

**RELÉ DIFERENCIAL PARA
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA
UTILIZANDO FERRAMENTAS INTELIGENTES**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço.....14../06../05.....

Ass.:.....*l. car*.....

ÊNIO CARLOS SEGATTO

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

São Carlos

2005



DEDALUS - Acervo - EESC

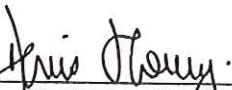



31100052196

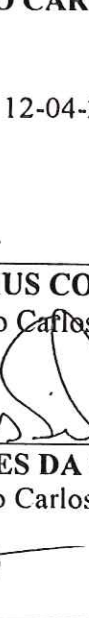
FOLHA DE JULGAMENTO


Candidato: Engenheiro **ÊNIO CARLOS SEGATTO**

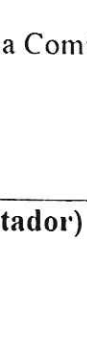
Tese defendida e julgada em 12-04-2005 perante a Comissão Julgadora:

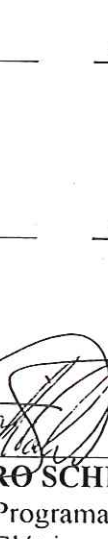

Prof. Titular **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO



Prof. Associado **IVAN NUNES DA SILVA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO


Prof. Dr. **ANDRÉ NUNES DE SOUZA**
(UNESP/Campus de Bauru) APROVADO


Prof. Dr. **BENEMAR ALENCAR DE SOUZA**
(Universidade Federal da Paraíba/UFPB) APROVADO


Prof. Titular **CHRISTIANO LYRA FILHO**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP) APROVADO


Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador em Exercício do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica


Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho aos meus pais, Ennio e Zuleika, à minha avó Albertina (*in memoriam*), à minha irmã Ana Zuleika e à minha esposa Ana Cláudia, pelo amor e incentivo infinitos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Denis, pela excelente orientação, pela atenção dispensada, incentivo e amizade em todos os momentos.

Ao Professor André, pelas valiosas contribuições no campo das Redes Neurais Artificiais e pela atenção sempre concedida.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, pela amizade, profissionalismo e grandes momentos de descontração.

Aos amigos Renan e David, pelos valiosos auxílios na programação computacional.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de algum modo colaboraram durante a minha permanência nesta universidade.

À FAPESP, pelo suporte fornecido durante o desenvolvimento deste projeto.

À minha cunhada Márcia, pela dedicação e apoio na revisão gramatical.

À minha irmã Ana Zuleika e meu cunhado John, pelo carinho, incentivo e auxílio.

À minha avó Albertina, por seu amor e pelas sempre valiosas orações, as quais a acompanharão para sempre.

À minha querida esposa Ana Cláudia, pelo seu amor, dedicação, apoio, esforço e paciência em todos os momentos. Pelas inúmeras flores amarelas e pelo último "OK" de vitória.

Aos meus queridos pais, Ennio e Zuleika, por seu amor, apoio, paciência, incentivo e esforço, presentes por toda a minha vida.

À Deus, por minha vida e família.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | III |
| LISTA DE TABELAS..... | VII |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | IX |
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | X |
| RESUMO | XV |
| ABSTRACT | XVI |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 A PROTEÇÃO DIFERENCIAL | 2 |
| 1.2 O RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL | 3 |
| 1.3 CONEXÕES DOS TCs PARA A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO E SUA CARACTERÍSTICA DE ATUAÇÃO | 5 |
| 1.4 SURGIMENTO DE CORRENTES DIFERENCIAIS INDESEJADAS..... | 7 |
| 1.4.1 <i>As Correntes de Magnetização</i> | 7 |
| 1.4.2 <i>A Saturação dos Transformadores de Corrente</i> | 11 |
| 1.4.3 <i>Demais Casos de Sinais Indesejados</i> | 18 |
| 1.5 PROPOSTA DO TRABALHO | 19 |
| 2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO | 22 |
| 2.1 PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES..... | 23 |
| 2.2 RECONSTRUÇÃO DE SINAIS DISTORCIDOS | 31 |
| 2.3 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FALTOSOS | 33 |
| 3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS | 35 |
| 3.1 HISTÓRICO..... | 36 |
| 3.2 FUNCIONAMENTO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL..... | 37 |
| 3.3 REDE NEURAL ARTIFICIAL MULTICAMADAS E O MÉTODO DE TREINAMENTO <i>BACKPROPAGATION</i> | 40 |
| 3.4 REDES NEURAIS TIPO RBF – <i>RADIAL BASIS FUNCTION</i> | 41 |
| 3.5 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS RECORRENTES..... | 44 |
| 3.5.1 <i>Redes de Elman e Jordan</i> | 45 |
| 4 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO CONSIDERADO | 49 |
| 4.1 HISTÓRICO DO PROGRAMA ATP..... | 50 |
| 4.2 SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO | 51 |
| 4.3 O MODELO DO TRANSFORMADOR | 52 |
| 4.4 CÁLCULOS PARA A CONSTRUÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS DO ATP..... | 54 |
| 4.5 FORMATO DOS ARQUIVOS DE DADOS | 63 |
| 4.6 ESTUDO DA REPRESENTAÇÃO DOS FENÔMENOS ENVOLVIDOS | 64 |
| 4.6.1 <i>Simulações Realizadas</i> | 64 |
| 4.6.2 <i>Resultados Obtidos</i> | 67 |

| | |
|---|------------|
| 4.7 TRANSFORMADOR ALTERNATIVO MODELADO | 78 |
| 4.7.1 <i>Simulações Realizadas</i> | 79 |
| 4.7.2 <i>Resultados Obtidos</i> | 82 |
| 5 ALGORITMOS APLICADOS À PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES | 83 |
| 5.1 A EVOLUÇÃO DOS RELÉS | 84 |
| 5.2 ARQUITETURA DO RELÉ | 86 |
| 5.3 ALGORITMO CONVENCIONAL DO RELÉ DIFERENCIAL DIGITAL | 88 |
| 5.4 ALGORITMOS DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL PROPOSTOS COM O AUXÍLIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS | 90 |
| 6 A APLICAÇÃO DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES – AS ABORDAGENS CONSIDERADAS | 95 |
| 6.1 INTRODUÇÃO | 96 |
| 6.2 RECONHECIMENTO DE PADRÕES CONSIDERANDO A SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE | 96 |
| 6.2.1 <i>O Programa SNNS – Stuttgart Neural Network Simulator</i> | 96 |
| 6.2.2 <i>O Programa MATLAB – Neural Toolbox</i> | 98 |
| 6.2.3 <i>A Formação dos Conjuntos de Padrões</i> | 98 |
| 6.2.4 <i>Redes MLP</i> | 102 |
| 6.2.5 <i>Redes RBF</i> | 105 |
| 6.3 COMPENSAÇÃO DO EFEITO DA SATURAÇÃO ALIADO AO RECONHECIMENTO DE PADRÕES PARA A PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA | 108 |
| 6.3.1 <i>Algoritmo Proposto na Correção dos Sinais Saturados</i> | 109 |
| 6.3.2 <i>Treinamento e Testes das Redes Neurais Artificiais</i> | 109 |
| 6.3.3 <i>Testes Efetuados com os Sinais Reconstruídos</i> | 118 |
| 7 ESTUDO COMPARATIVO DAS ABORDAGENS PROPOSTAS | 121 |
| 7.1 ALGORITMO COM A UTILIZAÇÃO DE RNAs COM DADOS SATURADOS | 123 |
| 7.2 ALGORITMO ENVOLVENDO A RECONSTRUÇÃO DE SINAIS | 126 |
| 7.3 ALGORITMO CONVENCIONAL COMPLETO DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA | 129 |
| 7.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS ABORDAGENS PROPOSTAS | 137 |
| 8 CONCLUSÕES | 140 |
| 9 PUBLICAÇÕES | 144 |
| 9.1 PUBLICAÇÕES EM CONGRESSOS E CONFERÊNCIAS | 145 |
| 9.2 PUBLICAÇÕES EM REVISTAS | 147 |
| 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 148 |
| APÊNDICES | 158 |
| <u>APÊNDICE A</u> | 159 |
| <u>APÊNDICE B</u> | 163 |
| <u>APÊNDICE C</u> | 173 |
| <u>APÊNDICE D</u> | 178 |
| <u>APÊNDICE E</u> | 187 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - Proteção diferencial percentual do transformador | 4 |
| FIGURA 2 - Diagrama de conexões do transformador e TCs | 5 |
| FIGURA 3 - Característica de atuação da proteção diferencial | 6 |
| FIGURA 4 - Amplitudes das correntes de <i>inrush</i> e nominal | 9 |
| FIGURA 5 - Decomposição harmônica de sinal diferencial de energização do transformador sem a presença de saturação dos TCs | 13 |
| FIGURA 6 - Decomposição harmônica de sinal diferencial de energização do transformador com a presença de saturação dos TCs..... | 13 |
| FIGURA 7 - Decomposição harmônica de sinal diferencial de falta interna ao transformador sem a presença de saturação dos TCs | 14 |
| FIGURA 8 - Decomposição harmônica de sinal diferencial de falta interna ao transformador com a presença de saturação dos TCs..... | 15 |
| FIGURA 9 - Caso de energização sem a presença de saturação dos TCs..... | 16 |
| FIGURA 10 - Caso de energização com a presença de saturação dos TCs | 16 |
| FIGURA 11 - Caso de falta interna em 10% do enrolamento sem a presença de saturação dos TCs..... | 17 |
| FIGURA 12 - Caso de falta interna em 10% do enrolamento com a presença de saturação dos TCs..... | 17 |
| FIGURA 13 - Caso de falta externa trifásica sem a presença de saturação dos TCs. | 18 |
| FIGURA 14 - Caso de falta externa trifásica com a presença de saturação dos TCs | 18 |
| FIGURA 15 - Representação de um neurônio humano | 36 |
| FIGURA 16 - Modelo de neurônio binário | 37 |
| FIGURA 17 - Modelo atual da célula de uma rede neural artificial | 38 |
| FIGURA 18 - Funções de transferência do neurônio..... | 38 |
| FIGURA 19 - Rede neural completa com três camadas | 40 |
| FIGURA 20 - Rede Neural Recorrente de Elman..... | 47 |
| FIGURA 21 - Rede Neural Recorrente de Jordan..... | 47 |
| FIGURA 22 - Sistema elétrico utilizado no ATP..... | 52 |
| FIGURA 23 - Modelo de transformador utilizado no ATP | 53 |
| FIGURA 24 - Detalhe das conexões dos enrolamentos..... | 53 |
| FIGURA 25 - Detalhe da conexão dos TCs ao sistema elétrico | 54 |
| FIGURA 26 - Disposição dos parâmetros elétricos em um triângulo de cargas..... | 56 |
| FIGURA 27 - Curva de saturação do transformador de potência | 58 |
| FIGURA 28 - Divisão do transformador para a simulação de faltas a 10%, 50% e 90% da fase A do enrolamento primário | 61 |
| FIGURA 29 - Curva de saturação dos transformadores de corrente do sistema elétrico | 62 |
| FIGURA 30 - Situação de falta entre o transformador e o TC..... | 65 |
| FIGURA 31 - Condição de energização com tensão=112,7 kV e fechamento em 6 ms na fase A, 6 ms na fase B e 6 ms na fase C | 68 |
| FIGURA 32 - Condição de energização com tensão=112,7 kV e fechamento em 7 ms na fase A, 9 ms na fase B e 11 ms na fase C | 69 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 33 - Condição de energização com tensão=118,0 kV e fechamento em 6 ms na fase A, 11 ms na fase B e 15 ms na fase C com a presença de saturação dos TCs..... | 69 |
| FIGURA 34 - Condição de energização com tensão=112,7 kV e fechamento em 5 ms na fase A, 7 ms na fase B e 9 ms na fase C, com falta interna entre espira e terra em 50% do enrolamento | 70 |
| FIGURA 35 - Condição de falta interna entre espira e terra em 10% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms | 70 |
| FIGURA 36 - Condição de falta interna entre espira e terra em 10% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=12 MVA em 15 ms com a presença de saturação dos TCs..... | 71 |
| FIGURA 37 - Condição de falta interna entre espira e terra em 50% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms | 71 |
| FIGURA 38 - Condição de falta interna entre espira e terra em 70% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms | 72 |
| FIGURA 39 - Caso de falta interna em 10% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador com a presença de saturação dos TCs | 72 |
| FIGURA 40 - Caso de falta interna em 50% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador com a presença de saturação dos TCs | 73 |
| FIGURA 41 - Caso de falta interna em 90% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador com a presença de saturação dos TCs | 73 |
| FIGURA 42 - Diagrama funcional do relé digital..... | 86 |
| FIGURA 43 - Lógica de processamento do relé digital convencional..... | 88 |
| FIGURA 44 - Algoritmo da proteção diferencial proposto com a inclusão do módulo de reconhecimento de padrões por RNA | 91 |
| FIGURA 45 - Algoritmo da proteção diferencial proposto com a inclusão dos módulos de reconstrução e reconhecimento de padrões por RNA | 92 |
| FIGURA 46 - Representação das entradas e saídas das redes neurais para a finalidade proposta..... | 100 |
| FIGURA 47 - Decaimento dos erros de treinamento e validação para a rede 12+8+5+1..... | 103 |
| FIGURA 48 - Rede neural de topologia 12+8+5+1 | 103 |
| FIGURA 49 - Classificação da rede 12+8+5+1 MLP para 2556 padrões testados.. | 104 |
| FIGURA 50 - Classificação da rede 12+35+1 RBF para 2556 padrões testados | 106 |
| FIGURA 51 - Curva dos erros de treinamento e validação da rede 24+20+24 de Elman..... | 111 |
| FIGURA 52 - Rede Neural Recorrente de Elman extraída do simulador SNNS..... | 112 |
| FIGURA 53 - Erros dos testes efetuados na rede 24+20+24 | 113 |
| FIGURA 54 - Sinal de energização distorcido por saturação | 113 |
| FIGURA 55 - Sinal de energização com TC ideal..... | 114 |
| FIGURA 56 - Sinal de energização reconstruído pela RNA..... | 114 |
| FIGURA 57 - Sinal de falta interna distorcido pela saturação..... | 115 |
| FIGURA 58 - Sinal de falta interna com TC ideal..... | 115 |
| FIGURA 59 - Sinal de falta interna reconstruído pela RNA | 115 |
| FIGURA 60 - Sinal de falta interna distorcido pela saturação..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 61 - Sinal de falta interna com TC ideal..... | 116 |
| FIGURA 62 - Sinal de falta interna reconstruído pela RNA | 117 |
| FIGURA 63 - Sinal de energização distorcido por saturação | 117 |
| FIGURA 64 - Sinal de energização com TC ideal..... | 118 |
| FIGURA 65 - Sinal de energização reconstruído pela RNA..... | 118 |
| FIGURA 66 - Classificação da rede RBF para 2595 casos de testes | 119 |
| FIGURA 67 - Classificação da rede MLP para 2595 casos de testes | 120 |
| FIGURA 68 - Condição de falta interna entre espiras em 30% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms | 164 |
| FIGURA 69 - Condição de falta interna entre espiras em 70% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms | 165 |
| FIGURA 70 - Condição de falta externa monofásica,tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms | 165 |
| FIGURA 71 - Condição de falta externa trifásica, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms na fase A, 12 ms na fase B e 14 ms na fase C..... | 166 |
| FIGURA 72 - Condição de remoção de falta externa monofásica, tensão=112,7 kV, carga=10 MVA, ocorrida em 10 ms e removida em 50 ms..... | 166 |
| FIGURA 73 - Condição de remoção de falta externa trifásica, tensão=112,7 kV, carga=10 MVA, ocorrida em 10 ms na fase A, 12 ms na fase B e 14 ms na fase C e removida em 50 ms na fase A, 50 ms na fase B e 50 ms na fase C..... | 167 |
| FIGURA 74 - Condição de rejeição de carga, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms na fase A, 12 ms na fase B e 10 ms na fase C..... | 167 |
| FIGURA 75 - Condição de falta entre transformador e TC secundário, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms nas fases A, B e C | 168 |
| FIGURA 76 - Tensões primárias para sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz.... | 168 |
| FIGURA 77 - Tensões secundárias para sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz | 169 |
| FIGURA 78 - Correntes diferenciais para sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz | 169 |
| FIGURA 79 - Tensões primárias para sobre-excitação em 120 kV, valor eficaz.... | 170 |
| FIGURA 80 - Tensões secundárias para sobre-excitação em 120 kV, valor eficaz | 170 |
| FIGURA 81 - Correntes diferenciais para sobre-excitação em 120 kV, valor eficaz | 171 |
| FIGURA 82 - Correntes primárias de energização de capacitor no lado primário .. | 171 |
| FIGURA 83 - Correntes secundárias de energização de capacitor no lado primário | 172 |
| FIGURA 84 - Correntes diferenciais de energização de capacitor no lado primário | 172 |
| FIGURA 85 - Curva de saturação dos TCs..... | 177 |
| FIGURA 86 - Caso de energização do transformador de 6,25 MVA | 178 |
| FIGURA 87 - Correntes diferenciais de energização do transformador com presença de falta interna em 10% do enrolamento da fase A..... | 179 |
| FIGURA 88 - Correntes diferenciais de energização do transformador com presença de falta interna em 90% do enrolamento da fase A..... | 179 |
| FIGURA 89 - Correntes diferenciais de falta interna entre espiras em 10% do enrolamento da fase A | 180 |
| FIGURA 90 - Correntes diferenciais de falta interna entre espiras em 70% do enrolamento da fase A | 180 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 91 - Correntes diferenciais de falta monofásica entre o transformador e o TC secundário | 181 |
| FIGURA 92 - Correntes diferenciais de falta trifásica entre o transformador e o TC secundário | 181 |
| FIGURA 93 - Correntes diferenciais de falta externa monofásica | 182 |
| FIGURA 94 - Correntes diferenciais de falta externa trifásica | 182 |
| FIGURA 95 - Correntes diferenciais de falta interna em 10% da fase A para a terra | 183 |
| FIGURA 96 - Correntes diferenciais de falta interna em 50% da fase A para a terra | 183 |
| FIGURA 97 - Correntes diferenciais de falta interna em 90% da fase A para a terra | 184 |
| FIGURA 98 - Correntes primárias para caso de rejeição de carga | 184 |
| FIGURA 99 - Correntes secundárias para caso de rejeição de carga..... | 185 |
| FIGURA 100 - Correntes diferenciais para caso de rejeição de carga..... | 185 |
| FIGURA 101 - Correntes diferenciais para caso de remoção de falta externa monofásica | 186 |
| FIGURA 102 - Correntes diferenciais para caso de remoção de falta externa trifásica | 186 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - Conteúdo harmônico das correntes de energização | 10 |
| TABELA 2 - Comparação entre redes neurais dos tipos MLP e RBF..... | 44 |
| TABELA 3 - Dados de tensão e corrente para a rotina SATURATION | 58 |
| TABELA 4 - Divisão do enrolamento primário em 10, 50 e 90% na aplicação de faltas internas | 61 |
| TABELA 5 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização do transformador..... | 75 |
| TABELA 6 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização do transformador com a presença de faltas internas..... | 76 |
| TABELA 7 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas internas ao transformador | 76 |
| TABELA 8 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas ocorridas entre o transformador e o TC..... | 76 |
| TABELA 9 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas externas ao transformador..... | 76 |
| TABELA 10 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de remoção de faltas externas ao transformador | 77 |
| TABELA 11 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de rejeição de cargas..... | 77 |
| TABELA 12 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de sobre- excitação do transformador..... | 77 |
| TABELA 13 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização de bancos de capacitores..... | 77 |
| TABELA 14 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de regime permanente..... | 78 |
| TABELA 15 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização do transformador..... | 80 |
| TABELA 16 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização com a presença de faltas internas ao transformador | 80 |
| TABELA 17 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas internas ao transformador | 80 |
| TABELA 18 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas ocorrendo entre o transformador e o TC secundário | 81 |
| TABELA 19 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas externas | 81 |
| TABELA 20 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de remoção de faltas externas ao transformador | 81 |
| TABELA 21 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de rejeição de cargas..... | 81 |
| TABELA 22 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de sobre- excitação do transformador..... | 82 |
| TABELA 23 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização de bancos de capacitores..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 24 - Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de regime permanente..... | 82 |
| TABELA 25 - Índices de acerto das redes RBF e MLP testadas com dados saturados | 107 |
| TABELA 26 - Desempenho do algoritmo utilizando reconhecimento de padrões contendo dados saturados para o transformador de 25 MVA..... | 124 |
| TABELA 27 - Desempenho do algoritmo utilizando reconhecimento de padrões contendo dados saturados para o transformador de 6,25 MVA..... | 125 |
| TABELA 28 - Desempenho do algoritmo utilizando reconstrução de sinais saturados e reconhecimento de padrões para o transformador de 25 MVA | 127 |
| TABELA 29 - Desempenho do algoritmo utilizando reconstrução de sinais saturados e reconhecimento de padrões para o transformador de 6,25 MVA | 128 |
| TABELA 30 - Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA | 131 |
| TABELA 31 - Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA | 132 |
| TABELA 32 - Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA | 133 |
| TABELA 33 - Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA | 133 |
| TABELA 34 - Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA | 134 |
| TABELA 35 - Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA | 135 |
| TABELA 36 - Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA | 136 |
| TABELA 37 - Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA | 136 |
| TABELA 38 - Comparação entre os algoritmos de proteção propostos e convencional para o transformador de 25 MVA | 138 |
| TABELA 39 - Comparação entre os algoritmos de proteção propostos e convencional para o transformador de 6,25 MVA | 138 |
| TABELA 40 - Valores de tensão e corrente para a rotina SATURATION | 174 |
| TABELA 41 - Valores de corrente e fluxo obtidos através da rotina SATURATION | 174 |
| TABELA 42 - Ponto de “quebra de joelho” da curva de saturação | 175 |
| TABELA 43 - Valores finais de corrente e fluxo da curva de saturação | 175 |
| TABELA 44 - Valores de corrente e tensão dos TCs do lado de baixa tensão..... | 176 |
| TABELA 45 - Valores de tensão e corrente em pu para os TCs..... | 176 |
| TABELA 46 - Curva de saturação dos TCs obtida pela rotina SATURATION | 177 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| A/D | - Analógico/Digital |
| ANN | - <i>Artificial Neural Network</i> |
| ATP | - <i>Alternative Transient Program</i> |
| BPA | - <i>Bonneville Power Administration</i> |
| DFT | - <i>Discrete Fourier Transform</i> |
| EMTP | - <i>Electromagnetic Transient Program</i> |
| EPRI | - <i>Electric Power Research Institute</i> |
| LEC | - <i>Leuven EMTP Center</i> |
| MLP | - <i>Multi Layer Perceptron</i> |
| MSE | - <i>Mean Square Error</i> |
| RNA | - Rede Neural Artificial |
| RBF | - <i>Radial Basis Function</i> |
| SNNS | - <i>Stuttgart Neural Network Simulator</i> |
| TC | - Transformador de Corrente |
| TP | - Transformador de Potencial |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|--|
| ρ | - limiar unitário |
| w_{ij} | - força da sinapse conectando o neurônio j ao neurônio i |
| n_i | - função de saída para o neurônio i |
| $\theta(x)$ | - função Degrau |
| X | - vetor de dados de entrada |
| W_i | - matriz de valores de peso associados a cada entrada |
| $h_i^{(m)}$ | - entrada para um dado neurônio i com seus pesos correspondentes de uma certa camada m |
| F_i | - função de transferência sigmoideal do neurônio i |
| b_i | - unidade <i>bias</i> do neurônio i |
| d | - saída desejada da rede neural para cada entrada |
| $y_i^{(m)}$ | - saída do neurônio i na camada m |
| E_p | - erro <i>Backpropagation</i> de saída |
| I'_1 | - corrente passante primária do transformador |
| I'_2 | - corrente passante secundária do transformador |
| I'_f | - corrente de falta |
| I_1 | - corrente passante primária transformada pelo TC |
| I_2 | - corrente passante secundária transformada pelo TC |
| Δ | - conexão em delta |
| Y | - conexão em estrela |
| CO' | - valor do patamar superior da curva de característica percentual do relé |
| CO | - valor do patamar inferior da curva de característica percentual do relé |
| I_{da} | - corrente diferencial da fase A |
| I_{db} | - corrente diferencial da fase B |
| I_{dc} | - corrente diferencial da fase C |
| I_{ta} | - corrente passante da fase A |
| I_{tb} | - corrente passante da fase B |

