrada que são desejáveis na saída da RNA (valores T – eixo das abscissas) e os próprios dados de saída da RNA (valores A - eixo das ordenadas) - função *Postreg(A,T)*. Os resultados do treinamento da RNA “Tipo de Curto” obtidos no Matlab podem ser vistos na Figura 4-6, com três saídas possíveis relacionadas às falhas 1FT, 2FT e 3FT: 0.1, 0.2 e 0.3 respectivamente. Os valores de T e A neste caso são adimensionais, pois representam um padrão para correlacionar com o tipo de falta. Uma RNA treinada que apresenta resultados ideais teria a seguinte equação de reta: $A = T$, com um índice de correlação R igual à unidade ($R = 1$).

(valores obtidos pela RNA)

Figura 4-6 – Curva de treinamentos da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto”, função *Postreg* do Matlab, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

Na RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” foram testados 370 pontos de curto, distribuídos conforme Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” e percentagem de acerto por tipo de falta.

Carga (%)	Número de pontos testados por tipo de falha		
	Falha 1FT	Falha 2FT	Falha 3FT
0	44	45	45
30	6	6	6
50	44	45	45
70	6	6	6
100	22	22	22
Percentagem de acerto da RNA na identificação do tipo de falha	100%	100%	100%

Os dados da Tabela 4-2 podem ser visualizados na Figura 4-7 e na Figura 4-8. A Figura 4-7 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” para os 334 pontos de 0%, 50 % e 100% de carga. A sobreposição dos pontos indica 100% de relação entre o resultado da simulação e a saída da RNA.

A Figura 4-8 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” para os 36 pontos de 30% e 70% de carga. Da mesma maneira, a sobreposição dos pontos indica 100% de relação entre o resultado da simulação e a saída da RNA.

Para a RNA 12-25-8 “Tipo de Curto”, os dados de diagnóstico apresentaram um índice de 100% de acerto, mesmo para registros de falhas simuladas não utilizadas durante o treinamento da RNA como para carregamentos de 30% e 70% da plena carga.

Figura 4-7 – Comparativo entre os dados esperados e os dados de saída da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto” para identificação do tipo de falha, para 334 pontos de curto circuito com 0%, 50% e 100% da carga máxima.

Figura 4-8 – Comparativo entre os dados esperados e os dados de saída da RNA 12-25-8 “Tipo de Curto”, para 36 pontos de curto circuito com 30% e 70% da carga máxima.

4.6. DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 1FTx”

A RNA 1FTx é uma rede neural desenvolvida para localizar a abscissa $\underline{x}$ da coordenada (x, y) do ponto da falha. Tal dado serve de entrada para a RNA 1FTy além dos parâmetros de impedância e nível de carga.

4.6.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos de RNA 1FTx

Durante o processo de treinamento da RNA 1FTx foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, X% (usados pontos de curto circuito com 0%, 50% e 100% de carga).
- Dado de saída: abscissa x_0 da coordenada ($x_0; y_0$) do ponto de falha.
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª. e 2ª. Camadas Ocultas; Purelin na 3ª. Camada Oculta e na Camada de Saída.
- Camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-9 – Treinamentos da RNA 1FTx, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas, com 705 RNAs viáveis.

4.6.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos da RNA 1FTx

Os resultados do treinamento da RNA 1FTx obtidos pela função de regressão linear *Postreg* do Matlab podem ser vistos na Figura 4-10, com saídas possíveis variando de 0 a 3000 metros. Os valores de T e A neste caso representam a abscissa $\underline{x}$ da coordenada (x,y) do ponto de falha, sendo $\underline{T}$ a coordenada de referência no treinamento da rede neural e $\underline{A}$ a coordenada de saída durante testes de treinamento do próprio Matlab desta RNA. Uma RNA treinada que apresenta resultados ideais teria a seguinte equação de reta: $A = T$, com um índice de correlação R igual à unidade ($R = 1$). A combinação que foi utilizada, dentre 705 RNAs viáveis, apresenta 12 neurônios na 1ª. camada oculta, 29 neurônios na 2ª. camada oculta e 8 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 12-29-8 1FTx).

(metros – valores
obtidos pela RNA)

Figura 4-10 – Curva de treinamento da RNA 12-29-8 1FTx, função *Postreg* do Matlab, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

Para a RNA 12-29-8 1FTx foram testados 108 pontos de curto circuito. Foram analisados o erro médio de leitura, os erros máximos obtidos com os testes e o desvio padrão dos mesmos, considerando uma dimensão de até 3 km para a abscissa $\underline{x}$.

Tabela 4-3 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 12-29-8 1FTx, com indicação de erros ($\Delta x_{\text{máx}}=3\text{km}$).

Carga (%)	Falha 1FT (pontos)	Erro médio absoluto (m)	Erro médio relativo (%)	Erro máximo absoluto (m)	Erro máximo relativo (%)	Desvio Padrão (m)
0	42	26,4	0,88	78,5	2,62	33,6
50	44	2,97	0,10	19,3	0,64	5,96
100	22	0,22	0,01	0,71	0,02	0,32
Índices globais de performance	108 pts.	11,3 m	0,38%	78,5 m	2,62%	21,0 m

Os dados da Tabela 4-3 podem ser visualizados na Figura 4-11 e na Figura 4-12. A Figura 4-11 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 12-29-8 1FT para os 108 pontos testados na RNA, divididos entre 0%, 50 % e 100% da plena carga. Uma sobreposição de todos os pontos representaria 100% de acerto entre o resultado da simulação e a saída da RNA. A Figura 4-12 apresenta a diferença entre as duas curvas apresentadas na Figura 4-11: quanto mais próximo do valor 0 for a diferença melhor, pois menor é a variação entre o resultado esperado e o resultado de saída da RNA treinada.

Para a RNA 12-29-8 1FTx os resultados do diagnóstico de localização apresentaram considerável grau de precisão para carregamentos diferentes de 0%, com erro médio de 11,3 metros ou 0,38% frente à dimensão máxima do circuito tronco que é de 3 quilômetros. Para operação em vazio há uma elevação destes valores, devendo ser utilizados mais pontos caso se queira melhorar os índices atingidos, apesar de ser pouco provável que um sistema opere sem nenhuma carga. Mesmo assim para o caso do sistema supostamente estar operando a 0% da plena carga o máximo erro no diagnóstico fornecido pela RNA foi de 2,62%.

Figura 4-11 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 12-29-8 1FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.

Figura 4-12 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 12-29-8 1FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.

Observa-se que no caso do erro máximo, este corresponde aproximadamente a 1,5 quarteirão. Conclui-se que o sistema operando em tempo real, mesmo com um erro máximo previsto, estará auxiliando significativamente a minimizar o esforço das engenharias de operação e manutenção do sistema de distribuição quando da ocorrência do tipo de falha analisada – curto circuito.

4.7. DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 1FTy”

A RNA 1FTy é uma rede neural desenvolvida para localizar a ordenada y da coordenada (x, y) do ponto da falha. Além dos parâmetros impedância e nível de carga utilizados como entrada para a RNA 1FTx, a RNA 1FTy possui como parâmetro de entrada a abscissa x já obtida.

4.7.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos da RNA 1FTy

Durante o processo de treinamento da RNA 1FTy foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja, Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, $X\%$ (carga pré-falha).
- Dado de entrada: abscissa x da coordenada do ponto de falha simulado.
- Dado de saída: ordenada y_0 da coordenada do ponto de falha.
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª. e 2ª. Camadas Ocultas; Purelin na 3ª. Camada Oculta e na Camada de Saída.
- 3 camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-13 – Treinamentos da RNA 1FTy, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.

4.7.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos da RNA 1FTy.

Os resultados do treinamento da RNA 1FTy obtidos pela função de regressão linear *Postreg* do Matlab podem ser vistos na Figura 4-14, com saídas possíveis variando de 0 a 900 metros. Os valores de T e A neste caso representam ambos a ordenada y da coordenada (x,y) do ponto de falha, sendo $\underline{T}$ um dado de entrada e $\underline{A}$ um dado de saída da RNA treinada. A combinação que foi utilizada, dentre 148 RNAs viáveis, apresenta 25 neurônios na 1ª. camada oculta, 51 neurônios na 2ª. camada oculta e 11 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 25-51-11 1FTy).

(metros – valores
obtidos pela RNA)

Figura 4-14 – Curva de treinamento da RNA 25-51-11 1FTy, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

A RNA 25-51-11 1FTy foi testada com 108 pontos de curto circuito. Foi analisado o erro médio de leitura, os erros máximos obtidos com os testes e o desvio padrão dos mesmos, considerando uma dimensão de até 900 metros para a ordenada y .