| | |
|---------------|---|
| I_{ta} | - corrente passante da fase C |
| v_1 | - tensão do enrolamento primário do transformador |
| r_1 | - resistência do enrolamento primário do transformador |
| i_0 | - corrente a vazio |
| l_1 | - comprimento do enrolamento primário do transformador |
| N_1 | - número de espiras do enrolamento primário do transformador |
| N_2 | - número de espiras do enrolamento secundário do transformador |
| ϕ | - fluxo de dispersão |
| V_{1m} | - tensão no instante de energização $t=0$ |
| W | - velocidade angular |
| T | - tempo |
| β | - ângulo que define a tensão V_{1m} |
| ϕ_0 | - fluxo residual no instante $t=0$ |
| ϕ_m | - fluxo na energização |
| ϕ_{pico} | - fluxo de pico produzido pela corrente a vazio i_0 |
| i_r | - corrente de <i>inrush</i> |
| i_n | - corrente normal de regime permanente |
| V | - sinal de tensão proveniente do transformador de potencial TP |
| I | - sinal de corrente proveniente do transformador de corrente TC |
| i_{DA} | - corrente diferencial da fase A |
| i_{DB} | - corrente diferencial da fase B |
| i_{DC} | - corrente diferencial da fase C |
| i_A | - corrente primária da fase A |
| i_B | - corrente primária da fase B |
| i_C | - corrente primária da fase C |
| i_a | - corrente secundária da fase A |
| i_b | - corrente secundária da fase B |
| i_c | - corrente secundária da fase C |
| K | - relação do número de espiras do transformador |
| C_2 | - conteúdo máximo de 2º harmônico em relação à componente fundamental |

| | |
|-----------------------|---|
| C_5 | - conteúdo máximo de 5º harmônico em relação à componente fundamental |
| R_1 | - resistência do lado primário do modelo de transformador utilizado |
| R_2 | - resistência do lado secundário do modelo de transformador utilizado |
| L_1 | - indutância do lado primário do modelo de transformador utilizado |
| L_2 | - indutância do lado secundário do modelo de transformador utilizado |
| R_0 | - resistência de sequência zero |
| R_+ | - resistência de sequência positiva |
| L_0 | - indutância de sequência zero |
| L_+ | - indutância de sequência positiva |
| S | - potência da carga do sistema |
| U | - tensão da carga do sistema |
| Z | - impedância da carga do sistema |
| R | - resistência da carga do sistema |
| L | - indutância da carga do sistema |
| S_{BASE} | - potência base |
| $S_{TRANSFORMADOR}$ | - potência do transformador |
| V_{BASE} | - tensão base |
| V_j | - tensão de Joelho |
| I_0 | - corrente de magnetização do transformador |
| X_s | - impedância de saturação |
| I_{BASE} | - corrente base |
| Z_{BASE} | - impedância base |
| $Z_{BASE-PRIMARIO}$ | - impedância base do primário |
| $Z_{BASE-SECUNDARIO}$ | - impedância base do secundário |
| X' | - reatância do transformador |
| X'_{pu} | - reatância em pu |
| $X'_{PRIMARIO}$ | - reatância do lado primário do transformador |
| $X'_{SECUNDARIO}$ | - reatância do lado secundário do transformador |
| R' | - resistência do transformador |

| | |
|-------------------------|--|
| L_{PRIMARIO} | - indutância do lado primário do transformador |
| $L_{\text{SECUNDARIO}}$ | - indutância do lado secundário do transformador |
| R_{PRIMARIO} | - resistência do lado primário do transformador |
| $R_{\text{SECUNDARIO}}$ | - resistência do lado secundário do transformador |
| R_{1a} | - resistência da primeira porção do enrolamento dividido do transformador |
| L_{1a} | - indutância da primeira porção do enrolamento dividido do transformador |
| R_{1b} | - resistência da segunda porção do enrolamento dividido do transformador |
| L_{1b} | - indutância da segunda porção do enrolamento dividido do transformador |
| R_{1c} | - resistência da terceira porção do enrolamento dividido do transformador |
| L_{1c} | - indutância da terceira porção do enrolamento dividido do transformador |
| R_{1d} | - resistência da quarta porção do enrolamento dividido do transformador |
| L_{1d} | - indutância da quarta porção do enrolamento dividido do transformador |
| α | - taxa de aprendizagem |
| d_j | - diferença máxima entre o valor de aprendizado e a saída desejada para o neurônio j |
| t_j | - valor de aprendizado para o neurônio j |
| y_j | - saída desejada para o neurônio j |
| μ | - termo <i>momentum</i> |
| Δw_{ij} | - correção dos pesos entre o neurônio i e o neurônio j |
| δ_j | - erro para o neurônio j |
| k | - valor da iteração |
| i_{A1} | - primeiro ponto da corrente diferencial da fase A utilizado na janela de dados móveis |

- i_{A2} - segundo ponto da corrente diferencial da fase A utilizado na janela de dados móveis
- i_{A3} - terceiro ponto da corrente diferencial da fase A utilizado na janela de dados móveis
- i_{A4} - quarto ponto da corrente diferencial da fase A utilizado na janela de dados móveis
- i_{A5} - quinto ponto da corrente diferencial da fase A utilizado na janela de dados móveis
- i_{A6} - sexto ponto da corrente diferencial da fase A utilizado na janela de dados móveis

RESUMO

SEGATTO, E.C. (2005). *Relé Diferencial Para Transformadores de Potência Utilizando Ferramentas Inteligentes*. São Carlos, 2005. 203 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta a proposta de um sistema completo de proteção diferencial de transformadores de potência, aplicando-se as técnicas de Redes Neurais Artificiais (RNAs). O esquema proposto busca a classificação do sistema de proteção como um problema de reconhecimento e reconstrução de padrões, representando um método alternativo aos algoritmos convencionais.

Vários fatores como, por exemplo, as situações de energização do transformador e a saturação dos transformadores de corrente, podem causar uma má operação do dispositivo de proteção.

Com o objetivo de melhoramento na proteção digital de transformadores de potência, desenvolveu-se um sistema de proteção diferencial, incluindo dispositivos com base em RNAs, em substituição à filtragem harmônica de sinais existente no algoritmo convencional. Em complementação, esquemas de reconstrução das ondas distorcidas provenientes da saturação dos TCs são também propostos e adicionados ao algoritmo final de proteção, sendo esses comparados ao algoritmo convencional de proteção diferencial de transformadores.

Com a referida adição de ferramentas de inteligência artificial a um algoritmo completo de proteção diferencial de transformadores, obteve-se uma solução bastante precisa e eficiente, capaz de responder em um tempo reduzido, se comparada aos métodos convencionais.

Palavras-chave: Proteção Diferencial; Redes Neurais Artificiais;
Transformadores de Potência; Saturação dos Transformadores de Corrente

ABSTRACT

SEGATTO, E.C. (2005). *A Differential Relay for Power Transformers Using Intelligent Tools*. São Carlos, 2005. 203 p. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work proposes a complete differential protection system for power transformers, applying the Artificial Neural Network (ANN) theory. The proposed approach treat the classification of the protection system as a problem of pattern recognition and as an alternative method to the conventional algorithms.

Several factors such as, for example, transformer energization and CT saturation can cause an inadequate operation of the protection relay. With the objective of improving the power transformer digital protection, a complete protection system was developed, including an ANN-based device in substitution to harmonic filters, in use in the conventional algorithm. Some approaches concerning the reconstruction of the distorted signals caused by the CTs saturation are also proposed. These routines are added to the final protection algorithm and they are compared to the conventional algorithm for power transformer protection.

With the use of artificial intelligence tools in a complete power transformer protection algorithm, one intends to obtain a very precise, fast and efficient solution, if compared to the conventional methods.

Keywords: Differential Protection; Artificial Neural Networks; Power Transformers; Current Transformer Saturation

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de dispositivos de proteção em sistemas elétricos de potência possui comprovada importância e o aperfeiçoamento e confiabilidade destes mecanismos necessitam estar em constante evolução.

Estes dispositivos de proteção (relés), recebem sinais elétricos proporcionais à grandeza a ser monitorada e comandam o desligamento de um disjuntor, que isola a porção protegida do sistema quando esta grandeza ultrapassa um valor estabelecido.

Os relés constituíam-se inicialmente de estruturas eletromecânicas que, apesar de bons resultados, tinham a necessidade de uma mecânica fina de manufatura. Com a evolução da eletrônica nos anos 60, surgiram os dispositivos transistorizados, reduzindo custos e aprimorando a precisão da operação. O surgimento da tecnologia digital permitiu o desenvolvimento de relés mais rápidos e confiáveis, substituindo os circuitos analógicos existentes. Assim, as grandezas monitoradas são filtradas, convertidas para modo digital e tratadas desta forma até o final do processo.

Este capítulo apresenta uma breve descrição da proteção diferencial digital e do relé diferencial percentual. Aborda ainda o esquema de conexões dos transformadores de corrente (TCs) para a proteção diferencial do transformador trifásico e sua característica de atuação. Finalmente, são apresentadas as causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas, bem como as características da corrente de energização (*inrush*).

1.1 A Proteção Diferencial

Vários métodos de proteção foram desenvolvidos para cada tipo de componente do sistema elétrico. No caso de transformadores de potência, o principal método aprimorado foi o da proteção diferencial, na qual o dispositivo de proteção compara as correntes que entram e saem do equipamento ou sistema protegidos. Durante a operação normal do transformador, suas formas de onda de corrente no primário e secundário são monitoradas. Para a aquisição das correntes do transformador utilizam-se TCs acoplados em série com os ramos primário e secundário do transformador. Desta maneira, as correntes obtidas terão formas de onda semelhantes às das correntes do transformador, excetuando-se a relação de

transformação. Estes sinais são transferidos para o relé, cuja função é desligar o sistema caso a corrente diferencial¹ que o atravessa seja maior que um patamar estipulado.

Em condições normais de funcionamento do transformador, as correntes dos lados primário e secundário serão iguais após a passagem pelos TCs e sua diferença será praticamente nula. Nestes casos, o relé estabelece que não há nenhum problema ocorrendo na região considerada. No caso de uma falta interna ao transformador, haverá um desequilíbrio desses sinais e a diferença entre as correntes primária e secundária torna-se significativa, acionando o relé, o qual será responsável pelo isolamento do transformador do sistema.

A operação diferencial tornou-se o principal meio de proteção para os grandes transformadores de potência e para quase todos os sistemas onde a saída de corrente se encontra relativamente próxima a entrada, como por exemplo a proteção de barras.

No caso da operação da proteção de transformadores, é esperado que o relé atue para os casos de ocorrência de faltas internas ao transformador. Por outro lado, o relé deverá permanecer em bloqueio (funcionamento normal do sistema) nas situações de faltas externas ao transformador, sobre-excitação do mesmo (tensão a níveis muito superiores a nominal) e nos casos de energização, manobra que provoca as correntes de magnetização, que são transitórias, mas de elevada amplitude. Algumas destas situações podem apresentar correntes diferenciais indesejáveis e serão explanadas mais adiante.

1.2 O Relé Diferencial Percentual

Historicamente, a proteção diferencial tem sido constantemente aperfeiçoada. É importante ressaltar o surgimento de vários esquemas dentro dessa filosofia e um exemplo disso é o relé diferencial percentual [1]. Neste tipo de relé, foi introduzido o conceito de bobina de retenção. Esta configuração é aplicada para a proteção de transformadores de potências superiores a 2,5 MVA. Esse mecanismo faz com que o

¹Diferença entre as correntes primária e secundária que percorre o relé.

relé não seja sensibilizado por pequenas correntes diferenciais e tem então suas bobinas de retenção percorridas por uma média das correntes passantes.

O esquema de proteção diferencial percentual, conforme [1] é ilustrado na FIGURA 1.

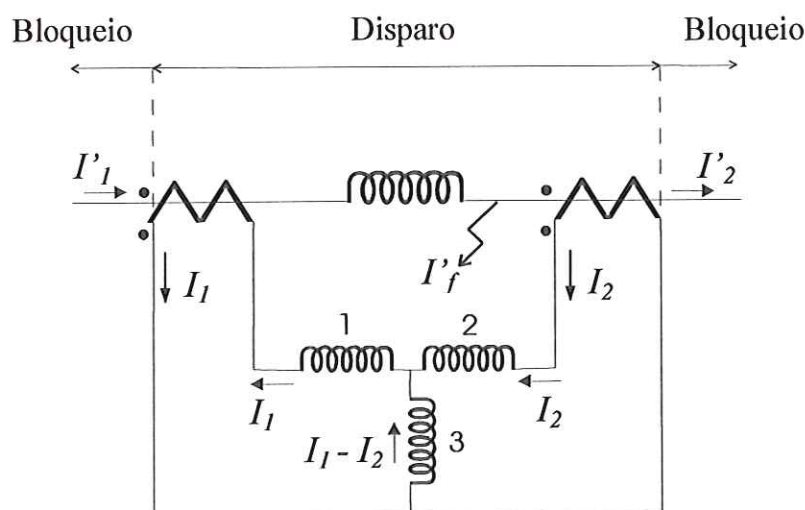


FIGURA 1 - Proteção diferencial percentual do transformador

As bobinas de retenção são aquelas indicadas pelos números 1 e 2. O valor médio da corrente nas bobinas de retenção é dado pelo valor $(I_1 + I_2)/2$, isto é, a média entre as correntes I_1 e I_2 . A corrente na bobina de operação do relé (3) é igual a diferença entre as correntes dos lados primário e secundário, ou seja, $I_1 - I_2$.

Para o caso de uma falta externa ou situação de carga, quando $I_1 = I_2$, tem-se que a corrente na bobina de retenção é igual a I_1 ou I_2 . Ainda sob estas condições, a corrente na bobina de operação é igual a zero. Estas são condições de retenção para o relé.

No caso de uma falta interna, a corrente I_2 é negativa. A corrente na bobina de retenção teria assim o valor $(I_1 + (-I_2))/2$, significando retenção fraca. Analogamente, a corrente na bobina de operação seria dada por $I_1 - (-I_2)$, significando operação fortalecida. Estas são, portanto, condições de operação para o relé.

1.3 Conexões dos TCs para a Proteção Diferencial do Transformador Trifásico e sua Característica de Atuação

Como visto anteriormente, os transformadores de corrente (TCs) são equipamentos fundamentais no esquema de proteção diferencial de transformadores de potência. Há uma forte preocupação nos projetos e ajustes destes dispositivos a fim de que o sistema de proteção funcione precisamente. Porém, deve-se citar uma característica presente em qualquer sistema constituído de um transformador trifásico ligado em conexão do tipo estrela-triângulo ou triângulo-estrela. Sabe-se que em ligações desse tipo, há o surgimento de uma defasagem angular de 30 graus entre as correntes dos lados primário e secundário do transformador [2]. Para corrigir esta defasagem angular, é usado na prática um artifício que consiste em instalar os equipamentos transformadores de corrente conectados de maneira inversa às ligações dos lados do transformador. Desta forma, para um transformador ligado em estrela-triângulo, por exemplo, usam-se TCs conectados em triângulo-estrela. Isso pode ser ilustrado na FIGURA 2 seguinte, conforme [2]:

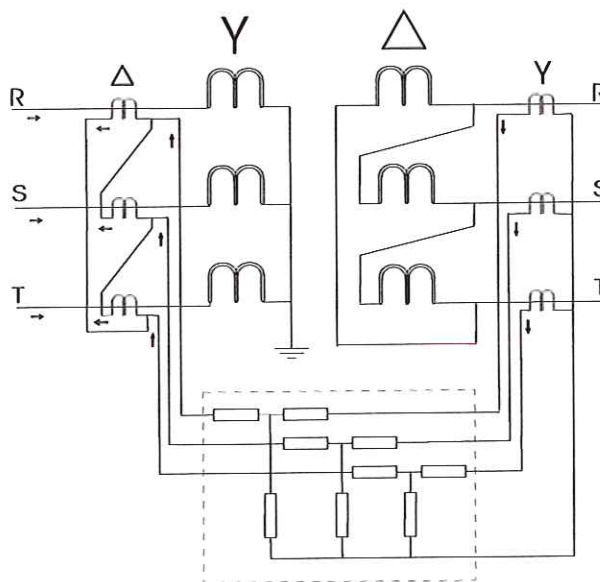


FIGURA 2 - Diagrama de conexões do transformador e TCs

Alguns fabricantes recomendam o uso de um transformador de corrente auxiliar para a realização desta compensação de fase, localizado antes da entrada das correntes no relé, ao invés da inversão de conexões citadas [3].

Considerando-se agora os relés digitais, cabe citar mais uma vantagem dos mesmos em relação aos relés eletrônicos convencionais. Estes dispositivos possuem uma compensação interna de deslocamento de fases que, realizado pelo próprio *software*, evita os problemas colocados anteriormente.

Uma propriedade igualmente importante dos relés digitais é a característica de atuação da proteção diferencial, curva na qual é feito o ajuste de restrição percentual. Esta curva do relé é mostrada na FIGURA 3 [3].

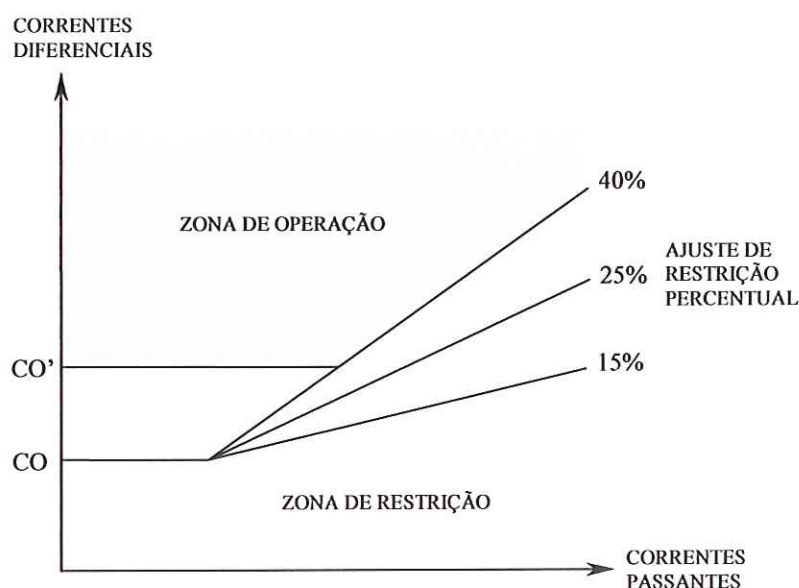


FIGURA 3 - Característica de atuação da proteção diferencial

A inclinação da curva, ou seja, o ajuste percentual de atuação do relé é utilizado para determinar o nível de corrente no qual o relé irá atuar. O dispositivo desligará o sistema sempre que a corrente que o percorrer for superior a sua corrente diferencial multiplicada por um fator representado pelas percentagens mostradas na figura. Estas percentagens ou inclinações são definidas por fatores como relação de transformação, erros dos TCs e mudanças nos *taps* do transformador. Quanto menor for este ajuste, maior será a sensibilidade do relé.

Com relação aos patamares CO e CO' , sempre que o algoritmo do relé detecta uma situação de tolerância, como uma sobre-excitação, este patamar é deslocado e a curva do relé é então alterada e a sua zona de operação (atuação) se torna mais

restrita. O patamar CO (*pick-up* de margem) determina a sensibilidade da proteção em baixos valores de corrente.

1.4 Surgimento de Correntes Diferenciais Indesejadas

Nas situações reais encontradas em campo, existem vários fatores que levam ao aparecimento de correntes diferenciais anormais e diferentes daquelas de defeito.

Podemos citar, entre outros:

- Corrente de magnetização (*inrush*);
- Saturação dos TCs devido às altas correntes que os percorrem;
- Remoção de faltas próximas ao transformador;
- Sobre-excitação do transformador;
- Rejeição de cargas;
- Energização de bancos de capacitores;
- Ajuste incorreto das relações de transformação dos TCs;
- Mudanças de *tap* do transformador e erros próprios dos TCs.

A seguir, são comentados alguns tipos de fenômenos e manobras mencionadas que podem provocar o aparecimento de correntes diferenciais significativas, a ponto de sensibilizar a proteção diferencial e originar uma operação incorreta do sistema de proteção por não se constituírem situações de falta interna ao transformador.

1.4.1 As Correntes de Magnetização

Como citado anteriormente, a corrente de magnetização é uma corrente transitória que provoca um desequilíbrio no relé no momento da energização, pois o sinal produzido no enrolamento energizado do transformador não tem equivalente no lado oposto, aparecendo, portanto, como um desequilíbrio que a característica diferencial não consegue distinguir de uma falta interna.

O valor de pico da corrente de magnetização depende, fundamentalmente, do ponto do ciclo da tensão onde ocorre a energização, dos parâmetros de sistema e

também das condições magnéticas do núcleo, que são a intensidade e a polaridade do fluxo residual contido no transformador.

Aplicando-se tensão senoidal ao enrolamento primário, conforme [4], teremos:

$$v_1 = r_1 \cdot i_0 + l_1 \cdot \frac{di_0}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

onde:

$r_1 \cdot i_0$ = queda de tensão na resistência do primário

$l_1 \cdot \frac{di_0}{dt}$ = queda de tensão devido ao fluxo de dispersão do enrolamento primário

$N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ = força eletro-motriz induzida no primário

A não-linearidade entre a corrente a vazio i_0 e o fluxo ϕ causa o que conhecemos por histerese e a equação (1) é resolvida em duas partes para i_0 :

- Solução complementar (termo transitório)
- Solução particular (regime permanente)

O termo transitório da solução representa exatamente a corrente de magnetização, detectada pela primeira vez por Fleming em 1892 [3]. Este termo representa um sinal de valor crítico, que provoca queda na tensão alimentadora e uma provável atuação de relés instantâneos.

Desprezando-se os dois primeiros termos da equação (1) temos:

$$v_1 = V_{1m} \cdot \text{sen}(wt + \beta) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

onde:

V_{1m} = tensão no instante de energização $t=0$

β = ângulo que define este valor de tensão

Integrando-se a equação (2), tem-se:

$$\phi = \phi_0 + \phi_m \cdot \cos(\beta) - \phi_m \cdot \cos(\omega t + \beta) \quad (3)$$

onde:

ϕ_0 = fluxo residual no instante $t=0$

ϕ_m = fluxo na energização

Em casos reais, o termo $\phi_0 + \phi_m \cdot \cos(\beta)$ sofre amortecimento e apenas o termo $\phi_m \cdot \cos(\omega t + \beta)$ representa o fluxo do núcleo.

O valor ϕ_{pico} é muito elevado e conseqüentemente a corrente i_0 necessária para produzi-lo torna-se muito alta na energização. Sabemos, portanto, que o problema principal enfrentado pelo relé é exatamente a diferenciação entre as correntes mostradas e as de condições faltosas.

Mostraremos a seguir a forma de onda típica deste instante de energização.

A FIGURA 4 traz a exata idéia do nível de corrente de magnetização, comparando-a com a corrente de regime permanente, ainda que ela tenha ocorrido no instante zero da tensão, onde:

i_r = corrente de inrush

i_n = corrente normal de regime permanente

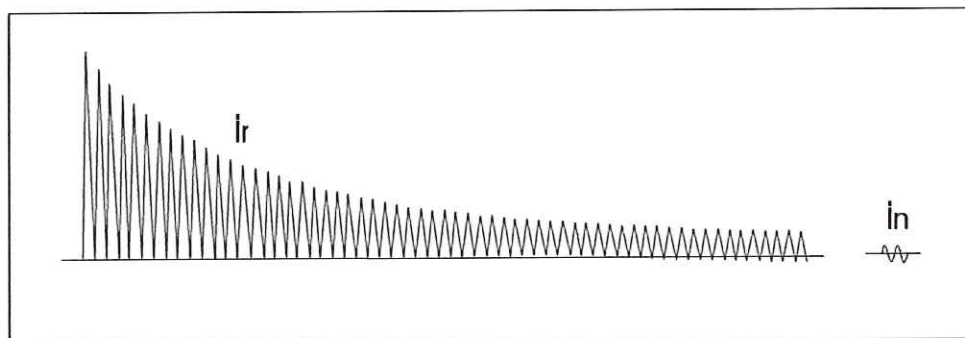


FIGURA 4 - Amplitudes das correntes de *inrush* e nominal

Um dos métodos utilizados para fazer a distinção entre as correntes de magnetização e de falta é baseado na restrição por harmônicos. Neste método, as correntes em questão diferem no conteúdo de suas componentes de 2º harmônico, que é baixo no caso da corrente de falta interna ao transformador e muito mais elevado no caso das correntes de magnetização, alcançando tipicamente valores acima de 16% da componente de frequência fundamental, atingindo até 70% do mesmo [5][6]. Assim, as formas de onda da corrente diferencial são analisadas pelo seu conteúdo de segundo harmônico e sua magnitude em relação a fundamental é utilizada para restringir o disparo do relé nas situações de magnetização [2]. Porém, o método citado encontra limitações, conforme colocado anteriormente, com respeito à distinção dos sinais em certas situações e ao tempo hábil para fazê-lo.

De acordo com o que foi colocado, é apresentada a seguir a TABELA 1, fornecida pela INEPAR, mostrando o conteúdo harmônico das correntes de energização [3]. Ela confirma a forte presença de componentes de 2º harmônico nas correntes de magnetização, característica amplamente utilizada nos sistemas de proteção usuais para a distinção entre essa situação e a situação de falta interna ao transformador, como descrito anteriormente.

TABELA 1 - Conteúdo harmônico das correntes de energização

| Componentes | TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS | | | |
|----------------|----------------------------|-----------------|--|--|
| | 66kV 12MVA | 275kV 150MVA | 275kV , 50MVA 2 bancos em paralelo | 500kV , 1000MVA 2 bancos em paralelo |
| | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Fundamental | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Corr. Contínua | 62 | 100 | 100 | 97,1 |
| 2ª | 60 | 30,4 | 33,1 | 78 |
| 3ª | 9,4 | 9,6 | 18,2 | 31 |
| 4ª | 5,4 | 1,6 | 6,5 | 18 |
| 5ª | | 0,7 | 7,2 | 11,4 |

A extração de componentes de frequência é geralmente realizada pelo método da Transformada de Fourier, recurso matemático eficiente mas que não evita que o relé confunda eventualmente as situações descritas, além de esbarrar no fato de que o

dispositivo convencional muitas vezes leva um tempo excessivo (além de um ciclo) para a obtenção da resposta, condição esta que se pretende melhorar com o método proposto.

Existe também a possibilidade da presença de componentes de 2º harmônico em situações de falta interna ao transformador, devido basicamente aos seguintes fatores: saturação dos transformadores de corrente no caso de uma falta interna severa, existência de capacitâncias paralelas para ajuste de fator de potência na linha de transmissão e capacitâncias distribuídas em longas linhas de alta tensão.

1.4.2 A Saturação dos Transformadores de Corrente

Um dos grandes problemas enfrentados pelos projetistas de sistemas de potência reside em situações nas quais os equipamentos elétricos ficam sujeitos à saturação de alguns de seus componentes.

No caso específico da proteção elétrica de transformadores de potência, os instrumentos transformadores de corrente (TCs) constituem os equipamentos que ficam expostos a esse fenômeno.

A função dos transformadores de corrente, também conhecidos como transdutores, é transformar as correntes oriundas do sistema de potência em correntes de baixa magnitude e fornecer isolamento galvânica entre a rede elétrica e os relés ou outros instrumentos conectados ao seu enrolamento secundário.

Os ajustes dos enrolamentos secundários dos TCs são padronizados e um certo grau de intercâmbio entre os fabricantes de relés e medidores pode ser obtido. Em muitos países os enrolamentos secundários dos TCs são ajustados para 5 A, enquanto que na Europa um segundo padrão de ajuste de 1 A é também utilizado. Estes são valores nominais e os transdutores devem ser projetados para tolerar valores maiores oriundos de condições anormais de operação do sistema.

Portanto, os TCs são concebidos para suportar correntes de falta e outros surtos por poucos segundos. Tais sinais podem atingir valores de até 50 vezes a magnitude da corrente de carga [7].

Os transformadores de corrente, que são magneticamente acoplados e com multi-enrolamentos, podem ser dispositivos isolados ou estar embutidos nas ramificações de alguns equipamentos de potência, como circuito de disjuntores ou

transformadores com massa aterrada. Dispositivos transdutores mais recentes utilizam tecnologia eletrônica e componentes de fibra ótica.

As correntes fornecidas pelo lado secundário dos transdutores devem ser reproduções fiéis das correspondentes correntes do lado primário. Embora os dispositivos modernos atendam a essa condição satisfatoriamente, na maior parte dos casos o projeto de proteção necessita levar em consideração o correto ajuste dos transdutores, bem como os erros de transformação eventualmente introduzidos pelos TCs, de forma que o desempenho dos relés na presença destes erros possa ser avaliado.

O desempenho dos transdutores sob corrente de carga não é tão preocupante quanto a situação em que o relé deve operar. Quando faltas ocorrem, além dos valores de corrente atingirem níveis elevados, os sinais podem conter substanciais conteúdos de componentes DC e, ainda, pode existir fluxo remanescente no núcleo do TC. Todos esses fatores podem levar à saturação do núcleo do transformador de corrente e produzir significativa distorção na forma de onda de corrente secundária do dispositivo [7].

Portanto, a corrente secundária de um TC pode não representar precisamente sua corrente primária se o dispositivo saturar. Assim, os relés que dependem desta corrente podem facilmente operar de forma incorreta durante este período, comprometendo a eficiência da proteção do equipamento em questão.

A possibilidade de saturação dos TCs deve ser, portanto, criteriosamente considerada no projeto de um sistema de proteção.

No intuito de ilustrar o problema de conteúdo harmônico presente nos casos nos quais ocorre o fenômeno de saturação dos TCs, realizou-se a decomposição harmônica de alguns sinais envolvidos no trabalho. A FIGURA 5 e a FIGURA 6 ilustram as decomposições harmônicas dos sinais diferenciais em situações de energização do transformador. A FIGURA 5 resulta da análise de Fourier de um sinal de energização sem a presença de saturação dos TCs. Nota-se a correta representação do conteúdo harmônico produzido, traduzida pela forte presença de 2º harmônico, componente sabidamente presente nesse tipo de situação. Por outro lado, na FIGURA 6, pode-se observar a decomposição harmônica de um caso de energização do transformador quando ocorre o fenômeno de saturação dos TCs.

Neste caso, a componente harmônica predominante na análise do sinal deixa de ser a 2^o harmônica e passa a ser as componentes fundamental e de terceira harmônica, situação na qual fica descaracterizada a lógica de atuação do algoritmo convencional do relé diferencial para transformadores de potência, descrita no item 1.2 do trabalho.