Tabela 4-4 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 25-51-11 1FTy, com indicação de erros ($\Delta y_{\text{máx}}=900\text{m}$).

Carga (%)	Falha 1FT (pontos)	Erro médio absoluto (m)	Erro médio relativo (%)	Erro máximo absoluto (m)	Erro máximo relativo (%)	Desvio Padrão (m)
0	42	0,03	0,00	0,26	0,01	0,70
50	44	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
100	22	0,08	0,00	0,00	0,01	0,00
Índices globais de performance	108 pts.	0,03m	0,00%	0,26 m	0,00%	0,10 m

Os valores da Tabela 4-4 podem ser visualizados na Figura 4-15 e na Figura 4-16. A Figura 4-15 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 25-51-11 1FTy para os 108 pontos testados na RNA, divididos entre 0%, 50 % e 100% da plena carga. Uma sobreposição de todos pontos representaria 100,0% de acerto entre saída esperada e a saída da RNA. A Figura 4-16 apresenta a diferença entre as curvas apresentadas na Figura 4-15: quanto mais próximo do valor 0 for à diferença, melhor, pois menor é a variação entre o resultado esperado e o resultado de saída da RNA treinada.

Figura 4-15 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-11 1FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.

Figura 4-16 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-11 1FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.

Para a RNA 25-51-11 1FTy os resultados do diagnóstico de localização da ordenada y de sua coordenada (x,y) apresentaram praticamente 100% de acerto para todos os carregamentos testados, com erros máximos da ordem de centímetros.

4.8. DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 2FTx”

A RNA 2FTx é uma rede neural desenvolvida para localizar a abscissa x da coordenada (x, y) do ponto da falha. Tal dado serve de entrada para a RNA 2FTy, além dos parâmetros de impedância e nível de carga.

4.8.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos da RNA 2FTx

Durante o processo de treinamento da RNA 2FTx foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, $X\%$.
- Dado de saída: abscissa x_0 da coordenada $(x_0;y_0)$ do ponto de falha.
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª. e 2ª. Camadas Ocultas; Purelin na 3ª. Camada Oculta e na Camada de Saída.
- 3 camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-17 – Treinamentos da RNA 2FTx, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.

4.8.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos da RNA 2FTx

Os resultados do treinamento da RNA 2FTx obtidos pela função de regressão linear *Postreg* do Matlab podem ser vistos na Figura 4-18, com saídas possíveis variando de 0 a 3000 metros. Os valores de $\underline{T}$ e $\underline{A}$ neste caso representam ambos a abscissa $\underline{x}$ da coordenada (x,y) do ponto de falha, sendo $\underline{T}$ a coordenada de referência no treinamento da rede neural e $\underline{A}$ a coordenada de saída durante testes de treinamento do próprio Matlab desta RNA. A combinação que foi utilizada, dentre 206 RNAs viáveis, apresenta 25 neurônios na 1ª. camada oculta, 51 neurônios na 2ª. camada oculta e 8 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 25-51-8 2FTx).

Figura 4-18 – Curva de treinamento da RNA 25-51-8 2FTx, função *Postreg* do Matlab, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

Para a RNA 25-51-8 2FTx foram testados 108 pontos de curto circuito. Foram analisados o erro médio de leitura, os erros máximos obtidos com os testes e o desvio padrão dos mesmos, considerando uma dimensão de até 3 km para a abscissa $\underline{x}$.

Tabela 4-5 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 25-51-8 2FTx, com indicação de erros ($\Delta x_{\text{máx}}=3\text{km}$).

Carga (%)	Falha 2FT (pontos)	Erro médio absoluto (m)	Erro médio relativo (%)	Erro máximo absoluto (m)	Erro máximo relativo (%)	Desvio Padrão (m)
0	42	12,7	0,36	50,0	1,67	18,9
50	44	22,1	0,63	130,0	4,34	38,5
100	22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Índices globais de performance	108 pts.	13,7m	0,39%	130 m	3,7%	26,7 m

Os valores da Tabela 4-5 podem ser visualizados na Figura 4-19 e na Figura 4-20. A Figura 4-19 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 25-51-8 2FTx para os 108 pontos testados na RNA, divididos entre 0%, 50 % e 100% da plena carga. Uma eventual sobreposição dos pontos representaria 100% de acerto entre o resultado da simulação e a saída da RNA. A Figura 4-20 apresenta a diferença entre as curvas apresentadas na Figura 4-19: quanto mais próximo do valor 0 for à diferença, melhor o desempenho obtido, pois menor é a variação entre o resultado esperado e o resultado de saída da RNA treinada.

Para a RNA 25-51-8 2FTx os resultados do diagnóstico de localização apresentaram considerável grau de precisão para carregamentos diferentes de 0%, com erro médio de 13,7 metros ou 0,39% frente à dimensão máxima deste eixo de coordenadas (3 km). O desvio padrão para todos os pontos testados é de 26,7 metros. Os valores obtidos nos testes da RNA 25-51-8 2FTx estão com a mesma ordem de grandeza dos obtidos para a RNA 1FTx.

Figura 4-19 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-8 2FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.

Figura 4-20 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 25-51-8 2FTx, com 0%, 50% e 100% da plena carga -108 pontos avaliados.

4.9. DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 2FTy”

A RNA 2FTy é uma rede neural desenvolvida para localizar a ordenada y da coordenada (x, y) do ponto da falha. Além dos parâmetros impedância e nível de carga utilizados como entrada para a RNA 2FTx, a RNA 2FTy possui como parâmetro de entrada a abscissa x já obtida.

4.9.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos da RNA 2FTy

Durante o processo de treinamento da RNA 2FTy foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, $X\%$ (carga pré-falha).
- Dado de entrada: abscissa x da coordenada do ponto de falha simulado.
- Dado de saída: ordenada y_0 da coordenada do ponto de falha.
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª. e 2ª. Camadas Ocultas; Purelin na 3ª. Camada Oculta e na Camada de Saída.
- 3 camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-21 – Treinamentos da RNA 2FTy, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.

4.9.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos da RNA 2FTy.

Os resultados do treinamento da RNA 2FTy obtidos pela função de regressão linear *Postreg* do Matlab podem ser vistos na Figura 4-22, com saídas possíveis variando de 0 a 900 metros. Os valores de T e A neste caso representam ambos a ordenada $\underline{y}$ da coordenada (x,y) do ponto de falha, sendo $\underline{T}$ a coordenada de referência utilizada no treinamento e $\underline{A}$ a coordenada obtida pela RNA em treinamento. A combinação que foi utilizada, dentre 383 RNAs viáveis, apresenta 20 neurônios na 1ª. camada oculta, 27 neurônios na 2ª. camada oculta e 10 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 20-27-10 2FTy).

(metros – valores
obtidos pela RNA)

Figura 4-22 – Curva de treinamento da RNA 20-27-10 2FTy, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

Para a RNA 20-27-10 2FTy foram testados 108 pontos de curto circuito. Como os dados de saída da RNA treinada são contínuos, foram analisados o erro médio de leitura, os erros máximos obtidos com os testes e o desvio padrão dos mesmos, considerando uma dimensão de até 900 metros para a ordenada y .

Tabela 4-6 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 20-27-10 2FTy, com indicação de erros ($\Delta y_{\text{máx}}=900\text{m}$).

Carga (%)	Falha 2FT (pontos)	Erro médio absoluto (m)	Erro médio relativo (%)	Erro máximo absoluto (m)	Erro máximo relativo (%)	Desvio Padrão (m)
0	42	3,64	0,4	100	11,1	17,8
50	44	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Índices globais de performance	108 pts.	1,43 m	0,16%	100 m	11,1%	11 m

Os dados da Tabela 4-6 podem ser visualizados na Figura 4-23 e na Figura 4-24. A Figura 4-23 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 20-27-10 2FTy para os 108 pontos testados na RNA, divididos entre 0%, 50 % e 100% da plena carga. Uma eventual sobreposição dos pontos representaria 100% de acerto entre o resultado da simulação e a saída da RNA. A Figura 4-24 apresenta a diferença entre as 2 curvas apresentadas na Figura 4-23: quanto mais próximo de um valor nulo for a diferença, melhor o resultado da localização, pois menor é a variação entre o resultado esperado e o resultado de saída da RNA treinada.

Para a RNA 20-27-10 2FTy os resultados do diagnóstico de localização da ordenada y de sua coordenada (x,y) apresentaram praticamente 100% de acerto para todas as possibilidades de carga, com erros de determinação da ordenada praticamente nulos, exceto para dois pontos. Estes dois pontos se caracterizam por uma falha ocorrida no barramento da subestação de distribuição, na qual ocorre o afundamento da tensão durante a simulação. Mesmo considerando os dois pontos alterados, o desvio padrão em torno de um valor médio praticamente nulo é de 11 metros.