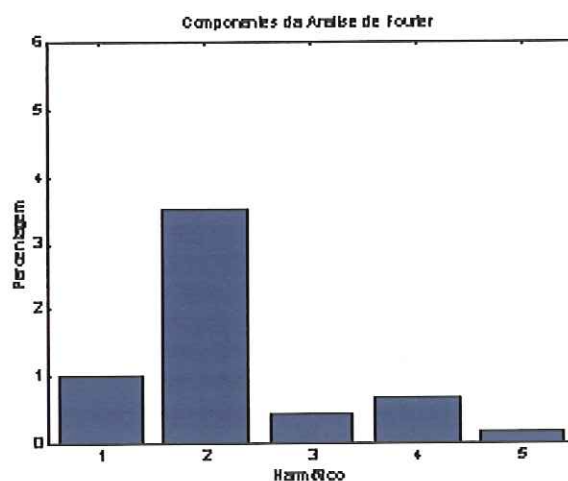


FIGURA 5 – Decomposição harmônica de sinal diferencial de energização do transformador sem a presença de saturação dos TCs

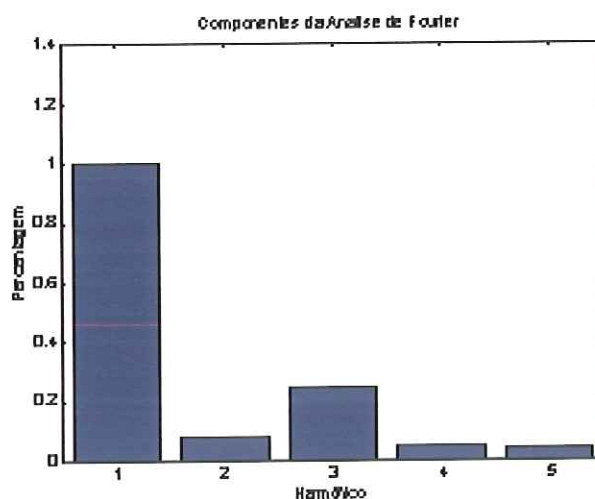


FIGURA 6 – Decomposição harmônica de sinal diferencial de energização do transformador com a presença de saturação dos TCs

Analogamente ao ilustrado nas figuras anteriores, a seguir são mostrados na FIGURA 7 e na FIGURA 8 os conteúdos harmônicos relativos às decomposições de sinais diferenciais de situações de faltas internas ao transformador de potência. Os

conteúdos harmônicos correspondentes aos casos de falta interna são conhecidamente compostos principalmente pelas componentes fundamental e de terceira harmônica. A FIGURA 7 traduz essa composição. Neste caso, o sinal foi obtido através da simulação de um caso de falta interna de espira a terra na ausência do fenômeno de saturação. Tal fidelidade na análise harmônica do sinal não acontece na situação mostrada na FIGURA 8. O gráfico, nesse caso, representa a decomposição harmônica de um sinal de falta interna ao equipamento, de espira a terra, na presença de saturação dos transformadores de corrente. Nota-se, então, uma incompatibilidade na composição harmônica, com predominância das componentes fundamental e de 2ª harmônica, condição essa novamente inconsistente com a lógica diferencial do algoritmo de proteção de transformadores de potência descrita anteriormente.

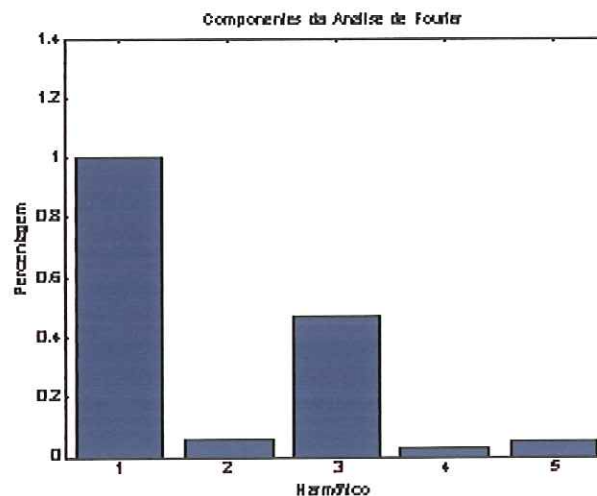


FIGURA 7 – Decomposição harmônica de sinal diferencial de falta interna ao transformador sem a presença de saturação dos TCs

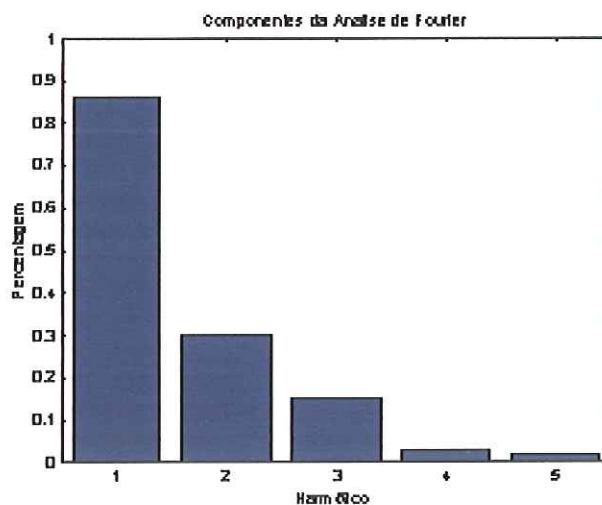


FIGURA 8 – Decomposição harmônica de sinal diferencial de falta interna ao transformador com a presença de saturação dos TCs

As análises harmônicas mostradas nas figuras anteriores indicam a possibilidade de operação errônea do relé diferencial convencional do transformador de potência.

A seguir, são apresentadas algumas situações simuladas, nas quais estão presentes as saturações dos TCs e comparadas aos casos correspondentes nos quais o fenômeno não está presente (TC ideal).

A FIGURA 9 e a FIGURA 10 seguintes representam sinais simulados de corrente diferencial de casos de energização, sem e com a presença da saturação dos TCs, respectivamente.

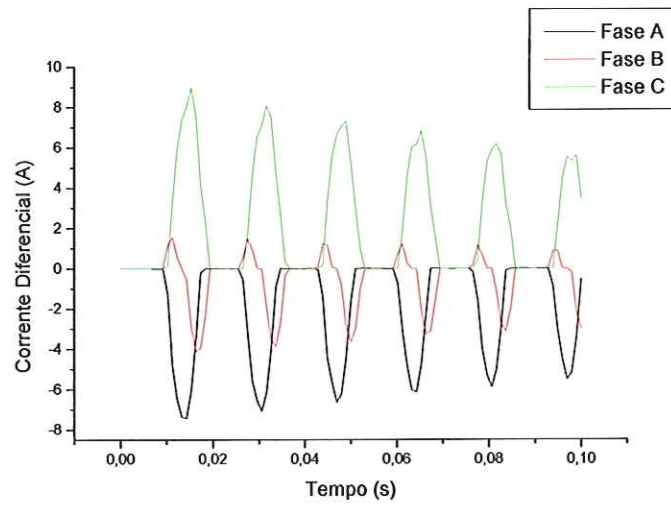


FIGURA 9 - Caso de energização sem a presença de saturação dos TCs

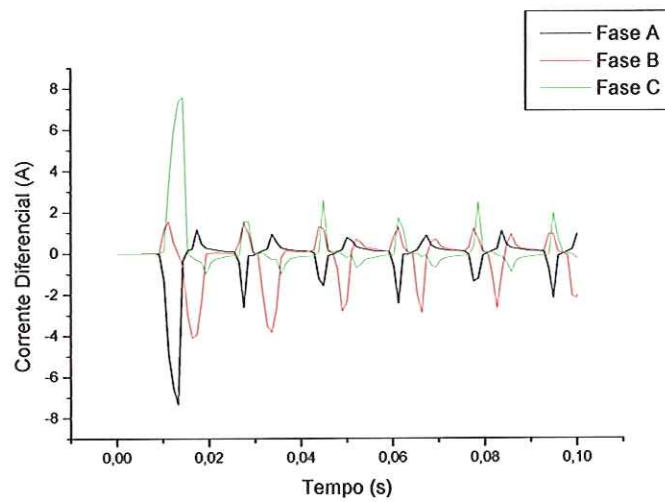


FIGURA 10 - Caso de energização com a presença de saturação dos TCs

A FIGURA 11 e FIGURA 12 representam sinais de corrente diferencial de casos de falta interna de espira a terra em 10% do enrolamento, sem e com a presença da saturação dos TCs respectivamente.

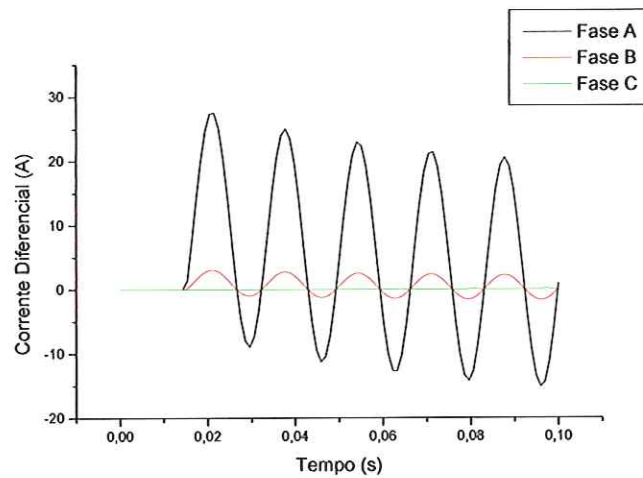


FIGURA 11 - Caso de falta interna em 10% do enrolamento sem a presença de saturação dos TCs

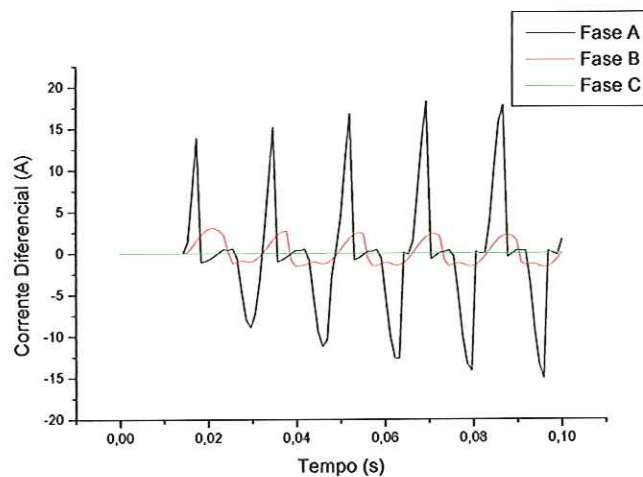


FIGURA 12 - Caso de falta interna em 10% do enrolamento com a presença de saturação dos TCs

A FIGURA 13 e FIGURA 14 ilustram sinais de corrente diferencial de casos de faltas externas trifásicas, sem e com a presença da saturação dos TCs, respectivamente.

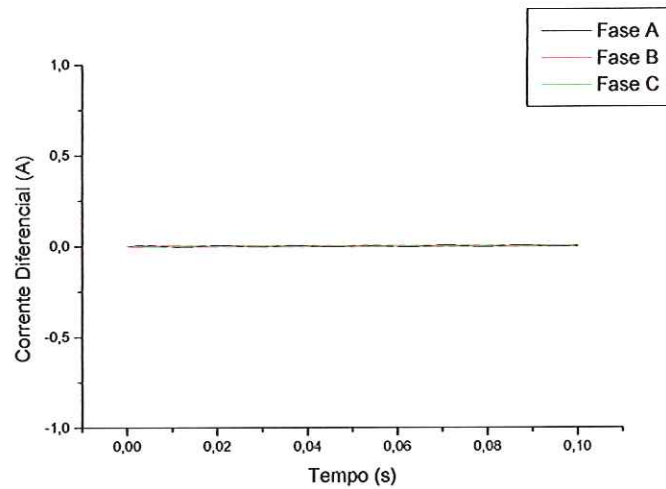


FIGURA 13 - Caso de falta externa trifásica sem a presença de saturação dos TCs

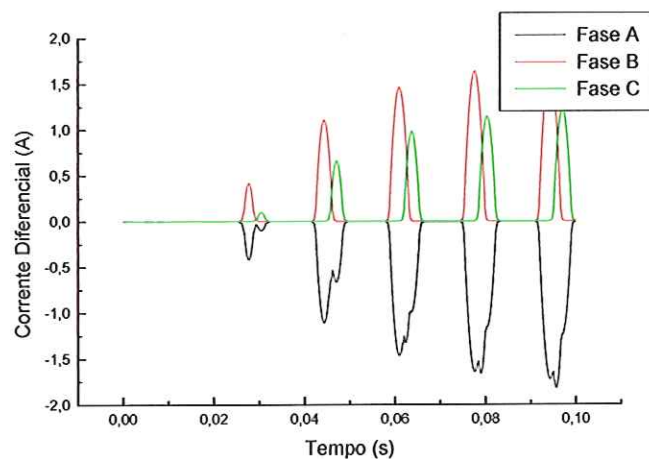


FIGURA 14 - Caso de falta externa trifásica com a presença de saturação dos TCs

1.4.3 Demais Casos de Sinais Indesejados

Faltas externas próximas ao transformador

Em certos casos de faltas externas, as correntes possuem valores muito elevados e podem saturar o TC em um dos lados do transformador. Isto faz surgir uma corrente diferencial considerável que será detectada pelo dispositivo de proteção, causando uma provável atuação incorreta [8] [9].

Remoção de faltas próximas ao transformador

Assim que uma falta externa próxima ao transformador é removida, há o surgimento de uma situação similar àquela que ocorre durante a energização do transformador, porém de menor amplitude.

Como a tensão aplicada aos enrolamentos do transformador passa de um valor pré-falta para um valor pós-falta, o fluxo concatenado comporta-se do mesmo modo e, dependendo do instante no qual a falta é removida, esta transição produz uma componente CC no fluxo concatenado. Desta forma, as ondas de corrente primária serão semelhantes às ondas de corrente de magnetização obtidas durante a energização do transformador [9][10].

Sobre-excitação do transformador

A condição de sobre-excitação acontece quando o transformador está submetido a um valor de tensão muito superior a sua tensão nominal. Nestas situações, há um comportamento não-linear das correntes ante a variação de fluxo.

Como consequência, ocorrem distorções de 3º e 5º harmônicos, gerando assim um aumento nos valores de magnetização e também um aumento na corrente diferencial que percorre o relé. Para os transformadores mais novos, a situação é ainda mais grave, porque existe a ocorrência de maiores distorções devido ao material constituinte do núcleo [3][11]. O monitoramento nesse caso é feito então em relação aos componentes de 5º harmônico das correntes diferenciais. Se estes valores de 5º harmônico excederem um limite pré-estabelecido, o relé passa a considerar uma nova curva CO' de acordo com a FIGURA 3, mostrada anteriormente. Assim, haverá um aumento na tolerância do dispositivo de proteção, como mencionado.

1.5 Proposta do Trabalho



Este trabalho apresenta uma proposta de melhoramento para a proteção digital diferencial de transformadores de potência, usando ferramentas inteligentes para a

diferenciação entre as situações de energização, falta interna e outras descritas anteriormente, a partir do reconhecimento de formas de onda. O esquema completo de proteção de transformador proposto envolve a proteção diferencial convencional acrescida de dispositivo baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs), em substituição ao método de filtragem harmônica existente. Tal metodologia visa a discriminação das correntes citadas com eficiência e em um tempo satisfatório, se comparado aos métodos convencionais mencionados. O trabalho ainda implementa alternativas como a reconstrução de sinais distorcidos pela saturação dos transformadores de corrente, na elaboração de um algoritmo completo de proteção de transformadores de potência. As Redes Neurais Artificiais, devido à sua facilidade de implementação, robustez, tolerância a falhas, rapidez e capacidade de generalização, vêm sendo amplamente empregadas não somente na área de engenharia, como também em muitos outros setores.

No segundo capítulo é mostrada a revisão bibliográfica, na qual se comenta o conteúdo das principais publicações consultadas na elaboração deste trabalho.

O terceiro capítulo envolve as Redes Neurais Artificiais, constituindo-se de histórico, modelo da rede neural e o modo de operação da mesma, onde são explicados os processos de determinação do erro, funções de ativação e transferência, métodos de treinamento e arquiteturas da rede.

A simulação computacional do sistema elétrico considerado e a geração dos arquivos de dados são mostradas no capítulo 4. Dentro do conteúdo relativo às simulações, estão um histórico do programa ATP - *Alternative Transients Program* -, o sistema elétrico estudado, os modelos dos transformadores de potência simulados, cálculos e arquivos de dados.

No capítulo 5, são apresentados os algoritmos de proteção diferencial com a lógica convencional do relé, bem como os algoritmos propostos, com o auxílio das ferramentas de inteligência artificial. Destacam-se as duas vertentes estudadas com a utilização de Redes Neurais Artificiais: a primeira emprega o algoritmo que utiliza dados com e sem saturação no reconhecimento de padrões. A segunda, envolve o módulo de reconstrução de sinais por RNAs, no qual os dados são reconstruídos em uma primeira etapa, para depois serem inseridos no módulo de reconhecimento de padrões.

O sexto capítulo contém a aplicação do reconhecimento de padrões por Redes Neurais Artificiais na proteção de transformadores, dentro dos objetivos propostos anteriormente e a obtenção dos resultados, dentro das abordagens consideradas. São apresentados os modelos das melhores configurações de redes neurais conseguidas e tabelas atestando a eficiência dos métodos implementados. Ainda neste capítulo, é implementado o algoritmo que envolve a compensação do efeito de saturação dos TCs aliado ao reconhecimento de padrões para a proteção de transformadores de potência.

No capítulo 7 é realizado um estudo comparativo das abordagens propostas. São mostrados os resultados obtidos pelo algoritmo que utiliza o reconhecimento de padrões, a ferramenta que envolve a reconstrução de sinais como uma etapa adicional ao algoritmo anterior e o desempenho do algoritmo convencional completo de proteção diferencial percentual para fins comparativos. As três ferramentas implementadas são testadas com dados provenientes do transformador de 25 MVA utilizado nos estudos, além de dados gerados pela simulação de um transformador de 6,5 MVA não utilizado anteriormente no trabalho, a fim de melhor validar os métodos propostos, descrevendo suas vantagens e desvantagens.

O oitavo capítulo mostra as conclusões sobre o trabalho, apresentando observações gerais sobre a metodologia aplicada, as principais contribuições do trabalho e sugestões para estudos futuros.

No nono capítulo são mostradas as publicações referentes aos estudos realizados.

O décimo capítulo traz as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

Nos apêndices são mostrados alguns arquivos que melhor ilustram as implementações realizadas.

2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Um grande número de publicações em revistas especializadas, anais de conferências e teses indica o relevante progresso dos trabalhos na área de proteção digital diferencial de transformadores de potência, envolvendo basicamente a proteção do transformador em si e os mecanismos de prevenção contra problemas nos dispositivos do sistema, como os transformadores de corrente. Outro aspecto importante abordado por estes trabalhos refere-se à análise de ferramentas para o melhoramento do sistema de proteção, como a aplicação de Redes Neurais Artificiais em certas funções auxiliares, fornecendo maior rapidez, confiabilidade e precisão ao conjunto.

São comentados a seguir alguns destes trabalhos de maior destaque, divididos em pesquisas que estudam a proteção de transformadores (inclusive com o auxílio de ferramentas inteligentes), estudos que envolvem a reconstrução de sinais distorcidos e, finalmente, trabalhos que tratam das simulações de faltas em sistemas elétricos.

2.1 Proteção de Transformadores

Com relação ao melhoramento da proteção diferencial de transformadores de potência, destaca-se inicialmente o trabalho de VERMA e BASHA [8] no qual foi utilizado um relé diferencial com restrição de corrente de energização (*inrush*) baseado em microprocessador. Nesse estudo, a operação incorreta do relé nos casos de correntes de magnetização, sobre-excitação e faltas externas é restrita pelas verificações das formas de onda características das correntes diferenciais. Os resultados dos testes indicaram que, sob todas as condições descritas, o dispositivo de proteção respondeu corretamente, verificando-se um melhoramento no princípio da restrição por harmônicos.

Cabe apontar ainda o esquema de proteção baseado em microprocessador estudado por KOLLA e GEDEON [2], que realiza a detecção das componentes fundamental e de 2º harmônico nas correntes diferenciais para a proteção contra faltas internas e restrição durante a magnetização do transformador. Os autores realizam uma revisão dos algoritmos que computam estes componentes dando ênfase às funções *Block Pulse* e englobando filtros de Fourier, Kalman, Aproximação dos

Mínimos Quadrados, Transformada Retangular, Funções Walsh e Haar, Resposta a Impulso Finito, concluindo que a proteção baseada em microprocessador fornece decisões precisas de abertura do disjuntor.

No trabalho de LING e BASAK [11], foi abordado o fato de o conteúdo de 2º harmônico ser afetado por vários parâmetros como o instante de energização, a densidade de fluxo remanescente nesse momento e a resistência e geometria do enrolamento primário. Os autores investigaram o desempenho deste componente da corrente de energização em transformadores monofásicos e trifásicos, utilizando um método computacional que também avalia um novo algoritmo de detecção através de valores de integração em tempo real da corrente de energização. Com isso, conseguiu-se prever o padrão da corrente de magnetização para qualquer combinação de parâmetros de energização. Foi possível também reduzir a amplitude da referida corrente para 62,5%, podendo o novo algoritmo substituir com certa exatidão o circuito do filtro de 2º harmônico empregado no relé diferencial convencional.

RAHMAN e JEYASURYA [12] realizaram uma revisão atualizada dos algoritmos de proteção digital do transformador. O trabalho apresenta um estudo comparativo destes algoritmos, descrevendo a base matemática de cada um e comparando as respectivas velocidades de resposta, esforço computacional e capacidade de distinção entre correntes de magnetização e falta interna ao transformador. Os algoritmos analisados foram: aproximação de Fourier, Transformada Retangular, Funções Walsh, Funções Haar, Resposta a Impulso Finito e Aproximação por Mínimos Quadrados. As simulações foram realizadas com o sinal de restrição, baseado no conteúdo do componente de 2º harmônico combinado das 3 fases das correntes do relé e o sinal de operação, baseado no conteúdo do componente fundamental destas correntes. Todos os referidos algoritmos distinguem as correntes em questão e fornecem a correta decisão de abertura dentro de um ciclo, mas os autores concluem que as ferramentas de Fourier, Transformada Retangular, Resposta a Impulso Finito e Aproximação dos Mínimos Quadrados são mais facilmente implementados num relé diferencial para transformador baseado em microprocessador, sendo que o tempo restante no intervalo de amostragem pode ser usado para outras funções de monitoramento e controle.

Dentro do mesmo tema, MURTY e SMOLINSKI [13] estudaram o projeto e implementação de um relé diferencial digital para um transformador de potência trifásico com base na teoria do filtro de Kalman, onde as condições de magnetização e faltas internas são distinguidas pela relação de magnitudes das correntes diferenciais em relação às componentes fundamental e de 2º harmônico. Estas componentes são bem estimadas por um filtro recursivo de Kalman de 5 estados. O algoritmo foi primeiramente programado em FORTRAN (*off-line*) para o processamento dos dados amostrados, sendo então implementados em um processador digital e testado em tempo real. Os resultados foram comparados aos conhecidos algoritmos de Fourier e Aproximação dos Mínimos Quadrados. Na comparação feita com os mesmos dados de entrada com taxa amostral de 16 amostras por ciclo de senóide, o filtro de Kalman teve um desempenho muito adequado para a restrição da corrente de magnetização e mostrou-se rápido para faltas internas. De forma geral, o filtro em estudo apresentou bons resultados se comparado aos outros algoritmos, podendo ser estendido para a condição de sobre-excitação, sendo que a característica diferencial percentual pode ser facilmente incorporada. Porém, cabe aqui a observação de que a resposta do algoritmo para várias taxas amostrais foi satisfatória para até oito amostras/ciclo, mas em taxas maiores que 16 amostras/ciclo não forneceu nenhuma melhora no desempenho.

LIU et al. [14] descreveram em seu artigo três esquemas para aprimorar a proteção diferencial do transformador na situação de faltas internas com relação ao método de restrição de 2º harmônico existente. Baseado no fato de que esta componente para uma falta interna ao transformador é menor e atenua mais rapidamente que na situação de magnetização, o método pode ser melhorado com modificações. Dentre os esquemas analisados os autores dão ênfase àquele no qual uma tensão de fase é usada como um sinal de controle, onde o relé cancelaria a restrição de 2º harmônico, se alguma das três tensões de fase fosse menor que 70% da tensão estimada, evitando a operação atrasada do relé e podendo reduzir a magnitude desta restrição para 7,5% ou menos. Um algoritmo com janela de dados curta e filtro digital, rejeitando 2º e 3º harmônicos, é usado para o cálculo da tensão. Com esta lógica, o esquema proposto opera rapidamente para faltas severas com ou sem energização do transformador.

HIZAGI e BASAK [15] analisaram um método integral para detecção de faltas em transformadores de potência, no qual são considerados os efeitos de vários fatores nas formas de onda dos transitórios e são simuladas digitalmente condições de previsão para situações de energização e de falta. É analisada a ação de restrição de 2º harmônico por filtragem digital para a distinção entre correntes de magnetização e de faltas internas, levando em consideração que o componente de 2º harmônico deve alcançar sua maior amplitude nos ciclos iniciais e não necessariamente no primeiro ciclo. Concluem os autores que a integração da onda de corrente e a determinação do valor da área acumulada sob cada ciclo da corrente diferencial podem ser usadas para fornecer uma proteção contínua durante faltas internas e melhorar a estabilidade quando da energização do transformador.

Nesta mesma linha, um sistema de proteção digital integrado também foi proposto por GRCAR e DOLINAR [16], apresentando *hardware* e *software* para todos os tipos de falta para terra e entre espiras do transformador. A proteção é baseada na característica diferencial percentual para redução de sensibilidade em faltas externas. O algoritmo inclui um relé diferencial percentual com restrição de harmônicos, um relé de sobrecorrente para faltas internas e um relé para faltas à terra de alta impedância. São mostrados os resultados de laboratório em tempo real e testes de campo, incluindo a comparação entre a proteção estática padrão e a digital proposta em relação à velocidade e precisão. O desempenho do sistema apresentado foi superior ao dos relés estáticos existentes.

Uma nova técnica para detecção da corrente de magnetização em transformadores foi proposta por BO et al. [17], através da detecção de componentes de alta frequência no sinal transitório de magnetização. Um filtro colocado junto aos TCs capta os sinais e fornece as energias espectrais dos mesmos. O sinal de restrição é obtido pela relação entre a energia espectral e a corrente fundamental. Assim, uma comparação entre o nível do sinal de restrição e um patamar predefinido determina se existe corrente de magnetização no processo. Estudos mostraram que o método é apto a discriminar entre uma situação de energização e uma situação de falta interna ao transformador, devido ao filtro fornecer saídas diferentes para as formas de onda envolvidas.

CRISS e LAWHEAD [18] realizaram um estudo sobre a utilização das características da corrente de operação (I_{op}) do relé diferencial de transformadores para a medida de condições próximas ao limiar de operação. O autor aconselha um monitoramento da condição operacional do relé, pois um falso sinal de desligamento é geralmente causado por ajustes incorretos ou por conexões incorretas dos TCs secundários em faltas externas ou colocação de carga no transformador. Para se determinar quando o relé encontra-se em uma condição próxima ao limiar de operação, é analisada a corrente de operação (I_{op}), que define a relação entre a corrente desbalanceada e de restrição, fornecendo a inclinação da curva na qual o relé trabalha. Se a característica de operação for maior que a de restrição, o dispositivo opera se I_{op} exceder um patamar mínimo. A grandeza I_{op} percentual torna-se importante se o relé estiver operando abaixo da curva mínima de sua característica. Portanto, como ocasionalmente os relés diferenciais podem apresentar dificuldades nas suas configurações e instalações apropriadas, essa habilidade de verificar sua correta operação fornece a confiança de que o sistema foi bem especificado, podendo prevenir atuações errôneas e conseqüentes danos aos equipamentos.

WISZNIEWSKI e KASZTENNY [19] propuseram um relé diferencial para transformador com multi-critérios baseado na lógica Fuzzy. São utilizados o custo de tomada de decisão errônea e a quantidade de informação corrente como padrões de critério na melhoria da operação de proteção. São explanados 14 critérios para proteção de transformadores de potência. Estes, por sua vez, foram agregados e combinados com dois fatores de suporte, gerando maior confiança na situação de abertura dos disjuntores. Para casos simples, o algoritmo de decisão é reduzido para esquema de lógica booleana. O nível em que a abertura deve ser iniciada, em certos casos de incerteza, pode ser adaptável. O ajuste Fuzzy fornece boa relação entre velocidade e seletividade. Parâmetros desconhecidos da rotina de tomada de decisão podem ser arbitrários no primeiro uso e depois ajustados manualmente ou através de métodos mais formais como Redes Neurais Artificiais. As computações em tempo real envolvidas não requerem grande capacidade de processamento e memória para o relé digital.

Já no ambiente de Redes Neurais Artificiais, MAO et al. [20] apresentam um estudo sobre os transitórios eletromagnéticos do transformador de potência simulado sob condições de energização e faltas internas, propondo uma nova técnica na identificação destes sinais usando Redes Neurais Artificiais. Os sinais capturados por um detector de transitórios são usados em uma rede neural que determina a fonte e a natureza dos sinais com certa precisão.

PEREZ et al. [21] estudam o treinamento de uma estrutura de Redes Neurais Artificiais na discriminação das correntes de magnetização e de faltas internas. Utilizando-se um algoritmo *Backpropagation* com função de transferência sigmoideal para os neurônios, os resultados *off-line* obtidos mostraram que a rede MLP – *Multi Layer Perceptron* - pode ser uma alternativa na discriminação das correntes de magnetização das correntes de falta numa implementação do relé digital, usando como característica o reconhecimento das respectivas formas de onda. Cabe ressaltar que a aplicação prática do método em questão depende da qualidade de generalização da rede, bem como da velocidade do processador empregado na implementação do relé.

BASTARD et al. [22] propuseram também um algoritmo baseado em rede neural para relés diferenciais aplicados a transformadores de potência com o objetivo de detectar faltas entre espiras ou entre espira e terra. O conjunto de treinamento para a entrada da rede com sinais das correntes diferenciais, considerando-se a saturação dos TCs, foi gerado através do *software* EMTP. O algoritmo proposto é mais eficiente que o convencional, principalmente nos casos da saturação sofrida pelos TCs e de faltas internas quando o alto valor de 2º harmônico atrasaria a abertura por um tempo considerável na proteção convencional. Para os testes com entradas distorcidas, simulando-se um transformador real, os resultados foram satisfatórios mesmo com mudança nos parâmetros, embora com uma pequena diferença para as faltas internas menores (aproximadamente 3% do enrolamento). De forma geral, comparando-se os algoritmos proposto e convencional, conclui-se que em situações de falta interna severa o método que inclui a rede neural detecta mais rapidamente o problema, podendo ser então um excelente classificador nesta área. Porém, o método descrito foi testado somente para casos de energização do transformador, faltas internas e faltas externas.

Cabe citar PIHLER et al. [5], que consideram a operação melhorada da proteção de transformadores usando redes neurais. Nesse trabalho, a rede foi aplicada para detecção de correntes de magnetização, como também na reconstrução das correntes secundárias do TC distorcidas pela saturação do mesmo, melhorando a confiabilidade da operação de proteção. Os resultados confirmaram o reconhecimento mais rápido e mais seguro das correntes de magnetização, assim como a reconstrução satisfatória das correntes do TC, não ocorrendo operações indesejadas, nem falha da proteção nos testes efetuados. No método descrito, porém, os testes foram realizados somente com situações de energização e falta interna ao transformador, além de não ter sido testado o algoritmo completo do relé diferencial.

KOLLA [6] elaborou uma aplicação de Redes Neurais Artificiais na identificação de condições de magnetização e faltas internas ao transformador de potência. Uma rede neural *feedforward* de várias camadas foi utilizada e treinada com o algoritmo *Backpropagation*, fornecendo bons resultados em testes realizados com dados simulados em computador.

São igualmente importantes as contribuições de NAGPAL et al. [23], que desenvolveram um novo método de utilização de uma Rede Neural Artificial *feedforward* com algoritmo *Backpropagation* na identificação de correntes de magnetização. O método baseia-se no fato de que esta corrente possui altos valores de componentes harmônicos. Antes de serem injetados na rede neural, os dados foram pré-processados (filtrados) com a finalidade de facilitar o treinamento. Testes foram efetuados com dados provenientes de um transformador real e indicaram que a rede neural pode ser uma alternativa viável à proteção convencional através de ajustes de restrição de harmônicos. Porém, o trabalho envolveu somente um modelo monofásico do transformador.

BERTRAND et al. [24] utilizaram técnicas de Redes Neurais Artificiais para simplificar o projeto e a operação da proteção diferencial de transformadores apoiados no fato de que os fabricantes necessitam, nos métodos convencionais, assumir um forte compromisso com o ajuste entre a estabilidade do dispositivo (nos casos de magnetização) e sua sensibilidade (em faltas internas ao transformador). O trabalho procura simplificar o princípio de proteção diferencial para melhorar sua robustez e facilitar sua implementação, porque o correto desempenho do método

convencional requer uma complexa combinação de funções complementares e um ajuste meticuloso. O algoritmo proposto consiste de uma Rede Neural Artificial treinada e operando em paralelo com a proteção diferencial de restrição percentual. A RNA detectou a condição de falta interna com saturação dos TCs, contendo alto conteúdo de 2º harmônico. Para a energização, a rede neural ficou estável sem enviar sinal de atuação ao relé. O método forneceu maior robustez à proteção, requisitando pequeno ajuste e permitindo uma maior facilidade na instalação e operação do sistema. Somente casos de energização e falta interna foram avaliados.

SIDHU et al. [25] descrevem uma técnica digital para a proteção de transformadores de potência. A técnica usa modelos de seqüência positiva e negativa do sistema de potência em um algoritmo de detecção de faltas. Enquanto correntes e tensões de fase nos terminais do transformador são usadas para detectar a falta, nenhuma informação a respeito dos parâmetros do transformador e do sistema de potência é requerida. O desempenho da técnica proposta foi estudado para uma variedade de condições operacionais usando dados gerados por simulações no EMTP. O impacto do erro de relação e da saturação dos TCs no desempenho da técnica foi também examinado. Os resultados indicaram que o método proposto é estável durante estas condições. Entretanto, o método foi testado somente para situações de energização, faltas internas e faltas externas ao transformador.

ZOCHOLL [26] trata dos algoritmos usados em um relé micro-processado baseados em um conjunto de equações que compreendem um modelo matemático do relé. Este modelo processa as entradas de corrente e/ou tensão amostradas ao relé. Quando executado como um programa no MATLAB, o modelo pode processar as amostras de sinal de uma simulação ou as amostras gravadas em um registrador de eventos para obter a resposta interna do relé. Conseqüentemente, o modelo melhora o projeto e o poder de diagnóstico em aplicações críticas. O artigo mostra como um modelo de relé diferencial de transformador é usado com simulações para se determinar qual o grau de saturação do TC que pode ser tolerado. O modelo é então empregado com as amostras não-filtradas obtidas em campo para determinar os ajustes necessários à proteção.

MAO et al. [27] apresentam uma nova técnica para a precisa discriminação entre uma falta interna e uma situação de energização em transformadores de

potência, combinando transformadas Wavelet com RNAs. As energias espectrais das componentes de Wavelet são calculadas e então empregadas para treinar uma RNA a fim de discriminar uma falta interna de uma corrente de magnetização. Os resultados apresentados mostram que a técnica proposta pode discriminar as situações discutidas. As simulações realizadas envolveram dois tipos de transformadores de potência. O primeiro transformador, de 750 MVA e 27/420 KV foi utilizado para treinar e testar as ferramentas empregadas. O segundo transformador, de 35 MVA e 11/132 KV foi utilizado para testar o método em questão, sendo que os dados correspondentes a esse transformador não foram utilizados na fase de treinamento das redes neurais. O banco de dados elaborado para o trabalho envolveu diferentes tipos e posições de faltas, diferentes ângulos de incidência das mesmas, várias situações de fluxos remanescentes no núcleo do transformador (que acentuam a saturação dos TCs em níveis 65% maiores que o normal), situações de saturação dos TCs e casos de energização. As entradas das redes neurais MLP com método *Backpropagation* utilizadas possuíram janelas móveis de meio ciclo, movimentando-se por um quarto de ciclo. O método proposto foi testado somente com casos de energização, faltas internas e faltas externas ao transformador.

2.2 Reconstrução de Sinais Distorcidos

YU et al. [28][29] e CUMMINS et al. [30] apresentaram o uso de RNAs para corrigir distorções na forma de onda secundária do TC. A rede neural é treinada para obter a função de transferência inversa dos TCs toroidais com núcleos de ferro, os quais são amplamente utilizados nos sistemas de proteção. A RNA fornece uma boa estimativa da corrente primária verdadeira para um transformador saturado. A rede neural foi desenvolvida com o programa MATLAB e treinada usando simulações efetuadas no simulador EMTP juntamente com dados gerados de TCs reais. Para manipular grandes quantidades de correntes de falta, usou-se uma técnica com dois conjuntos de coeficientes de rede neural, os quais lidam com diferentes variações de corrente. O algoritmo da RNA em questão foi implementado em um processador digital de sinais ADSP-2101. A velocidade e precisão fornecidas mostraram-se

satisfatórias para aplicações em tempo real. Ressalta-se que, no método proposto em [29], realizou-se somente a correção da saturação por RNAs, sendo que o algoritmo diferencial completo do relé não foi testado. Em [28] e [30], os métodos foram avaliados somente com dados de faltas que continham o fenômeno de saturação.

KANG et al. [31][32] mostraram algoritmos para estimar a corrente secundária correspondente à relação do TC sob saturação usando a curva “fluxo versus corrente”. Os resultados da implementação em *hardware* dos algoritmos usando um processador digital de sinais foram apresentados. A principal vantagem dos métodos é que eles podem melhorar a sensibilidade dos relés para faltas internas de baixa amplitude, maximizar a estabilidade dos relés para faltas externas e reduzir a seção requerida para o núcleo do TC. Porém, os testes só envolveram situações de falta.