Figura 4-23 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-27-10 2FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.

Figura 4-24 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-27-10 2FTy, a 0%, 50% e 100% da plena carga.

4.10. DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 3FTx”

A RNA 3FTx é uma rede neural desenvolvida para localizar a abscissa $\underline{x}$ da coordenada (x, y) do ponto da falha. Tal dado serve de entrada para a RNA 3FTy, além dos parâmetros de impedância e nível de carga.

4.10.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos da RNA 3FTx.

Durante o processo de treinamento da RNA 3FTx foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, $X\%$.
- Dado de saída: abscissa x_0 da coordenada $(x_0; y_0)$ do ponto de falha.
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª. e 2ª. Camadas Ocultas; Purelin na 3ª. Camada Oculta e na Camada de Saída.
- 3 camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-25 – Treinamentos da RNA 3FTx, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.

4.10.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos da RNA 3FTx.

Os resultados do treinamento da RNA 3FTx obtidos pela função de regressão linear *Postreg* do Matlab podem ser vistos na Figura 4-26, com saídas possíveis variando de 0 a 3000 metros. Os valores de T e A neste caso representam ambos a abscissa $\underline{x}$ da coordenada (x,y) do ponto de falha, sendo $\underline{T}$ a coordenada de referência utilizada no treinamento e $\underline{A}$ a coordenada obtida pela RNA em treinamento. A combinação que foi utilizada, dentre 689 RNAs viáveis, apresenta 26 neurônios na 1ª. camada oculta, 52 neurônios na 2ª. camada oculta e 12 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 26-52-12 3FTx).

Figura 4-26 – Curva de treinamento da RNA 26-52-12 3FTx, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

A RNA 26-52-12 3FTx foi testada com 108 pontos de curto circuito. Foi analisado o erro médio de leitura, os erros máximos obtidos com os testes e o desvio padrão dos mesmos, considerando uma dimensão de até 3000 metros para a abscissa $\underline{x}$.

Tabela 4-7 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 26-52-12 3FTx, com indicação de erros ($\Delta x_{\text{máx}}=3000\text{m}$).

Carga (%)	Falha 3FT (pontos)	Erro médio absoluto (m)	Erro médio relativo (%)	Erro máximo absoluto (m)	Erro máximo relativo (%)	Desvio Padrão (m)
0	42	33,6	1,1	180	6,0	54,3
50	44	39,1	1,3	180	6,0	61,6
100	22	15,0	0,5	110	3,7	32,7
Índices globais de performance	108 pts.	31,8 m	1,1%	180 m	6,0%	53,2 m

Os dados da Tabela 4-7 podem ser visualizados na Figura 4-27 e na Figura 4-28. A Figura 4-27 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 26-52-12 3FTx para os 108 pontos testados na RNA, divididos entre 0%, 50 % e 100% da plena carga. Uma eventual sobreposição dos pontos representaria 100% de acerto entre o resultado da simulação e a saída da RNA. A Figura 4-27 apresenta a diferença entre as curvas apresentadas na Figura 4-28: quanto mais próximo de um valor nulo for a diferença, melhor o resultado da localização, pois menor é a variação entre o resultado esperado e o resultado de saída da RNA treinada.

Para a RNA 26-52-12 3FTx os resultados do diagnóstico de localização da abscissa x de sua coordenada (x,y) apresentaram erro médio cerca de 32 m ou 1,1% frente à dimensão máxima deste eixo de coordenadas.

Figura 4-27 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 26-52-12 3FTx, com 0%, 50% e 100% de carga.

Figura 4-28 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 26-52-12 3FTx, com 0%, 50% e 100% de carga.

A avaliação dos resultados comparativos da RNA 26-52-12 3FTx mostrados na Figura 4-27 e na Figura 4-28 indica erro médio de aproximadamente 32 metros, com desvio padrão de 53 metros, ainda dentro dos limites de um quarteirão para localização da falha.

4.11. DESENVOLVIMENTO DA RNA “PONTO DE FALHA 3FTy”

A RNA 3FTy é uma rede neural desenvolvida para localizar a ordenada y da coordenada (x, y) do ponto da falha. Além dos parâmetros impedância e nível de carga utilizados como entrada para a RNA 3FTx, a RNA 3FTy possui como parâmetro de entrada a abscissa x já obtida.

4.11.1. Topologias Utilizadas nos Treinamentos da RNA 3FTy

Durante o processo de treinamento da RNA 1FTy foram utilizados:

- Dado de entrada: impedâncias referentes ao período SS1 da Tabela 4-1, ou seja Z_{A1} , Z_{B1} e Z_{C1} .
- Dado de entrada: carga da CT no período SS0 da Tabela 4-1, ou seja, $X\%$ (carga pré-falha).
- Dado de entrada: abscissa x da coordenada do ponto de falha simulado.
- Dado de saída: ordenada y_0 da coordenada do ponto de falha.
- Algoritmo de treinamento Levenberg Marquardt (LM) – função *Trainlm* do Toolbox de Redes Neurais do Matlab;
- Funções de transferência: Tan-Sigmoid na 1ª. e 2ª. Camadas Ocultas; Purelin na 3ª. Camada Oculta e na Camada de Saída.
- 3 camadas ocultas, número de neurônios variados em cada camada.

Figura 4-29 – Treinamentos da RNA 3FTy, variando-se o número de neurônios nas camadas ocultas.

4.11.2. Resultados Obtidos nos Treinamentos da RNA 3FTy.

Os resultados do treinamento da RNA 3FTy obtidos pela função de regressão linear *Postreg* do Matlab podem ser vistos na Figura 4-30, com saídas possíveis variando de 0 a 900 metros. Os valores de T e A neste caso representam ambos a ordenada $\underline{y}$ da coordenada (x,y) do ponto de falha, sendo $\underline{T}$ a coordenada de referência utilizada no treinamento e $\underline{A}$ a coordenada obtida pela RNA em treinamento. A combinação que foi utilizada, dentre 154 RNAs viáveis, apresenta 22 neurônios na 1ª. camada oculta, 33 neurônios na 2ª. camada oculta e 8 neurônios na 3ª. camada oculta (RNA 22-33-8 3FTy).

(metros – valores
obtidos pela RNA)

Figura 4-30 – Curva de treinamento da RNA 22-33-8 3FTy, com comparativo entre a resposta da RNA obtida e os dados esperados.

A RNA 22-33-8 3FTy foi testada com 108 pontos de curto circuito. Foi analisado o erro médio de leitura, os erros máximos obtidos com os testes e o desvio padrão dos mesmos, considerando uma dimensão de até 900 metros para a ordenada y .

Tabela 4-8 – Distribuição de número de pontos de curto circuito testados na RNA 22-33-8 3FTy, com indicação de erros ($\Delta y_{\text{máx}}=900\text{m}$).

Carga (%)	Falha 3FT (pontos)	Erro médio absoluto (m)	Erro médio relativo (%)	Erro máximo absoluto (m)	Erro máximo relativo (%)	Desvio Padrão (m)
0	42	2,27	0,1	50	1,7	10,8
50	44	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	22	4,2	0,1	50	1,7	14,7
Índices globais de performance	108 pts.	1,8 m	0,1 %	50 m	1,7%	9,5 m

Os dados da Tabela 4-8 podem ser visualizados na Figura 4-31 e na Figura 4-32. A Figura 4-31 apresenta um comparativo entre os pontos esperados e os pontos de saída da RNA 22-33-8 3FTy para os 108 pontos testados na RNA, divididos entre 0%, 50 % e 100% da plena carga. Uma eventual sobreposição dos pontos representaria 100% de acerto entre o resultado da simulação e a saída da RNA. A Figura 4-32 apresenta a diferença entre as curvas apresentadas na Figura 4-31: quanto mais próximo de um valor nulo for a diferença, melhor o resultado da localização, pois menor é a variação entre o resultado esperado e o resultado de saída da RNA treinada.

Para a RNA 22-33-8 3FTy os resultados do diagnóstico de localização da ordenada y de sua coordenada (x,y) apresentaram praticamente 100% precisão para todas as possibilidades de carga, caso se desconsidere os pontos divergentes dentre os 108 testados. Estes pontos se caracterizam por uma falha ocorrida no barramento da subestação de distribuição, na qual ocorre o afundamento da tensão durante a simulação. Mesmo considerando os pontos alterados, o erro médio é de 2 metros aproximadamente ou 0,1% do valor máximo da ordenada, com desvio padrão de aproximadamente 10 m.

Figura 4-31 – Comparativo entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-25-9 3FTy, com 0%, 50% e 100% de carga.