JAMALI et al. [33] trataram da componente CC da corrente de falta, que é a principal causa de saturação do TC. A corrente de excitação do TC saturado depende do aumento no fluxo do núcleo que distorce a corrente secundária. A forma de onda corrompida da corrente pode causar operação errônea do dispositivo de proteção. O artigo apresentou um novo algoritmo para compensar e evitar o problema descrito, adicionando a corrente de excitação calculada à corrente secundária medida. Novamente, os testes realizados consideraram apenas situações de falta.

Embora muitos trabalhos tenham abordado o problema da saturação dos transformadores de corrente, como PIHLER et al., 1997 [5], YU et al., 1999 [28], CUMMINS et al., 2000 [29], YU et al., 2001 [30], KANG et al., 1996 [31], KANG et al., 1997 [32] e JAMALI e RADJI, 1997 [33], os métodos disponíveis até agora apresentam certas limitações. Uma delas diz respeito ao tamanho do núcleo dos dispositivos transformadores de corrente. O aumento na seção transversal do núcleo dos TCs permite uma maior acomodação de fluxo, causando, porém, certa diminuição em sua sensibilidade.

Tem havido muitas propostas para a redução da seção transversal requerida para o TC, como por exemplo, BOZOKI e CALHOUN, 1990 [34] e MASSON, 1979 [35], sem afetar a habilidade do dispositivo em lidar com grandes trocas de fluxo.

Se o sinal fornecido pelo TC é distorcido por saturação, o valor RMS detectado será muito menor que o valor real de corrente de falta, podendo atrasar a operação do relé. Este tipo de problema tem sido amplamente discutido na literatura relativa a

vários tipos de proteção: BOZOKI e CALHOUN, 1990 [34], WRIGHT, 1968 [36], CHEN e GLAD, 1991 [37], KEZUNOVIC et al., 1993 [38], BARNETT et al., 1993 [39] e GLINKOWSKI e ESZTERGALYOS, 1996 [40]. Em [37], houve somente a estimativa das correntes primárias saturadas.

Em CONRAD et al., 1984 [41], um método para a correção das correntes secundárias distorcidas dos TCs foi apresentado. Porém, dificuldades práticas podem surgir neste método.

Se a característica da saturação do TC é conhecida, uma estimativa da corrente de entrada na situação em que o TC satura pode ser encontrada (BARNETT et al., 1993 [39]). Porém, a maioria das correntes de falta não terá a característica simétrica necessária para essa estimativa.

Outras abordagens presentes na literatura têm usado filtros de Kalman e processos iterativos para a correção da saturação (KANG et al., 1997 [32] e CHEN e GLAD, 1991 [37]). Estes métodos não são convenientes para aplicações em tempo real.

2.3 Simulação de Sistemas Faltosos

Em relação ao programa ATP - *Alternative Transients Program* - temos o trabalho de KASZTENNY et al. [42], no qual um modelo para o cálculo de transitórios eletromagnéticos possibilitou simular faltas entre espiras, entre enrolamentos e faltas internas para terra. As principais características do modelo são a representação da histerese e saturação do núcleo do transformador, fluxo residual, circuitos de entrada do relé e filtros *anti-aliasing*.

STRINGER et al. [43] publicaram uma discussão sobre aplicações e testes de relés diferenciais sob condições de saturação usando o ATP.

Ainda, CHAUDHARY et al. [44] apresentaram uma aplicação do ATP para representar praticamente todos os componentes de um sistema de potência, tais como linhas, transformadores e sistemas de proteção, incluindo disjuntores e relés. As saídas dos algoritmos são passadas pelo programa permitindo o estudo da interação dinâmica entre o sistema de potência e o sistema de proteção. São também

disponíveis modelos específicos de relés, como aqueles usados na proteção diferencial de transformadores.

Finalmente, COURY et al. [45] realizaram um estudo sobre a modelagem de um transformador de potência trifásico para a aplicação em esquemas de proteção digital. Nesse trabalho, o modelo do transformador foi incluído em um sistema elétrico de potência com o objetivo de calcular transitórios eletromagnéticos nos estudos de proteção diferencial. As situações de falta interna, energização do transformador e remoção de faltas externas foram simuladas com o auxílio da ferramenta computacional ATP-EMTP.

3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

3.1 Histórico

A rede de neurônios artificiais foi inspirada no pouco que o homem já conhece sobre o cérebro humano. Esta inspiração é baseada no fato de que o cérebro humano possui as características de robustez e tolerância à falhas e pode ser ajustado a um novo ambiente pelo treinamento, tendo a capacidade de processar informações nebulosas ou ruidosas. Possui ainda alto grau de paralelismo no processamento, alta velocidade e é pequeno, compacto e de baixo consumo de energia.

A FIGURA 15 ilustra um neurônio humano, conforme [46].

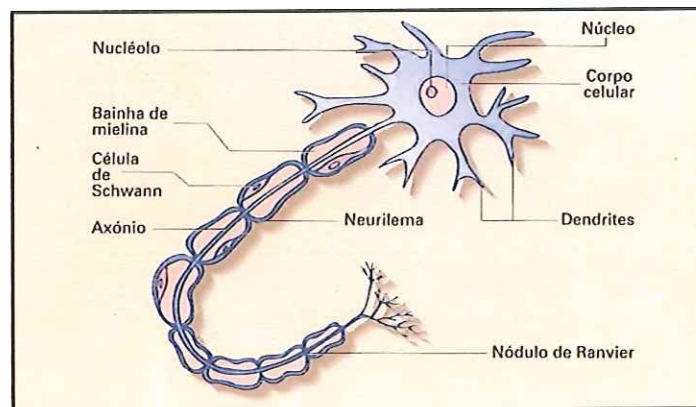


FIGURA 15 - Representação de um neurônio humano

As transmissões e recepções (sinapses) acontecem nas extremidades dos dendritos e axônios, sendo que essas transmissões são feitas por aumento ou diminuição do potencial elétrico no corpo da célula receptora. Se o potencial alcançar um certo limiar predefinido, o impulso é enviado.

Mc CULLOCH e PITTS (1943) [47] desenvolveram um modelo de neurônio binário com limiar p unitário. As entradas do neurônio são ponderadas pelos pesos w_{ij} com as saídas do neurônio anterior ou com os sinais de entrada da rede. Para as saídas (n) foram estabelecidos os valores 1 ou 0 (estimulado ou não).

A FIGURA 16 seguinte mostra o neurônio em questão, conforme [21]:

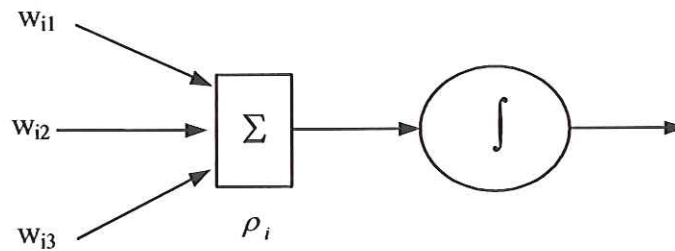


FIGURA 16 - Modelo de neurônio binário

A função de saída para o neurônio descrito é:

$$n_i(t+1) = \theta (\sum w_{ij} \cdot n_j(t) - \rho_i) \quad (4)$$

e $\theta(x)$ = função degrau.

Se $x \geq 0 \rightarrow \theta(x) = 1$ (estímulo)

Se $x < 0 \rightarrow \theta(x) = 0$ (não-estímulo)

O peso w_{ij} é a força da sinapse conectando o neurônio j ao neurônio i .

O valor ρ_i é o valor limiar específico do nóculo i .

Quando a somatória dos pesos das entradas excede ou alcança o valor limiar, o neurônio é estimulado.

3.2 Funcionamento da Rede Neural Artificial

Uma Rede Neural Artificial consiste de um conjunto de módulos (células) conectados e com uma regra de propagação, conforme mostrado na FIGURA 17, a seguir.

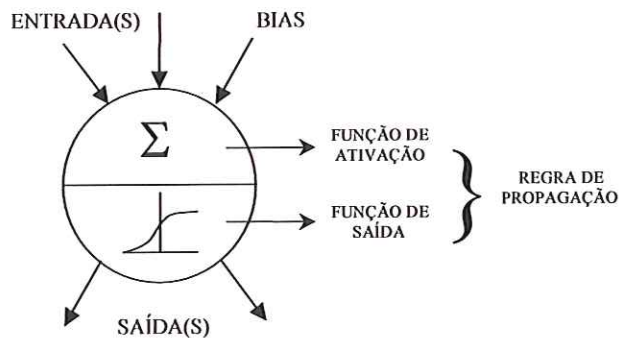


FIGURA 17 - Modelo atual da célula de uma rede neural artificial

Cada neurônio recebe suas entradas com os pesos associados, vindos de outros neurônios ou de um estímulo externo. A função de ativação é usualmente uma somatória que age nas entradas da rede. Os valores *bias* dos neurônios são adicionados à somatória das entradas com pesos e serão esclarecidos na próxima seção.

O estado de ativação do neurônio é determinado pela função de saída ou de transferência e geralmente é uma função sigmoideal ou uma função degrau (*Hard Limiter*), segundo [21], como mostra a FIGURA 18.

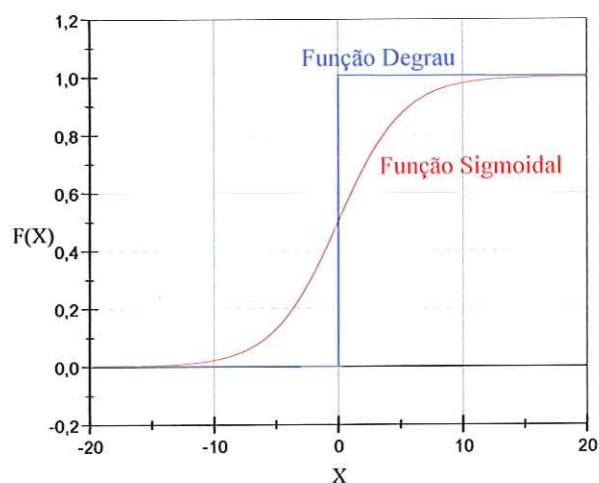


FIGURA 18 - Funções de transferência do neurônio

A função Degrau fornece maior velocidade (menor tempo computacional), porém existe o risco de ocorrerem erros inadmissíveis com essa abordagem. Uma regra de propagação consiste das funções de ativação e de transferência (saída). Essa saída do neurônio trafega pelas ligações (sinapses) até o próximo neurônio. Portanto, uma RNA é formada por um conjunto de neurônios dispostos em uma ou mais camadas, com conexões de pesos variados.

A rede chamada *feedforward* tem a propagação do sinal para frente, entre neurônios de camadas diferentes, na qual toda entrada é recebida pela camada adjacente, com exceção da primeira camada, cujos sinais de entrada são as próprias entradas da rede. Os sinais resultantes propagam-se para frente, uma camada por vez, até a última camada (saída) [48]. Na fase de treinamento da rede neural há a determinação e a correção dos pesos e dos *bias* para que a rede responda de uma forma desejada.

Existem dois métodos principais de treinamento para a rede em questão, descritos a seguir.

Treinamento Supervisionado

A informação sobre as classes no plano a que pertence cada um dos padrões de dados de treinamento é previamente conhecida durante o treinamento. A aprendizagem é feita com base na comparação da saída da rede com a resposta correta conhecida e esperada.

Treinamento Não-Supervisionado

O desenvolvimento do aprendizado da rede acontece sem a indicação de qual classe pertence cada padrão. Somente os padrões de entrada estão disponíveis. A rede deve agrupar os padrões fornecidos de acordo com um certo critério de similaridade definido. A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade em formar representações internas para codificar características da entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente [48].

3.3 Rede Neural Artificial Multicamadas e o Método de Treinamento *Backpropagation*

Este item ilustra o funcionamento e a arquitetura das redes neurais multicamadas (MLP) e o método de treinamento *Backpropagation*, utilizado em grande parte das estruturas neurais aplicadas ao reconhecimento de padrões. Uma rede neural multicamadas completa é mostrada na FIGURA 19.

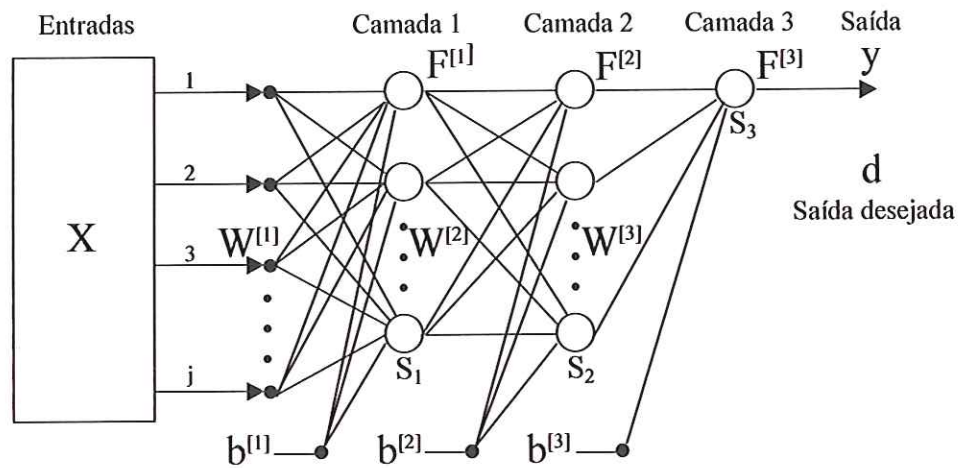


FIGURA 19 - Rede neural completa com três camadas

A figura mostra a estrutura de uma RNA de 3 camadas [5], onde:

X = vetor de dados de entrada

W_i = matriz de valores de peso associados a cada entrada

$h_i^{(m)}$ = entrada para um dado neurônio i com seus pesos correspondentes de uma certa camada m [20], onde:

$$h_i^{(m)} = [W_i^{(m)}] X^{(m)} = \sum_{k=1}^M (W_{ik}^{(m)} \cdot X^{(m)}) \quad (5)$$

F_i = função de transferência sigmoidal de cada unidade

$$F(h-b) = \frac{1}{1 + e^{-(h-b)/2}} \quad (6)$$

b_i = unidades *bias*

d = saída desejada da rede para cada entrada

$y_i^{(m)}$ = saída do neurônio i na camada m

$$y_i^{(m)} = F_i(h_i - b_i) \quad (7)$$

Ainda, $y^{(m)} = x^{(m+1)}$ ou seja, a entrada da próxima camada é a saída da camada anterior. Existe um vetor de saídas y para cada vetor de entradas x .

Os pesos w e *bias* b são trocados (atualizados) para cada j , até obter-se o critério de parada do treinamento (erro aceitável alcançado). As RNAs utilizadas neste trabalho usaram o método de treinamento chamado *Backpropagation* do erro que realiza a busca por um erro aceitável. O erro *Backpropagation* [48] de saída é dado por:

$$E_p = 1/2 (d_j - y_j)^2 \quad (8)$$

Esse erro é calculado para as células de saída da rede.

O objetivo deste algoritmo de treinamento é minimizar o erro de saída para cada vetor de entrada, ou seja, minimizar a distância quadrática entre as saídas desejadas e calculadas. O erro de saída E_p é minimizado quando seu gradiente for próximo de zero. A estrutura de processamento paralelo de informação permite a inclusão de conhecimento especializado no processo, a detecção e a classificação de sinais [48].

3.4 Redes Neurais tipo RBF – *Radial Basis Function*

A motivação principal para a concepção das redes RBF – *Radial Basis Function* foi a propriedade de resposta localmente sintonizada, presente em alguns neurônios biológicos, onde as células respondem seletivamente a um intervalo finito do espaço de sinais de entrada.

A arquitetura utilizada pelas redes *Radial Basis Function* compreende o método *feedforward*, onde, como já visto, o sinal é propagado apenas para frente.

Nestas redes, as unidades ocultas fornecem um conjunto de funções que constituem uma base arbitrária para os padrões de entrada quando estes são expandidos dentro do espaço das unidades ocultas.

A construção de uma rede neural com funções de base radiais envolve três camadas diferentes. A primeira camada é constituída pelas células de entrada. A segunda camada é uma camada oculta de dimensão suficientemente grande e que tem uma função diferente daquela exercida pela camada intermediária presente nas redes MLP. Finalmente, a camada de saída fornece a resposta da rede neural aos padrões de ativação aplicados à camada de entrada [49][50].

A camada de entrada possui unidades lineares. A camada oculta ou intermediária contém as funções de base radiais e a camada de saída emprega unidades lineares ou sigmóides.

Na camada oculta, ocorre o agrupamento dos dados de entrada em *clusters*. Esta camada transforma um conjunto de padrões de entrada não-linearmente separáveis em um conjunto de saídas linearmente separáveis. A camada de saída classifica os padrões recebidos da camada anterior de forma semelhante à rede MLP.

A transformação do espaço de entrada em espaço de unidades ocultas é, portanto, não linear, enquanto que a transformação do espaço de unidades ocultas em espaço de saída é linear. Um problema de classificação de padrões contido em um espaço não linear de muitas dimensões é mais fácil de ser linearmente separável do que em um espaço de poucas dimensões. Esta é a razão para tornar a dimensão do espaço das unidades ocultas em uma rede RBF suficientemente grande.

As funções radiais empregadas por este tipo de rede neural diminuem ou aumentam de valor em relação à distância de um ponto central. As principais funções de ativação RBF são:

- Função Gaussiana
- Função Multiquadrática Inversa
- Função de Base Logística

Em todas as funções acima, calcula-se a norma Euclidiana do vetor de entrada ao vetor de centros. Este número serve de entrada para a função, que retorna o valor de ativação da unidade intermediária.

Como citado, o argumento da função de ativação de cada unidade oculta em uma rede RBF computa a distância entre o vetor de entrada e o centro daquela unidade. As redes RBF são capazes de generalização em regiões do espaço de entrada onde poucos ou nenhum dado de treinamento é disponível.

Portanto, redes RBF usando não-linearidades localizadas em decaimentos exponenciais (por exemplo, Funções Gaussianas) constroem aproximações locais para o mapeamento não linear de entrada e saída, resultando na capacidade dessas redes em realizar rápida aprendizagem e sensibilidade reduzida na ordem de apresentação dos dados de treinamento, segundo [50].

Treinamento

O treinamento da rede RBF geralmente é híbrido, ou seja, não-supervisionado e supervisionado.

No treinamento não-supervisionado, que é aplicado à camada oculta, há a determinação do número de funções radiais, a localização dos centros e o valor dos raios. O algoritmo de clusterização utilizado frequentemente é o chamado K-Médias [48].

A função de ativação Gaussiana torna os vetores de entrada linearmente separáveis e o neurônio é ativado sempre que o vetor de entrada estiver suficientemente próximo ao vetor de centro.

O treinamento supervisionado é aplicado à camada de saída. Nessa etapa acontece o ajuste dos pesos localizados entre os nós da camada oculta e de saída, de forma semelhante ao algoritmo MLP. O problema passa então a ser linear. A função de ativação dos nós presentes nessa fase é sigmoideal.

A TABELA 2 seguinte mostra uma comparação básica entre as redes RBF e MLP [48].

TABELA 2 - Comparação entre redes neurais dos tipos MLP e RBF

| MLP | RBF |
|---|---|
| Pode ter uma ou mais camadas intermediárias | Geralmente possui apenas uma camada intermediária |
| Nós de camadas intermediárias e de saída têm funções semelhantes | Nós de camadas intermediárias e de saída têm funções diferentes |
| Entrada da função de ativação é o produto interno dos vetores de entrada e de pesos | Entrada da função de ativação é a distância Euclidiana entre os vetores de entrada e de pesos |
| Separa padrões de entrada com Hiperplanos | Separa padrões de entrada com Hiperelipsóides |
| Melhor em problemas complexos | Melhor em problemas bem definidos |

3.5 Redes Neurais Artificiais Recorrentes

Fenômenos temporais são fundamentais para atividades diárias dos seres humanos. Como consequência deste fato, o tempo é um parâmetro importante de várias tarefas de reconhecimento de padrões, tais como reconhecimento de voz, detecção de movimentos, verificação de assinaturas, visão, controle motor, processamento de sinais, etc. A computação convencional ainda não lida satisfatoriamente com muitas destas tarefas de reconhecimento de padrões dinâmicos. São necessárias estruturas suficientemente ricas, capazes de representar o tempo.

Muitos algoritmos de treinamento das RNAs também não são capazes de implementar mapeamentos dinâmicos, como por exemplo o algoritmo *Backpropagation*, que pode apenas aprender mapeamentos estáticos. Um artifício utilizado para processamento temporal utilizando essas redes envolve o uso de janelas de tempo, onde a entrada da rede utiliza trechos dos dados temporais como se eles formassem um padrão estático. Entretanto, esta solução não é a mais indicada para o processamento temporal. O ideal seria a utilização de uma rede neural cuja estrutura seja adequada a este tipo de processamento. A principal questão, portanto, é como estender a estrutura das redes MLP para que assumam um comportamento que varie com o tempo, sendo assim capazes de tratar sinais temporais [48].

O tempo pode ser representado pelo efeito que acarreta no processamento de sinais, que significa oferecer características dinâmicas ao mapeamento realizado pela rede, tornando-a sensível a sinais que variem com o tempo. Para uma RNA ser considerada dinâmica, é preciso que possua memória [51].

Existem basicamente duas maneiras de prover memória a uma RNA. A primeira seria introduzindo atraso no tempo, como as técnicas TDNN – *Time Delay Neural Network* [52] [53] [54] e *FIR Multilayer Perceptron* [55] [56]. A segunda maneira, e que foi abordada neste trabalho, é a utilização de redes neurais recorrentes, tais como *Backpropagation Through Time* [57] [58] [59], *Real-Time Recurrent Learning* [60], *Recurrent Cascade Correlation* [61], redes de Elman [51] e redes de Jordan [62].

Em resumo, podem-se definir redes recorrentes como aquelas que possuem conexões de realimentação que proporcionam comportamento dinâmico. Há dois tipos de redes recorrentes: aquelas em que o padrão de entrada é fixo e a saída caminha dinamicamente para um estado estável [63] [64], e aquelas em que ambas, entrada e saída, variam com o tempo, sendo estas últimas mais gerais e utilizadas com maior frequência.

Há muitas variações de arquiteturas de redes recorrentes, sendo que algumas delas permitem o uso de algoritmos de treinamento mais simples ou adaptados a uma tarefa particular. Duas maneiras que podem ser usadas para treinar uma rede recorrente, e que não envolvem o uso de aproximações na computação dos gradientes são *Backpropagation Through Time* e redes recorrentes de tempo real.

3.5.1 Redes de Elman e Jordan

Elman introduziu memória às RNAs. Este modelo é uma aproximação do método *Backpropagation Through Time* [51].

Nas redes de Elman, além das unidades de entrada, intermediárias e de saída, há também unidades de contexto, como nas redes parcialmente recorrentes em geral. As unidades de entrada e saída interagem com o ambiente externo, enquanto as unidades intermediárias e de contexto não o fazem. As unidades de entrada são apenas unidades de armazenamento (*buffer*) que passam os sinais sem modificá-los. As unidades de saída são unidades lineares que somam os sinais que recebem. As

unidades intermediárias podem ter funções de ativação lineares ou não lineares, e as unidades de contexto são usadas apenas para memorizar as ativações anteriores das unidades intermediárias e podem ser consideradas como atraso no tempo em um passo.

As conexões *feedforward* são modificáveis e as conexões recorrentes são fixas, motivo pelo qual a rede de Elman é apenas parcialmente recorrente.

Em um intervalo de tempo específico k , as ativações das unidades intermediárias (em $k-1$) e as entradas correntes (em k) são utilizadas como entradas da rede. Em um primeiro estágio, *feedforward*, estas entradas são propagadas para frente a fim de produzir as saídas. Posteriormente, a rede é treinada com o algoritmo de aprendizagem *Backpropagation* padrão. Após este passo de treinamento, as ativações das unidades intermediárias no tempo k são reintroduzidas através das ligações recorrentes nas unidades de contexto, sendo salvas nestas unidades para o próximo passo do treinamento ($k+1$).

No início do treinamento, as ativações das unidades intermediárias são desconhecidas e, geralmente, são inicializadas para a metade do valor máximo que as unidades intermediárias podem ter. A FIGURA 20 ilustra o modo de operação de uma rede recorrente de Elman.

Na rede de Jordan [62], a saída da rede é copiada para a unidade de contexto. Adicionalmente, as unidades de contexto são localmente recorrentes. A grande diferença em termos de topologia entre as duas redes é que a recorrência na rede de Elman é feita da camada oculta para as entradas, enquanto que na rede de Jordan a recorrência é feita das saídas para as entradas. A FIGURA 21 mostra a topologia de uma rede neural recorrente de Jordan.

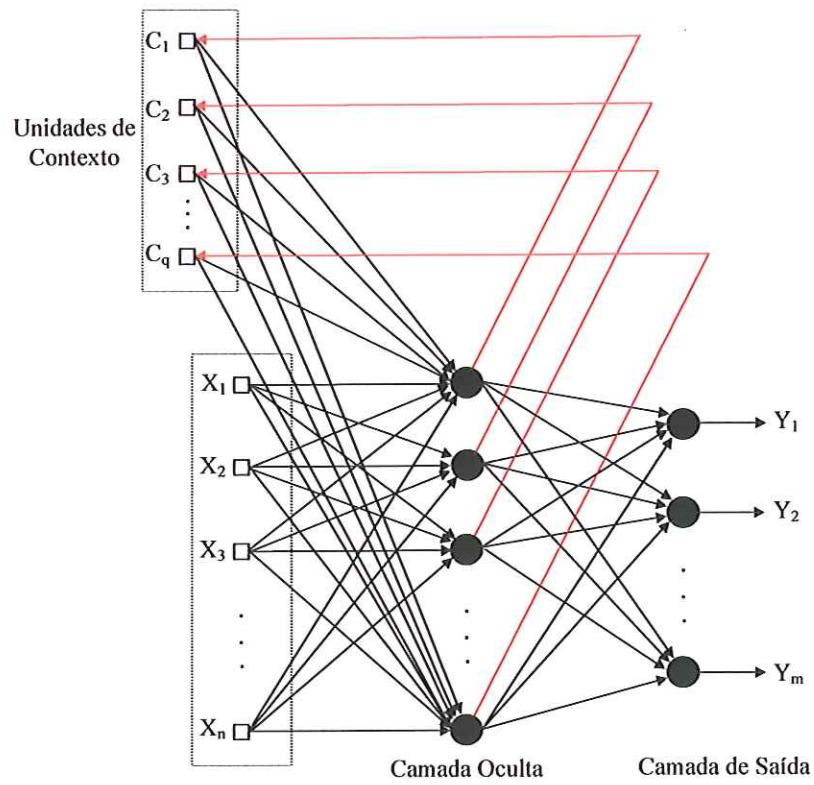


FIGURA 20 – Rede Neural Recorrente de Elman

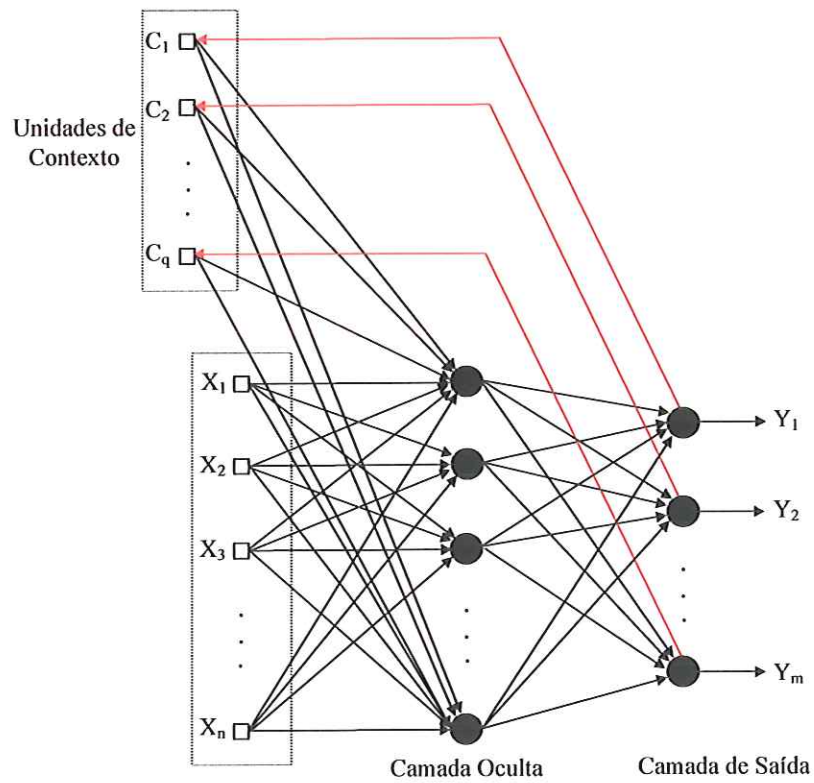


FIGURA 21 – Rede Neural Recorrente de Jordan

Em resumo, a característica principal das RNAs é considerar o conhecimento adquirido durante o treinamento e responder a novos dados de entrada da maneira mais apropriada, concluindo assim uma generalização do problema. O modelo da RNA é definido de acordo com a arquitetura da rede, função de transferência e regra de aprendizado, enquanto sua arquitetura é determinada pelos pesos correspondentes e esquema de conexões. Já o processo de aprendizagem envolve a mudança nos valores dos pesos e é o aspecto mais explorado em Redes Neurais Artificiais.

4 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO CONSIDERADO

Este capítulo traz um pequeno histórico sobre o programa ATP – *Alternative Transients Program* [65], juntamente com os modelos do sistema elétrico estudado e do transformador trifásico empregado na simulação. São apresentados também os cálculos realizados para a construção dos arquivos de dados utilizados e seus respectivos formatos, além de gráficos que ilustram algumas das situações envolvidas no trabalho.

As simulações realizadas e mostradas neste capítulo são de fundamental importância para o trabalho, pois constituem a base do banco de dados gerado para o treinamento e testes das ferramentas de inteligência artificial implementadas. Os dados simulados foram utilizados nos testes dos algoritmos propostos e convencionais do relé diferencial do transformador de potência.

4.1 Histórico do Programa ATP

O presente estudo sobre proteção diferencial digital dos transformadores de potência contou com o emprego do *software* ATP – *Alternative Transients Program* na simulação de um sistema elétrico composto por uma fonte equivalente, um transformador trifásico e uma linha de distribuição com 5 km de extensão.

O programa EMTP - *Electromagnetic Transients Program* - foi desenvolvido a partir da década de 60 por Herman W. Dommel, para a *Bonneville Power Administration* (BPA) [9]. Inicialmente, o *software* trabalhava simulando circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Com o passar do tempo, o programa sofreu modificações de vários autores. A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um método de desenvolvimento em conjunto com os usuários do EMTP, que o tornou uma poderosa ferramenta em estudos de transitórios em sistemas elétricos. Algumas divergências entre Scott Meyer e o EPRI - *Electric Power Research Institute* - que investiu no projeto do EMTP a partir de 1984, levaram à criação de uma nova versão do EMTP, a qual foi enviada para a Bélgica, onde se instalou o *Leuven EMTP Center* (LEC). Esta nova versão foi denominada

ATP – *Alternative Transients Program*, que representa a continuação das versões precedentes do programa [9].

✧ O programa EMTP-ATP trabalha com arquivos de dados em formato texto, de fácil edição e, após efetuar o processamento destes, gera outros arquivos, incluindo o estudo efetuado, de extensão **.LIS**. Há também a possibilidade da geração de um outro arquivo com a extensão **.PL4**, apresentando os resultados obtidos na simulação de tensão, corrente, potência e energia. Estes arquivos são gravados de acordo com instruções previamente informadas no início da execução do processamento [9]. O arquivo de dados fornecido para o ATP tem um formato rigidamente prefixado, de modo que os dados são inseridos em posições definidas, sob pena de erro de processamento. O ATP possui também uma crítica do arquivo de dados de entrada. Assim, caso haja a ocorrência de erros, muitas vezes é possível corrigi-los simplesmente pela análise da resposta constante no arquivo de saída.

✧ As simulações executadas no trabalho representaram diversos fenômenos a que um transformador de potência pode estar submetido, tais como faltas em diversas localizações dos enrolamentos internos, energização e condição de regime. O banco de dados formado através dessas simulações será, portanto, empregado nos treinamentos e testes das ferramentas propostas e implementadas. Baseadas nestas simulações, as formas de onda das correntes diferenciais serão comparadas e as decisões sobre a atuação da proteção diferencial serão tomadas.

4.2 Sistema Elétrico Estudado

A FIGURA 22 seguinte mostra o desenho representativo do sistema elétrico envolvido, com os nomes dos nós utilizados nos arquivos de dados do EMTP-ATP [65].

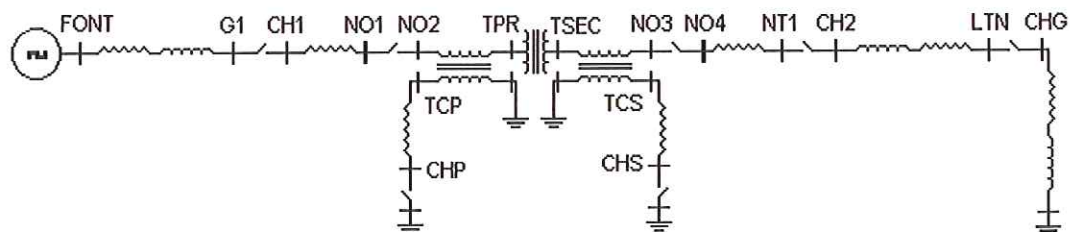


FIGURA 22 - Sistema elétrico utilizado no ATP

O sistema elétrico inicial consiste de um equivalente de geração de 138 kV e potência de 30 MVA, conectado a um transformador de 25 MVA com relação de transformação de 138 kV no primário para 13,8 kV no secundário, em ligação triângulo-estrela aterrado e seguido de uma linha de distribuição de 5 km de extensão (entre os nós CH2 e LTN da FIGURA 22 mostrada) com uma carga de 10 MVA. O valor da impedância da carga (entre o nó CHG e a terra) é de 19,044 Ω e o fator de potência é 0,92 indutivo. As chaves inseridas entre NO1-NO2 e NO3-NO4 são utilizadas para desligar o transformador do restante do sistema, e as demais chaves são abertas e fechadas durante o estudo, para simular faltas, energização do transformador e demais situações estudadas.

4.3 O Modelo do Transformador

A FIGURA 23 e a FIGURA 24 ilustradas a seguir apresentam o modelo de transformador de potência empregado e o detalhe das conexões dos enrolamentos [9].

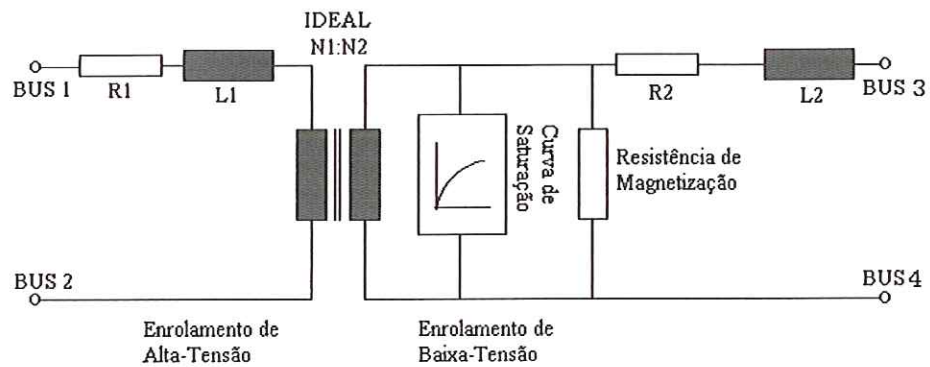


FIGURA 23 - Modelo de transformador utilizado no ATP

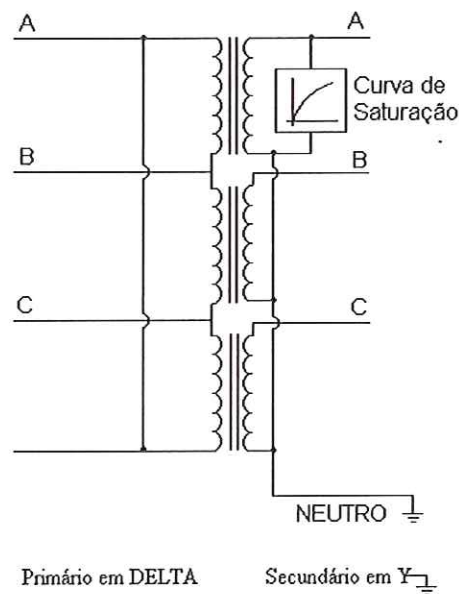


FIGURA 24 - Detalhe das conexões dos enrolamentos

Transformadores de corrente (TCs)

Os TCs foram introduzidos no sistema elétrico a partir dos ramos CH1-TPR e TSEC-NT1. A FIGURA 25 mostra os detalhes de sua conexão ao restante do sistema elétrico.