Figura 4-32 – Diferença absoluta em metros entre dados esperados e dados de saída da RNA 20-25-9 3FTy, com 0%, 50% e 100% de carga.

A avaliação dos resultados comparativos mostrados na Figura 4-31 e na Figura 4-32 demonstra que a RNA 22-33-8 3FTy indica 4 pontos com menor resolução, sendo que os demais 104 apresentam erros de localização da coordenada muito próximos a zero. Mesmo assim os resultados se apresentam dentro de um padrão de 1 quadra (± 50 m), com a maioria das ordenadas com valor praticamente exato.

4.12. CONSIDERAÇÕES FINAIS REFERENTES AOS TESTES DA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS

Os valores obtidos nos testes da metodologia de diagnóstico automático de falhas apresentada neste Capítulo apresentou resultados úteis tanto para reconhecimento do tipo de falha como para localização da mesma.

Os resultados referentes ao tipo de falha se mostraram com 100% de acerto para as variáveis consideradas. Com relação aos resultados de indicação do ponto da falha por meio de sua coordenada geográfica, indicados pelas saídas x_o e y_o de suas respectivas redes neurais, pode-se verificar que a variável x_o apresenta-se com acertos da ordem de 99% dos pontos, com uma margem de erro não muito diferente de 30 metros. Já a variável y_o , por se utilizar do valor de saída da RNA que identifica x_o , apresentou valores bem mais expressivos na sua identificação, com acertos da ordem de 99,9% dos pontos e uma margem de erro em torno de 2 metros no pior caso para valores médios.

Os maiores pontos de variação para todas as análises se encontram nas derivações de cabos de tronco para ramal, onde há uma descontinuidade da linearidade das funções que regem o comportamento elétrico quando confrontados com a distância da falta até o transformador em potência reversa, pela presença da bifurcação dos cabos. Esta descontinuidade dificulta a localização de alguns pontos, sendo que o resultado global continua sendo considerado como útil para utilização como ferramenta de análise de falhas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E DESMEMBRAMENTOS DO TRABALHO DE PESQUISA

Este trabalho de pesquisa apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico automático de falhas do tipo curto-circuito de baixa impedância em circuitos alimentadores de média tensão de sistemas reticulados de distribuição de energia elétrica tipo *spot network*. Este trabalho também apresenta os testes e a análise de desempenho das Redes Neurais Artificiais utilizadas na metodologia de diagnóstico automático de falhas.

No Capítulo 2 são discutidos os princípios de funcionamento de sistemas reticulados, com enfoque no funcionamento do equipamento *network protector*. Este equipamento protege o sistema de distribuição reticulado de seu problema intrínseco de reversão de potência em caso de curto-circuito nos alimentadores, fluxo reverso da baixa para a média tensão.

No Capítulo 3 é apresentado o comportamento elétrico de um sistema de distribuição reticulado *spot network* durante falhas tipo curto-circuito baseado em parâmetros de um sistema elétrico real da cidade de Brasília. Com tais falhas simuladas foram treinadas as redes neurais artificiais que fazem parte da metodologia proposta de diagnóstico de falhas, com objetivo de se identificar o tipo de curto-circuito ocorrido e obter um valor aproximado de sua coordenada geográfica.

5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS

A metodologia automática de análise do tipo de curto-circuito e de sua localização consistiu em comparar as falhas simuladas com diagnósticos obtidos pelas redes neurais artificiais treinadas. Os resultados obtidos para identificação do tipo de falta apresentaram uma taxa de 100% de acerto. O sistema de diagnóstico do tipo de falha também obteve 100% de acerto quando o sistema elétrico operou com cargas diferentes das empregadas durante o treinamento das redes neurais.

Os resultados obtidos para identificação da coordenada geográfica do ponto da falha estiveram dentro de uma faixa de erro média para a abscissa $\underline{x}$ da coordenada (x,y) do local da falha em torno de 30 metros, que quando comparados com a extensão total de 3 km do circuito simulado chega-se a uma taxa de acerto médio maior que 99%. Para a identificação da ordenada y da coordenada do ponto de falha existe um acerto muito próximo a 100%. Testes com cargas variadas e não utilizadas nos treinamentos das RNAs da metodologia de diagnóstico indicaram uma diminuição da taxa de acertos na localização das falhas e portanto devem ser acrescentados mais pontos de treinamento utilizando-se faixas mais restritas de carregamento do sistema elétrico para continuidade deste trabalho.

A coordenada do ponto de falha pode ou não coincidir com a localização real dos cabos alimentadores sob falha. Se for considerada a margem de erro obtida, esta indica a localização da uma falta dentro de um setor (um ou dois quarteirões, por exemplo). Pode-se esperar que as comparações de tal coordenada, obtida pela RNA treinada, com outros dados comparativos, levem a uma localização mais precisa do ponto de falha. Assim sendo, este trabalho pode contribuir para a performance de equipes de manutenção com a identificação automática do tipo e localização da falha, diminuindo o tempo de procura por todo o sistema subterrâneo de distribuição pelo ponto de falha, além de diminuir o tempo de indisponibilidade do sistema elétrico e seus parâmetros de confiabilidade e qualidade de energia.

Observe-se que neste trabalho de pesquisa todas as falhas de curto-circuito foram efetuadas supondo impedâncias de falha nulas. Entretanto, como continuidade deste trabalho sugere-se que também se estude o comportamento e treinamento das

redes neurais para operarem em situações nas quais a impedância das falhas sejam diferentes de zero.

5.2. DESMEMBRAMENTOS FUTUROS DESTE TRABALHO DE PESQUISA

A metodologia proposta para diagnóstico automático de falhas permite sua aplicação imediata na localização de faltas em circuitos reticulados *spot network* de baixa tensão, necessitando-se para isso do acréscimo de informações da proteção do ramal BT atingido (e com isto estabelecer a ramificação em que ocorreu o curto-circuito). Conforme descrito no Capítulo 1, esta metodologia também poderá ser implementada para operar em tempo real.

A metodologia desenvolvida neste trabalho também poderá ser aplicada na localização de falhas em sistemas reticulados *grid network* em BT. Entretanto, as redes são por vezes tão ou mais complexas que o sistema reticulado *spot network*, sendo que uma distribuição de chaves indicadoras nos troncos de derivação principais poderá facilitar tal localização.

Como continuidade deste trabalho sugere-se também a instalação de uma rede de relés digitais para que se possam confrontar os diagnósticos de falha de todos estes relés de forma estatística quando a mesma estiver operando em tempo real. Poderá haver uma considerável melhoria do resultado caso seja avaliada uma curva normalizada de contribuição de todos os relés simultaneamente, descartando-se dados que fujam do padrão coletado.

Está sendo operacionalizada a instalação deste sistema de diagnóstico automático de falhas no desenvolvimento de um trabalho de P&D que se inicia neste ano de 2006. Como proposta de continuidade de estudos, inclusive de um trabalho de pós-doutoramento, sugere-se a implementação de uma RNA que tenha aprendizado contínuo, ou seja, que aprenda com as próprias características de operação da rede elétrica. A evolução deste aprendizado contínuo da RNA (com pesos diferenciados de

retreinamento) poderá ser comparada com as redes neurais treinadas originariamente, orientando futuros trabalhos científicos sobre o tema com relação a divergências de resultados que possam vir a ocorrer ao longo do tempo.

Assim sendo, este trabalho de pesquisa acredita ter atingido os objetivos propostos inicialmente, que eram o de desenvolver e aprofundar a teoria e a tecnologia de diagnóstico de falhas de sistemas de distribuição de energia elétrica baseadas em redes neurais artificiais e de incentivar novas pesquisas na área.

APÊNDICE

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)

A.1. INTRODUÇÃO A RNA

As RNA são sistemas computacionais, *hardware* ou *software*, que imitam as habilidades de raciocínio dos sistemas biológicos pelo uso de vários neurônios artificiais, os quais são simples emulações dos neurônios biológicos. Usam paralelismo lógico combinando várias operações (as informações da camada de um neurônio, localizadas em uma região ou camada do sistema, são transferidas para os neurônios de outra camada). As três características que descrevem uma rede neural artificial e contribuem para sua habilidade funcional são: estrutura, dinamismo e conhecimento (MAREN e HARSTON, 1990).

Na natureza a função de uma rede é determinada pelas conexões entre elementos. Pode-se treinar uma rede neural artificial para realizar uma função particular pelo ajuste dos valores (pesos) das conexões entre seus elementos ou unidades (DEMUTE e BEALE, 2002).

Algumas das vantagens que as RNAs têm com relação a sistemas especialistas são as características presentes no cérebro humano e não presentes nos computadores, tais como (JAIN *et al*, 1996):

- Paralelismos massivos;
- Representação e computação distribuídas;
- Habilidade em aprender;
- Habilidade em generalizar;
- Adaptabilidade;

- Processar informações dentro de um contexto;
- Tolerância à falhas; e
- Baixo consumo de energia.

Lau (LAU, 1992) observa que ao invés de executar um programa de instruções sequencialmente como no computador convencional, o modelo de redes neurais explora muitas hipóteses que competem simultaneamente usando redes paralelas compostas de muitos elementos computacionais conectados por ligações com pesos variáveis. A Tabela A-1 apresenta uma lista onde são comparados itens de estrutura e desempenho entre os sistemas neurais biológicos e o modelo de computador convencional idealizado por von Neumann (VON NEUMANN, 1945).

Tabela A-1 - Computador convencional versus sistema neural biológico (JAIN *et al.*, 1996)

	Computador de von Neumann	Sistema neural biológico
Processador	Complexo Alta velocidade Um ou alguns	Simples Baixa velocidade Uma grande quantidade
Memória	Separada para um processador Localizada Nenhum conteúdo endereçável	Integrada no processador Distribuída Conteúdo endereçável
Computação	Centralizada Sequencial Programas armazenados	Distribuída Paralela Auto-aprendizagem
Confiabilidade	Muito vulnerável	Robusto
Ambiente operacional	Bem definido, bem restrito	Definição pobre, não restrita

A.2. DEFINIÇÃO DE RNA

Uma razão para utilizar o sistema nervoso como modelo é que as simulações dos sistemas computacionais funcionam melhor se usam exemplos do cérebro. Muitas pesquisas sobre inteligência artificial só obtiveram melhores resultados quando as equipes de engenharia de *software* consultaram os neurocientistas e neurofisiologistas. Assim conforme novas descobertas sobre o funcionamento do cérebro biológico ocorriam, melhorias eram criadas nos sistemas computacionais.

Os pesquisadores constataram também que com os ensaios dos sistemas computacionais baseados nas idéias que surgiam sobre o funcionamento do cérebro, o funcionamento do próprio cérebro era entendido ao se desenvolver as simulações computacionais.

Experimentos e pesquisas sobre o comportamento em animais e humanos em meados do século XX sugeriram que o cérebro humano incorpora informação de uma forma paralela e distribuída com conexões adaptadas para aprender, reconhecer, generalizar e discriminar. A seguir duas das principais contribuições da época.

Lei de Hebb: segundo Hebb (HEBBE, 1949) a atividade sináptica facilita a comunicação entre os neurônios, portanto a memória do conhecimento se localiza na atividade sináptica. No processo de aprendizagem ocorre a mudança de peso das sinapses. Este processo é considerado ser a aprendizagem no campo das RNA.

Pesquisa de Lashley: Lashley (LASHLEY, 1950) realizou experiências com ratos retirando partes de seus cérebros e analisou o comportamento dos mesmos para sair de dentro de um labirinto. Ele constatou que mesmo tirando partes do cérebro dos ratos eles continuavam a achar a saída do labirinto. Assim formulou algumas leis:

Lei da equipotencialidade – várias áreas do cérebro têm potencial de aprendizado similar.

Lei da ação em massa – os erros que os ratos cometiam eram proporcionais à massa de cérebro removida.

A.2.1. Organização estrutural dos sistemas neurais: Camadas e Colunas.

No cérebro os neurônios são maciçamente conectados, muito mais que as complexas e densas redes de telefonia. Cada neurônio possui de 10^3 a 10^4 ligações com outros neurônios. No total o cérebro humano possui cerca de 10^{14} a 10^{15} interconexões.

Como princípio o cérebro possui elementos de processamento organizados em camadas e também em colunas. Há tecidos que são especializados em sistemas específicos e não específicos.

As sensações que sentimos são passadas por nossos sentidos (visão, audição, paladar, olfato e tato) por múltiplos níveis de camadas. Nossa retina possui três ou quatro camadas de neurônios para o foto-receptor e seis camadas no córtex visual para processamento das imagens. A informação visual por sua vez é processada por mais camadas até chegar no entendimento ou consciência.

O córtex, a substância cinzenta do cérebro, é dividido em colunas que atuam como unidades funcionais. No córtex as entradas começam na parte inferior e terminam com neurônios na segunda e quarta camadas e há sinapses colaterais na terceira, quinta e sexta camadas. A informação é processada no córtex e a via de saída é seguida da terceira e quinta camadas para outras partes do cérebro e espinha dorsal.

A.2.2. Neurônio Biológico.

Os neurônios são formados pelo corpo celular ou soma e filamentos que são os dendritos e os axônios, e conectados uns aos outros formando uma grande teia ou rede neural. As sinapses formam as conexões entre os neurônios e compõe a saída de um neurônio por meio do axônio (*hillock*) e os dendritos. Elas são formadas por um espaço, entre o terminal de um axônio e o receptor de um dendrito, que equivale à cerca de 50 a 200 ângstrons. A resposta de um neurônio ocorre por meio da transferência de impulsos

elétricos ou potenciais de ação. A propagação de um neurônio para outro é realizada por meio de substâncias chamadas neurotransmissores.

A geração do potencial de ação ocorre em uma região do neurônio chamada “*axon hillock*” localizada junto ao corpo do neurônio. A partir deste ponto o potencial de ação se propaga ao longo do axônio, até atingir os neurônios seguintes. A Figura A-1 mostra a estrutura resumida de um neurônio biológico.

Figura A-1 - Estrutura resumida neurônio biológico

A.2.3. Neurônio Artificial.

O primeiro modelo de neurônio artificial surgiu a partir dos estudos de McCulloch e Pitts (MCCULLOCH e PITTS, 1943) que formularam um modelo de neurônio computacional conforme mostra a Figura A-2. Neste modelo o neurônio atua como uma unidade de decisão binária, que é ativada quando a soma ponderada de suas entradas x_N multiplicadas pelos pesos w_i e se o resultado excede um limiar f produz saídas conforme o tipo de função limiar ou função de transferência. Aqui existe uma clara analogia com os neurônios biológicos: o modelo de interconexões dos axônios e dendritos, as conexões por pesos são as sinapses e as funções de transferência representam a atividade do soma ou corpo celular. Entretanto o modelo apresenta diversas simplificações que não refletem o comportamento verdadeiro dos neurônios biológicos.

O modelo de McCulloch e Pitts generaliza de muitas maneiras. Uma generalização óbvia é usar funções de ativação no lugar de funções de limiar, como linear, sigmóide ou gaussiana, mostradas na Figura A-2.

Figura A-2 - Elemento computacional ou nó e funções de transferência

A função sigmóide é frequentemente usada em RNA. É uma função estritamente crescente que mostra suavidade e tem uma propriedade assintótica. O padrão de função sigmóide é logística, definida por:

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}}, \quad (\text{A-1})$$

onde β é o parâmetro de declive da função.

A.3. HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA RNA

A idéia de criação da RNA surgiu antes dos computadores eletrônicos, há quase 60 anos, evoluiu passando por um período de entusiasmo no início dos anos 1960, e depois sobreviveu a um período de frustração e ruptura no final da mesma década. Esta sobrevivência foi em parte devida aos avanços dos computadores eletrônicos, que se tornaram mais baratos e mais rápidos, e às novas soluções propostas por alguns pioneiros que ousaram quebrar o silêncio do período de frustração e defender este importante campo da ciência, isto a partir dos anos de 1980.

A.3.1. Período dos Fundamentos das RNA.

Na época em que surgiram os fundamentos das RNA, estes na verdade sintetizam pesquisas anteriores feitas por diversos profissionais como psicólogos, neurofisiologistas, matemáticos, cientistas da computação e outros colaboradores pertencentes ao chamado grupo dos connexionistas que defendiam a criação de sistemas computacionais baseados nos sistemas biológicos. Tal período compreendeu:

- 1943 – Surge o primeiro modelo de neurônio a partir de estudos sobre a representação de eventos do sistema nervoso (WINDROW, 1990). McCulloch (neurofisiologista) e Pitts (matemático) (MCCULLOCH e PITTS, 1943) formularam o primeiro modelo computacional de neurônio.
- 1949 – Donald Hebb (HEBB, 1949), com o livro *The Organization of Behavior*, relatou pela primeira vez uma regra de aprendizado para um conjunto de neurônios interligados, a partir da modificação da intensidade da conexão das sinapses: a regra de Hebb. Esta intensidade de conexão da sinapse do neurônio biológico é conhecida como peso, uma função matemática que controla entradas e saídas do mesmo neurônio artificial. A regra de treinamento de Hebb foi elaborada em função da hipótese das conexões internas do cérebro estarem continuamente sendo alteradas na medida em que diferentes tarefas vão sendo aprendidas pelos organismos. Esta regra determina que a conexão entre dois neurônios é reforçada, na medida em que o neurônio vai ativando o segundo repetidamente por meio desta conexão.
- 1952, 1954, 1956 – Ashby (ASHBY, 1952), Minsky (MINSKY, 1954) e Uteley (UTLEY, 1956) desenvolveram as idéias de Hebb.
- 1958 – Rosenblatt (ROSENBLATT, 1959) cria o modelo *perceptron* o qual é capaz de classificar padrões.

A.3.2. Período de Tecnologias promissoras no Desenvolvimento de RNA.

Neste período importantes melhorias foram feitas em RNA com a contribuição de cientistas das ciências biológicas, ciências exatas e humanas durante o treinamento e validação de novas soluções propostas.

- 1960 – Widrow e Hoff (WINDROW, 1960), na Universidade de Stanford, desenvolveram uma importante variação do algoritmo de aprendizado do *perceptron*. Por meio da aplicação do conceito de erro médio quadrático (*Least Mean Square algorithm - LMS*) também conhecido como regra delta de aprendizado, formularam o *Adaline (Adaptive Linear Element)* ou elemento linear adaptativo.
- 1962 – Com a idéia da *Adaline*, Widrow definiu uma das primeiras redes construída como elementos adaptativos, o *Madaline (Multiple-adaline)*
- Década de 60 – Foram desenvolvidos vários estudos de aplicação do *perceptron*, indicando que as RNA poderiam solucionar qualquer tipo de problema

A.3.3. Período do Desapontamento com RNA.

- 1969 – Minsky e Papert (MINSKY, 1969) lançaram um polêmico livro intitulado *Perceptrons*, onde foi demonstrado matematicamente que o teorema de convergência do *perceptron* desenvolvido por Rosenblatt só era aplicável à classe de problemas linearmente separáveis e não era capaz de resolver problemas elementares como o Ou-exclusivo (XOR). Também mencionaram que não havia motivo aparente para acreditar que redes formadas por múltiplas camadas de *perceptrons* pudessem herdar as boas qualidades do *perceptron* de camada única.

A.3.4. Período das Inovações.

Este período compreendeu basicamente a década de 70 (Séc. XX) onde ocorreram os seguintes fatos significativos:

- 1973 – von der Maalburg (MALRSBURG, 1973) foi o primeiro pesquisador a demonstrar o princípio da auto-organização que é a capacidade da rede neural artificial de se auto-organizar independente de qualquer mecanismo arbitrário.
- 1976 – Willshaw e von der Maalburg (WILLSHAW e VON DER MALRSBURG, 1976) publicaram um artigo pioneiro sobre a formação das redes auto-organizáveis, motivado pelo mapeamento topológico do cérebro.
- 1977 – Kohonen (KOHONEN, 1977) desenvolveu seus modelos de memórias associativas que procuram imitar os mecanismos de memória realizados pelo cérebro .
- 1980 – Grossberg (GROSSBERG, 1980) com base em seus trabalhos preliminares sobre aprendizado competitivo, estabeleceu os princípios para uma nova classe de redes neurais denominadas ART (*Adaptive Resonance Theory*).

A.3.5. Período do Ressurgimento de Pesquisas com RNA.

Este período compreendeu basicamente a década de 80 (Séc. XX) onde ocorreu o retorno aos estudos sobre RNA por meio dos seguintes fatos:

- 1982 – Hopfield (HOPFIELD, 1982) utilizou a idéia de minimização da função de energia que é uma função matemática (embora referida como uma energia não representa uma energia real de um sistema físico e sim uma quantidade matemática que atua na dinâmica das redes neurais tal como a energia potencial atua na mecânica de Newton) com enfoque ao princípio de funcionamento das redes recorrentes com conexões sinápticas simétricas, dando origem às *Hopfield Networks*.
- 1982 – Kohonen (KOHONEN, 1982) publicou um artigo sobre mapas auto-organizáveis, utilizando estruturas do tipo *lattice*, diferindo ligeiramente do trabalho de Willshaw e Von der Maalburg (WILLSHAW e VON DER MALRSBURG, 1976).

- 1983 – Kirkpatrick descreveu um novo procedimento para a otimização de redes (KIRKPATRICK, 1983) baseado nos princípios da termodinâmica estatística, denominado *Simulated Annealing*.
- 1983 – Cohen e Grossberg (COHEN, 1983) estabeleceram um princípio geral para as memórias de conteúdo endereçável. No mesmo ano Barto (BARTO, 1983) publicou um artigo sobre o controle de pêndulo invertido, baseado no aprendizado por reforço (*reinforcement learning*), inicialmente considerado por Minsky em 1954 (MINSKY, 1954).
- 1986 – Um grande marco para o desenvolvimento das RNA foi a criação do algoritmo de retro-propagação (*backpropagation*) por Rumelhart, Hinton e Williams (RUMELHART *et al.*, 1986). Este procedimento havia sido proposto antes por Werbos em 1974 em sua tese de doutorado – (WERBOS, 1974) pelo livro, do mesmo ano, denominado *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* por Rumelhart e McClelland (RUMELHART *et al.*, 1974) onde, pela primeira vez, foi apresentada de forma organizada todo o progresso das redes neurais até então.
- 1988 – Broomhead e Lowe (BROOMHEAD, 1988) descreveram o uso das funções de base radial (*radial basis functions*), muito usadas em problemas práticos.

A.4. PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DE RNA

As RNA podem ser como grafos dirigidos sobrecarregados onde os neurônios artificiais são as unidades e as arestas dirigidas são conexões (com pesos) entre os neurônios de saída e os de entrada.

As topologias ou arquiteturas, padrões de conexão das RNA, podem ser agrupadas em duas categorias:

- redes alimentadas à diante, em que os grafos não têm laços, e

- redes recorrentes (ou redes realimentadas) onde o laço ocorre devido às conexões de realimentação.

Dentro da família de redes alimentadas à diante, o chamado *Perceptron* de múltiplas camadas, os neurônios são organizados em camadas que possuem conexões unidirecionais entre eles. A Figura A-3 mostra como são as redes em cada categoria.

Figura A-3 - Uma taxonomia das RNA (JAIN *et al.*, 1995)

A.4.1. Redes alimentadas à diante.

Diferentes conectividades produzem diferentes comportamentos da rede. De forma genérica as redes alimentadas à diante são “estáticas”, isto é, elas produzem um conjunto de valores de saída no lugar de uma sequência de valores de uma dada entrada. As redes alimentadas à diante não possuem memória no sentido que sua resposta para uma entrada é independente do estado anterior da rede.

A.4.2. Redes Recorrentes.

As redes recorrentes ou redes de realimentação (*feedback*) são sistemas dinâmicos. Quando um novo padrão de entrada é apresentado, as saídas dos neurônios são calculadas. Por causa dos caminhos de realimentação, as entradas são modificadas para cada neurônio, o que leva a rede a entrar em um novo estado.

Diferentes arquiteturas de rede necessitam de algoritmos de aprendizagem adequados. A seguir tem-se um resumo dos processos de aprendizagem.

A.5. OPERAÇÃO DAS RNA

A.5.1. Regras de aprendizado.

O processo de aprendizagem nas RNA ocorre por meio do ajuste dos pesos das conexões e da atualização de sua arquitetura com o objetivo de executar uma função específica de forma eficiente. Este processo de aprendizagem ocorre pelo treinamento da rede por meio de iterações e apresentações de exemplos ou padrões que servem como parâmetros para a atualização dos pesos na rede.

Para entender um processo de aprendizagem, primeiro deve-se conhecer qual é o paradigma de aprendizado (HAYKIN, 1994), ou seja, qual informação da rede está disponível; segundo devem-se entender as regras de aprendizado, ou melhor, como os pesos da rede são atualizados e finalmente como é o algoritmo de aprendizado, isto é, qual é o procedimento em que as regras de aprendizagem são usadas para ajustar os pesos.

Há três paradigmas de aprendizagem: supervisionado, não supervisionado e híbrido. No aprendizado supervisionado os pesos são determinados para a rede produzir respostas tão próximas quanto possíveis às respostas corretas. No aprendizado não supervisionado não há necessidade de uma resposta correta. A estrutura básica da rede é explorada por meio da correlação entre padrões e organizada em categorias de padrões. O aprendizado híbrido por sua vez combina aprendizado supervisionado e não supervisionado onde parte dos pesos é determinada por meio de um aprendizado supervisionado, enquanto outra parte é obtida por meio de um aprendizado não supervisionado.

Existem quatro tipos básicos de regras de aprendizagem: correção de erros, Boltzmann, Hebbian e aprendizado competitivo. A regra que é utilizada neste trabalho é a regra de correção por erros, onde se busca uma convergência entre limites máximos pré-estabelecidos de erros, apresentam melhores resultados em treinamento de sistemas de potência (CANELOI, 2004).

Regra de aprendizado de Correção por erros

No paradigma de aprendizagem supervisionado a rede fornece uma saída desejada para cada padrão de entrada. Durante o processo de aprendizado uma saída y gerada pela rede não pode ser igual a uma saída desejada d . O princípio básico da regra de aprendizagem de correção de erros é usar o sinal de erro $(d - y)$ para modificar os pesos da conexão para gradualmente reduzir este erro.

A regra de aprendizagem do *Perceptron* é baseada no princípio de correção de erros. Um *Perceptron* consiste de um único neurônio com ajustes de pesos, w_j , $j = 1, 2, \dots, n$, e o limiar (*bias*) μ , como mostra a Figura A-2. Dado um vetor de entrada $x = (x_1, x_1, \dots, x_n)^t$, a entrada da rede para o neurônio é dada pela equação (3-2).

$$y = \sum_{j=1}^n w_j x_j - \mu \quad (\text{A-2})$$

A saída dos *perceptron* é $+1$ se $v > 0$, ou 0 caso contrário. Em um problema para classificar duas classes, o *perceptron* atribui um padrão de entradas para uma classe se $y = 1$, e para outra classes se $y = 0$. A equação linear (3-3) define a fronteira de decisão (um hiperplano em um espaço de dimensão n) que divide o espaço.

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j - \mu = 0 \quad (\text{A-3})$$

Roseblatt (ROSENBLATT, 1962) desenvolveu um procedimento de aprendizagem para determinar os pesos e o limiar em um *perceptron*, dado um conjunto de padrões de treinamento. Nota-se que o aprendizado ocorre somente quando o *perceptron* comete um erro, pois os pesos e limiares se ajustam, Roseblatt provou que

quando padrões para treinamento são extraídos de duas classes linearmente separáveis, o procedimento de aprendizado do *perceptron* converge depois de um número finito de iterações. Este é o **Teorema de convergência do *perceptron***. Na prática, não se sabe quando os padrões são linearmente separáveis. Outras funções de ativação que conduzem para diferentes características de aprendizagem podem ser usadas. Entretanto, uma simples camada do *perceptron* pode separar padrões linearmente separáveis contanto que uma função de ativação monotônica¹ seja usada.

O algoritmo de aprendizagem *backpropagation* é também baseado no princípio da correção de erros.

A.5.2. Algoritmos de aprendizado.

A Tabela A-2 resume vários algoritmos de aprendizagem e sua arquitetura associada. Os paradigmas de aprendizagem supervisionados e não supervisionados empregam regras de aprendizagem baseadas na correção de erros, Hebbian e aprendizado competitivo. As regras de aprendizagem baseadas em correção de erros podem ser usadas para treinar redes de alimentação à diante, enquanto regras Hebbian de aprendizagem são usadas para todos os tipos de arquiteturas de redes. Entretanto, cada algoritmo de aprendizagem é projetado para treinar uma arquitetura específica. Então, quando um algoritmo de aprendizagem é discutido, uma arquitetura de rede em particular está implícita. Cada algoritmo pode executar poucas tarefas de modo adequado. A última coluna da Tabela A-2 lista as tarefas que cada algoritmo pode realizar devido à limitação de espaço.

¹ Uma função monotônica pode ser crescente ou decrescente e pode ter vários pontos de descontinuidade.

Tabela A-2 - Características de algoritmos de aprendizado mais comuns em RNA (adaptado JAIN *et al.*, 1995).

Algoritmos de aprendizagem conhecidos				
Paradigma	Regra	Arquitetura	Algoritmo	Tarefas
Supervisionado	Correção de erros	Perceptron simples ou múltiplas camadas	Perceptron Backpropagation Adaline Madaline	Classificação de padrões Aproximação de funções Previsão Controle
	Boltzmann	Recorrentes	Boltzmann	Classificação de padrões
	Hebbian	Multicamadas alimentação adiante (<i>feedforward</i>)	Análise discriminação linear	Análise de dados Classificação de padrões
	Competitivo	Competitivo	Vetor de quantificação	Categorização em classes Compressão de dados
Não supervisionado	Correção de erros	Multicamadas alimentação adiante (<i>feedforward</i>)	Projeto de Sammon	Análise de dados
	Hebbian	Alimentação a diante ou competitivo	Análise dos componentes principais	Análise de dados Compressão de dados
		Rede Hopfield	Memória associativa	Memória associativa
	Competitivo	Competitivo	Vetor de quantização	Categorização Compressão de dados
Híbrida	Correção de erros e competitivo	Rede RBF	RBF	Classificação de padrões Aproximação de funções Previsão; Controle

Algoritmo para Redes multicamadas Alimentadas à Diante

A classe de rede multicamadas alimentadas à diante é o *perceptron* multicamadas em que cada unidade emprega também a função de limiar ou função sigmóide. O *perceptron* de multicamadas pode formar limiares de decisão complexa e representar qualquer função booleana (MINSKY, 1969). O desenvolvimento de

algoritmos de aprendizagem *backpropagation*, e os pesos em um *perceptron* multicamadas fazem estas redes muito populares entre pesquisadores e usuários de RNA.

É denotado $w_{ij}^{(l)}$ como o peso da conexão entre a i ésima unidade da camada $(\ell-1)$ para j ésima unidade na camada l .

Dado que $\{(x^{(1)}, d^{(1)}), (x^{(2)}, d^{(2)}), \dots, (x^{(\rho)}, d^{(\rho)})\}$ é um conjunto de ρ padrões treinamento (pares de entrada e saída), onde $x^{(l)} \in R^n$ é a entrada do vetor no espaço dimensional de padrões, e $d^{(i)} \in [0,1]^m$, um hipercubo m -dimensional para propósitos de classificação, m é o número de classes, a função custo dos erros quadrados mais freqüente usada em RNA na literatura é definida como:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\rho} \|y^{(i)} - d^{(i)}\|^2 \quad (\text{A-4})$$

O algoritmo *backpropagation* (RUMELHART, 1989) é um método de gradiente-descendente para minimizar função custo dos erros quadrados na Equação (3-4) conforme Figura A-4.

Figura A-4 - Algoritmo de aprendizado *backpropagation*.

Cada unidade na primeira camada oculta forma um hiperplano no espaço de padrões. As fronteiras entre classes padrão podem ser aproximadas por hiperplanos. Uma unidade na segunda camada oculta forma uma hiper-região das saídas das unidades da 1ª camada; uma região de decisão é obtida pela execução de uma operação AND nos hiperplanos. As unidades da camada de saída combinam as regiões de decisão feitas pelas unidades da segunda camada oculta pela execução de operações lógicas OR.

Uma rede com duas camadas forma várias fronteiras de decisão e, além disso, as MLP com função de ativação sigmóide podem formar fronteiras de decisão suaves no lugar de fronteiras lineares de variáveis.

Problemas com redes alimentadas à diante

Há muitos problemas no projeto deste tipo de rede:

- quantas camadas são necessárias para uma dada tarefa;
- quantas unidades são necessárias por camada;
- como a rede atuará com dados não incluídos no conjunto de treinamento; (habilidade de generalização); e
- dimensão necessária do conjunto de treinamento para obter uma boa generalização.

Embora redes alimentadas à diante usando *backpropagation* sejam muito empregadas para classificação e funções de aproximação (HERTZ, 1991), vários parâmetros de projeto ainda devem ser determinados por tentativas e erros. Resultados teóricos existentes apenas fornecem poucas linhas gerais para escolher estes parâmetros na prática.

LISTA DE REFERÊNCIAS

AES Eletropaulo; A empresa. <http://www.eletropaulo.com.br/>, 29 de novembro de 2005.

ASHBY, W.R.; **Design for a brain**. New York, John Wiley, 1952.

BARTO, A.G.; SUTTON, R.S.; ANDERSON, C.W.; **Neuronlike adaptive elements that can solve difficult learning control problems**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. v.13, p.34-846, 1983.

BROOMHEAD, D.S.; LOWE, D.; **Multi-variable function interpolation and adaptive networks**. Complex Systems, v.2, p. 269-303, 1988.

BROWN, R.E.; **Electric Power Distribution Reliability**. Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 2002.

BRUNHEROTO, P. A.; GOUVÊA, M. R.; ROBBA, E. J.; **Distribuição Subterrânea: é viável?** Anais do II Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo, 2004.

BURKE, J. J.; **Power distribution engineering – fundamentals and applications**. Ed. Marcel Dekker, New York, USA, 1994.

CIREN 2005; **18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution**. Cired 2005 Conference Organizers, Turin, Italy, 6-9 June 2005.

COHEN, M.A.; GROSSBERG, S.; **Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks**. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, b13, p.815-26, 1983.

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz; **Transformador de Distribuição Trifásico Pedestal**. No. Documento: 3916; Categoria: Instrução; Versão: 1.1; Aprovação: Ronaldo Antônio Roncolato; Campinas/SP, 24/06/2003.

DAS, R; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S.; **A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 16-20, 2000, Seattle, Washington. 2000.

DEL NERO, R. R., DIAS, D. S.; **Desenvolvimento de Protetor Nacional para redes reticuladas de distribuição subterrânea**. Sendi 2004 - XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, paper code 109 , Brasília, 2004.

DIAS, D. S.; **Manutenção Preventiva e Corretiva em Network Protector: Viabilidade Técnica – Econômica**; Anais do II Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo SP, 2004.

DEMUTE, H.; BEALE, M.; **Neural Network Toolbox For Use with Matlab - User's Guide**. Version 4, Release 13, The Math Works Inc., 2002.

DILLON, T.S.; NIEBUR, D.; **Neural Networks Applications in Power Systems**. CRL Publishing, London, UK, 1995.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W.; **Electric Power Systems Quality**. 2nd Edition, McGraw Hill, 2002.

DUNCAN, B. K.; BAILEY, B. G.; **Protection, Metering, Monitoring, and Control of Medium-Voltage Power Systems**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, n° 1, Jan/Feb, 2004.

FANNING, R. P.; **Implementation of Networked Primary and Secondary Distribution Systems for US Utilities**. IEEE, Power Engineering Society General Meeting, 2003, Vol. 4, page 2429.

GARCIA, D. A. A.; PEREIRA, S. L.; SILVA, H. A. P.; GRIMONI, J. A. B.; ARAÚJO Fº., E. D.; **Monitoramento de Sistemas Reticulados de Baixa Tensão – Viabilidade Econômica**, T&D Latin América 2004 - IEEE-PES, São Paulo, 2004.

GOUVÊA, M. R.; BELVEDERE, E. C.; **Sistema Híbrido de Distribuição Subterrânea**, São Paulo, 2003.

GROSSBERG, S.; **How does a brain build a cognitive code?** Psychological Review. n.87, p.1-51, 1980.

HAGAN, M. T.; MENHAJ, M.; **Training feedforward networks with the Marquardt algorithm**. IEEE Transactions Neural Networks, vol. 5, nov. 1994.

HAYASHI C. M. H.; **Localização de falhas em sistemas distribuídos utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica – São Paulo – 2005.

HAYKIN, S.S.; **Redes Neurais: Princípios e Práticas**. Artmed Editoras, 2002.

HEBB, D.O.; **The organization of behavior: a neuropsychological theory**, John Wiley, New York, 1949.

HOPFIELD, J.J.; **Neural networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities**. Proceedings of the national Academy of Sciences of the U.S.A., n.79, p.2554-8, 1982.

IEEE Std. 141-1991; **IEEE Recommended Practices for Electric Power Distribution for Industrial Plants**. New York, USA, 1991.

IEEE Std C57.12.44-2000; **IEEE Standard Requirements for Secondary Network Protectors**. New York, USA, 2000.

IEEE Std C37.108-2002; **IEEE Guide for the Protection of Network Transformers**. New York, USA, 2002.

II Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica - São Paulo; **Anais do II Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica**, 2004.

III Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica - São Paulo. **Anais do III Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica**, 2005.

JAIN, A.K.; MAO, J.; MOHIUDDIN, K.M.; **Artificial Neural Networks: A tutorial**. IEEE Computer. (Vol. 29, No. 3) pp. 31-44. March 1996.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.D.; VECCHI, M.P.; **Optimization by simulated annealing**. Science, n.220, p.671-680, 1983.

KOHONEN, T.; **Associative memory: a system-theoretical approach**. New York, Springer, 1977.

KOHONEN, T.; **Self-organized formation of topologically correct feature maps**. Biological Cybernetics. n.43, p.59-69, 1982.

KUADA, J. H.; **Gestão de Operação de Redes Subterrâneas: A Experiência da AES Eletropaulo**. Anais do II Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo SP, 2004.

LASHLEY, K.S.; **In search of the engram**, Society of Experimental Biology Symposium, n°4, Psychological Mechanisms in Animal Behavior, Cambridge University Press, Cambridge, MA. 1950.

LAU, C.; **Neural Networks. Theoretical Foundations and Analysis**. "IEEE Neural Networks Council, sponsor". Includes papers published in two IEEE proceedings special issues and in other publications, 1987-1990. "A Selected reprint volume." 1992.

LEE, W.-J., CULTRERA, J., MAFFETONE, T.; **Application and Testing of a Microcomputer-Based Network Protector**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 2, March/April 2000.

MAREN, A.; HARSTON, G.; PAP, R.; **Handbook of Neural Computing Applications**. California. Academic Press, Inc. 1990.

MINSKY, M.L.; **Theory of neuro-analog reinforcement systems and its application to the brain-model problem**. Princeton, Thesis (PhD) – Princeton University, 1954.

MINSKY, M.L.; PAPERT, S.A.; **Perceptrons**. Cambridge, MIT Press, 1969.

OLESKOVICZ, M.; AGGARWAL, R. K.; COURY, D. V.; **O Emprego de Redes Neurais Artificiais na Detecção, Classificação e Localização de Falhas em Linhas de Transmissão**, Revista Controle & Automação, Vol. 14, no. 2, Abri/Maio/Junho, 2003.

OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT, H. P.; KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas**, Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 1996.

PURUSHOTHAMA, G.K; NARENDRANATH; THUKARAM, D.; PARTHASARATH, K.; **ANN applications in fault locators**. Elect. Power Syst. Res., vol.23, no. 6, pp. 491-506, Aug. 2001.

ROSENBLATT, F.; **The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain**. Psychological Review. N. 65, p. 386-408, 1958.

RUMELHART, D.; HINTON, G.; WILLIAMS, R.J.; **Learning Internal Representation by Error Propagation in Parallel Distributed Processing**. The MIT Press. 1986.

RUMELHART, D.E.; LOWE, D.; **Parallel distributed processing**. San Diego, MIT Press, 1986.

SANTOS, R. C.; **Algoritmo Baseado em Redes Neurais Artificiais para a Proteção de Distância de Linhas de Transmissão**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2004.

STEVENSON JR., W. D.; **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**, Editora McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1978.

THUKARAM, D.; KHINCHA, H. P.; VIJAYNARASIMHA, H. P.; **Artificial Neural Network and Support Vector Machine Approach for Locating Faults in Radial Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Delivery 20(2):pp. 710-721. 2005.

UTLEY, A.M.; **A theory of the mechanism of learning based on the computation of condition probabilities**. In: International Conference on Cybernetics, 1º, Namur, 1956. Proceedings. Paris, Gauthier-Vellair, 1956.

VON DER MARLSBURG, C.; **Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex**. Kybernetik, n14, p.85-100, 1973.

VON NEUMANN, J.; **First Draft of a Report on the EDVAC**. Moore School of Electrical Engineering University of Pennsylvania, 1945, in: IEEE CS Press book. "The Anatomy of a Microprocessor: A Systems Perspective", by Shriver & Smith. http://www.math.nmsu.edu/hist_projects/EDVAC.pdf, acessado em 12/12/2005.

WERBOS, P.J.; **Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences**. Cambridge. Thesis (PhD) – Harvard University. 1974.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CO.; **Westinghouse – Electrical Transmission and Distribution Reference Book**, Pittsburgh, PA, USA, 1964.

WILLIS, H.L.; **Power Distribution Planning Reference Book**, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1997.

WILLSHAW, D.J.; VON DER MARLSBURG, C.; **How patterned neural connections can be set up by self-organization**. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, 1976.

WINDROW, B.; LEHR, M.A.; **30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and back propagation**. Proceedings of the IEEE, v.78, n.9, p.1415-41, Sept. 1990.

WINDROW, B; HOFF JR, M.E.; **Adaptive switching circuits**. IRE WESCON. Convection Record, v.4, p. 96-104, 1960.

YANG, C.L.; OKAMOTO, H.; YOKOYAMA, A.; SEKINE, Y.; **Expert system for fault section estimation of power system using time sequence information.** Elect. Power Energy Syst., vol 14, no. 2, pp. 225-232. 1992.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A.; **Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, pp. 801-809, no. 2, April 1997.