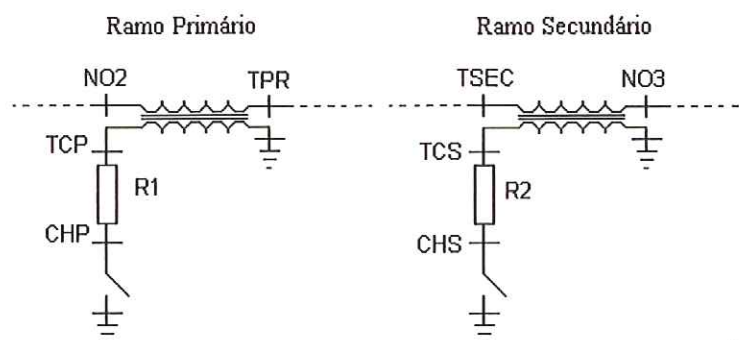


FIGURA 25 - Detalhe da conexão dos TCs ao sistema elétrico

4.4 Cálculos para a Construção dos Arquivos de Dados do ATP

A seguir são apresentados os cálculos utilizados para a construção dos arquivos de dados para o sistema elétrico inicial em questão. Grande parte das informações obtidas foram adquiridas da concessionária de energia elétrica local (CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz), sendo então adaptadas para a utilização nas simulações.

Equivalente de Geração

Os dados para a fonte equivalente são expostos abaixo.

Resistência de seqüência zero – $R_0 = 7,5962\Omega$

Resistência de seqüência positiva – $R_+ = 7,1003\Omega$

Indutância de seqüência zero – $L_0 = 115,45\text{mH}$

Indutância de seqüência positiva – $L_+ = 53,99\text{mH}$

Parâmetros para a linha de distribuição

Os dados para a linha de distribuição foram fornecidos pela concessionária de energia elétrica CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz - e são listados a seguir.

Resistência de seqüência zero – $R_0 = 0,7186\Omega$

Resistência de seqüência positiva – $R_+ = 0,3101\Omega$

Indutância de seqüência zero – $L_0 = 11,45\text{mH}$

Indutância de seqüência positiva – $L_+ = 2,41\text{mH}$

Dados referentes à carga

Para a carga conectada ao sistema, foram fornecidos os seguintes dados:

$S = 10 \text{ MVA}$

$V = 13,8 \text{ kV}$

Fator de potência = 0,92 indutivo

No cálculo do módulo da impedância da carga, utilizou-se a seguinte relação:

$$|Z| = \frac{V^2}{S} \quad (9)$$

Desta forma, obtemos:

$$|Z| = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{10 \times 10^6} = 19,044\Omega$$

Através do fator de potência é possível obter os valores de resistência e reatância para a carga. Como o fator de potência é igual ao co-seno do ângulo da impedância, utilizamos o triângulo da FIGURA 26 para a obtenção desses dados.

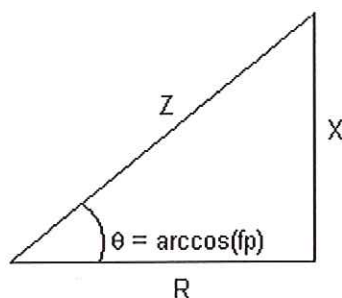


FIGURA 26 - Disposição dos parâmetros elétricos em um triângulo de cargas

Da relação

$$R = |Z| \cos(\theta) \quad (10)$$

Encontra-se que $R = 19,044 \times 0,92 = 17,520 \Omega$.

Do mesmo modo,

$$X = |Z| \sin(\theta) \quad (11)$$

onde $\theta = \arccos(0,92)$. Portanto, $\theta = 23,07^\circ$, e $X = 7,4636 \Omega$.

Como $\omega = 376,99$, temos que

$$L = \frac{X}{\omega} \quad (12)$$

$$L = \frac{7,4636}{376,99}$$

Portanto, $L = 0,019798$ e $H = 19,798$ mH.

Assim, os valores utilizados no arquivo de dados serão:

$R = 17,520 \Omega$ e $L = 19,798$ mH

Dados para a rotina especial SATURATION

No arquivo principal de dados, é necessária a curva de saturação do transformador, obtida através da rotina SATURATION [65].

Inicialmente, é fornecida uma tabela com dados de tensão e corrente medidos no transformador. Estes dados são inseridos em um arquivo especialmente construído para gerar valores de corrente e fluxo, através de uma rotina especial do programa ATP, chamada SATURATION.

Estes parâmetros de tensão e fluxo são então empregados no arquivo principal de dados para a modelagem do transformador.

Os cálculos elaborados são os seguintes:

Potência do transformador = 25 MVA

Potência-base:

$$S_{BASE} = \frac{S_{TRANSFORMADOR}}{3} = \frac{25}{3} = 8,33MVA$$

Tensão-base:

$$V_{BASE} = \frac{13,8kV}{\sqrt{3}} = 7,968kV$$

Corrente-base:

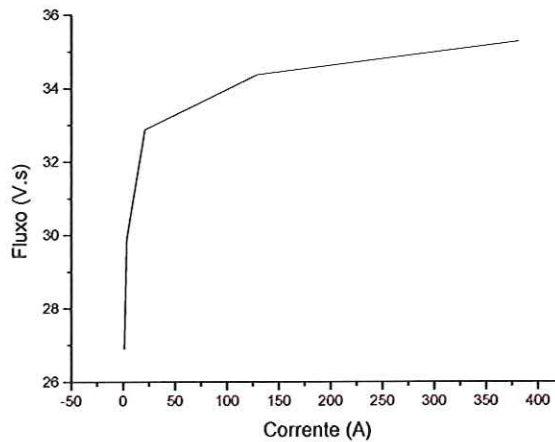
$$I_{BASE} = \frac{S_{BASE}}{V_{BASE}} = 1,0459kA$$

Os valores de tensão e corrente medidos no secundário do transformador são fornecidos e os valores de corrente em pu são calculados dividindo-se o valor da corrente em Ampere pelo valor da corrente-base (I_{BASE}). Esses valores são representados na TABELA 3.

TABELA 3 - Dados de tensão e corrente para a rotina SATURATION

| Tensão (pu) | Corrente (A) | Corrente (pu) |
|-------------|--------------|---------------------------|
| 0,90 | 0,75 | $0,717 \times 10^{-03}$ |
| 1,00 | 1,51 | $1,450 \times 10^{-03}$ |
| 1,10 | 8,34 | $7,978 \times 10^{-03}$ |
| 1,50 | 43,00 | $41,112 \times 10^{-03}$ |
| 1,80 | 119,00 | $113,777 \times 10^{-03}$ |

De posse dos dados de tensão e corrente, os campos de entrada da rotina SATURATION são preenchidos e a curva de saturação (corrente x fluxo) é calculada ponto a ponto, preenchendo o arquivo principal de dados da simulação. A FIGURA 27 mostra a curva de saturação calculada para o transformador de 25 MVA.

**FIGURA 27 - Curva de saturação do transformador de potência**

Parâmetros do transformador de potência

Para o transformador de potência de 25 MVA, os cálculos são os seguintes:

Impedância-base do primário:

$$Z_{BASE-PRIMARIO} = \frac{(V_{BASE})^2}{S_{BASE}} = \frac{(138000)^2}{25 \times 10^6} = 761,76\Omega \quad \text{Analogamente,}$$

Impedância-base do secundário:

$$Z_{BASE-SECUNDARIO} = \frac{(13800)^2}{25 \times 10^6} = 7,6176\Omega$$

Os valores das reatâncias em pu foram fornecidos (CPFL) para o primário e secundário, sendo ambas iguais a 0,04495 pu e um valor total de 0,0899 pu.

Assim, os valores de reatância no primário e secundário são encontrados através dos seguintes cálculos:

$$X' = X'_{pu} \times Z_{BASE} \quad (13)$$

Multiplicando-se os valores da impedância-base do primário e secundário pelo valor da reatância em pu, obtemos os valores de reatâncias para o primário e secundário:

$$X'_{PRIMARIO} = 761,76 \times 0,04495 = 34,241112\Omega$$

$$X'_{SECUNDARIO} = 7,6176 \times 0,04495 = 0,342411\Omega$$

A relação entre as reatâncias e resistências no primário e secundário do transformador é dada:

$$\frac{X'}{R'} = 32,68$$

De posse das relações obtidas, os valores para as indutâncias e resistências no primário e secundário do transformador são os seguintes:

$$L_{PRIMARIO} = \frac{X'_{PRIMARIO}}{\omega} = \frac{34,241112}{376,99} = 0,090828H = 90,828mH$$

$$L_{SECUNDARIO} = \frac{X'_{SECUNDARIO}}{\omega} = \frac{0,342411}{376,99} = 0,000908H = 0,908276mH$$

$$R_{PRIMARIO} = \frac{X'_{PRIMARIO}}{32,68} = 1,047770\Omega$$

$$R_{SECUNDARIO} = \frac{X'_{SECUNDARIO}}{32,68} = 0,010478\Omega$$

Os dados obtidos são alocados no arquivo principal de dados, dando seqüência à modelagem do transformador.

Divisão dos enrolamentos do transformador na simulação de faltas internas

Para a simulação de faltas internas ao transformador, o enrolamento primário entre as fases A e B foi dividido em porções correspondentes a 10%, 30%, 50%, 70% e 90% do total, para valores de resistência, indutância e tensão relativa a terra. A FIGURA 28 e a TABELA 4 seguintes mostram a divisão do enrolamento entre 10%, 50%, 90% e os valores calculados na proporção da divisão respectivamente, para a ilustração do procedimento adotado.

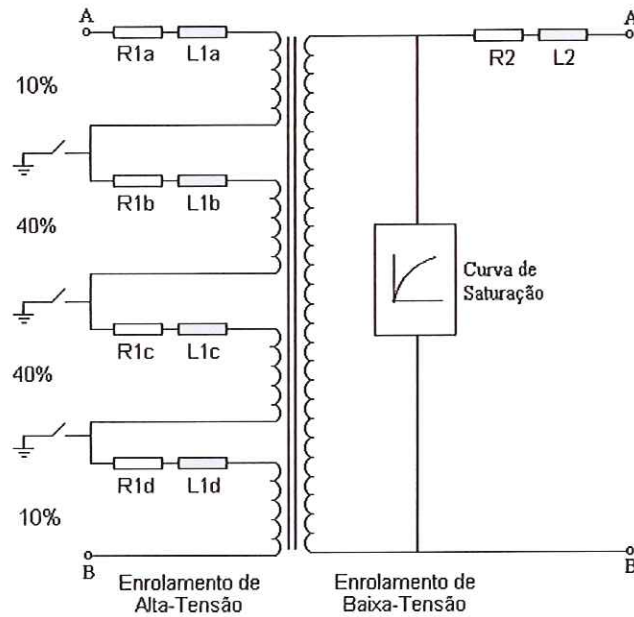


FIGURA 28 - Divisão do transformador para a simulação de faltas a 10%, 50% e 90% da fase A do enrolamento primário

TABELA 4 - Divisão do enrolamento primário em 10, 50 e 90% na aplicação de faltas internas

| Nó | Porcentagem do enrolamento primário | Resistência (Ω) | Indutância (mH) | Tensão (kV) |
|-------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------|
| TPRA - N10A | 10% | 0,104777 | 9,0828 | 13,80 |
| N10A - N40A | 40% | 0,419108 | 36,3312 | 55,20 |
| N40A - N90A | 40% | 0,419108 | 36,3312 | 55,20 |
| N90A - TPRB | 10% | 0,104777 | 9,0828 | 13,80 |

A aplicação de falta em N10A corresponde a uma falta aplicada em 10% do enrolamento. Do mesmo modo, a aplicação de falta em N40A corresponde a uma

falta aplicada em 50% do enrolamento. Finalmente, a aplicação de falta em N90A corresponde a uma falta aplicada em 90% do enrolamento.

Parâmetros para os transformadores de corrente (TCs)

Ao contrário do transformador de potência, que teve a sua curva de saturação calculada através da sub-rotina SATURATION, os dados para a modelagem da curva de saturação e dos demais parâmetros relacionados aos TCs foram fornecidos pela concessionária de energia elétrica CPFL e adaptados diretamente ao sistema em estudo.

A FIGURA 29 mostra a curva de saturação utilizada para modelar a não-linearidade do núcleo do transformador.

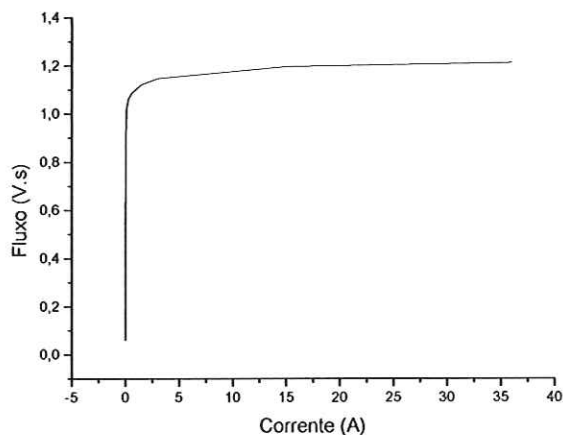


FIGURA 29 - Curva de saturação dos transformadores de corrente do sistema elétrico

Os demais parâmetros para os TCs são listados a seguir.

Indutância de dispersão do primário: $1,0 \times 10^{-4}$ H

Resistência de dispersão do primário: $0,85\Omega$

Indutância de dispersão do secundário: $1,0 \times 10^{-4}$ H

Resistência de dispersão do secundário: $1,0 \times 10^{-4}\Omega$

Relação de transformação: 1:40 no primário e 1:400 no secundário.

Em seguida são realizados os cálculos da correção dos ângulos de fase para as correntes diferenciais. Este cálculo é reproduzido nas equações (14) a (16).

$$I_{difa} = \frac{CHAP - (CHAS - CHCS)}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$$I_{difb} = \frac{CHBP - (CHBS - CHAS)}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$I_{difc} = \frac{CHCP - (CHCS - CHBS)}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Além da corrente diferencial, é fixada uma corrente diferencial de restrição. Este cálculo é realizado através das equações (17) a (19) seguintes.

$$I_a = \frac{CHAP + (CHAS - CHCS)}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

$$I_b = \frac{CHBP + (CHBS - CHAS)}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$I_c = \frac{CHCP + (CHCS - CHBS)}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

4.5 Formato dos Arquivos de Dados

Como exposto anteriormente, os arquivos de dados do programa ATP necessitam obedecer a um formato rigidamente estabelecido. Assim, os valores calculados nos itens anteriores são inseridos em campos precisamente definidos dentro dos arquivos, conforme o exemplo mostrado no APÊNDICE A. Cada linha do arquivo é também chamada de registro de dados. Os registros possuem campos específicos e com posições determinadas pelas colunas que ocupam. Estes arquivos servem como entrada para o ATP realizar os cálculos referentes ao sistema elétrico. A partir desta entrada de dados, são calculados os valores instantâneos das correntes no primário e no secundário do transformador e das correntes diferenciais, em cada fase e ao longo do tempo. Os demais campos deste arquivo possuem outros dados

relativos ao sistema elétrico, tais como resistências, capacitâncias, indutâncias, bem como as especificações relativas ao tempo de simulação, e requisições de saída de dados.

4.6 Estudo da Representação dos Fenômenos Envolvidos

4.6.1 Simulações Realizadas

Um dos objetivos desta pesquisa consiste em obter dados referentes às diversas situações que ocorrem com os transformadores de potência na prática. Deste modo, as simulações realizadas se concentram nas seguintes situações:

- Energização do transformador;
- Energização do transformador com a presença de faltas internas;
- Faltas internas entre um enrolamento do transformador e a terra em ambos os lados do transformador;
- Faltas internas entre as espiras do enrolamento do transformador em ambos os lados do transformador;
- Faltas monofásicas e trifásicas externas ao transformador;
- Faltas aplicadas entre o transformador e os TCs;
- Rejeição de cargas;
- Remoção de faltas monofásicas e trifásicas externas ao transformador;
- Sobre-excitação no transformador;
- Energização de bancos de capacitores;
- Regime permanente.

Em seguida serão descritos os procedimentos utilizados em cada uma das situações analisadas.

Energização do transformador

Consiste em fechar os interruptores do lado primário do transformador com o lado secundário em aberto, observando-se então o comportamento das tensões e correntes no secundário.

Energização do transformador na presença de faltas internas

Simula o fechamento dos interruptores do lado primário do transformador com o lado secundário em aberto, simultaneamente com o fechamento de chaves de curto-circuito entre a fase A do transformador e a terra.

Faltas externas aplicadas no lado secundário do transformador

O primeiro caso para este tipo de estudo consiste em uma falta monofásica (entre a fase A e a terra), e o segundo caso representa uma falta trifásica envolvendo a terra. Esses resultados são obtidos através do fechamento de uma chave para a terra inserida no lado secundário do transformador de potência, e com o sistema em regime.

Faltas aplicadas entre o transformador e os TCs

Consiste na aplicação de faltas entre o transformador e o TC, ocorrendo conforme o ponto F ilustrado na FIGURA 30. A referida situação mostrou-se de grande importância ao estudo, devido às características peculiares de seu formato de onda.

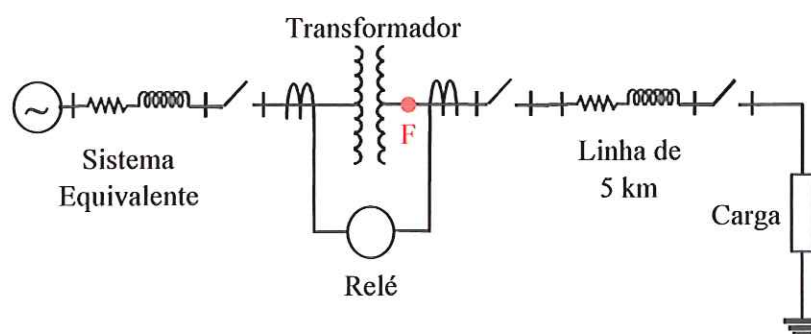


FIGURA 30 - Situação de falta entre o transformador e o TC

Rejeição de cargas

Este estudo consiste em desconectar a carga do restante do sistema depois de decorrido algum tempo de simulação (sistema em regime).

Faltas internas aplicadas em ambos os lados do transformador

Consiste na divisão dos enrolamentos primário e secundário do transformador em diversos enrolamentos de diferentes tamanhos, aplicando-se faltas fase-terra e faltas entre espiras nesses enrolamentos, através de chaves conectadas entre a fase A e a terra e chaves conectadas entre espiras, respectivamente. As situações descritas como faltas internas que ocorrem no lado secundário do transformador de potência constituem importantes casos a serem estudados e devem ser incluídos na formação do banco de dados final do trabalho devido à sua peculiaridade e importância.

Remoção de faltas externas no lado secundário do transformador

Esta simulação consiste em abrir as chaves do lado secundário do transformador algum tempo depois da ocorrência de uma falta aplicada na linha e próxima ao equipamento.

Sobre-excitação no transformador

Uma situação de sobre-excitação acontece quando o transformador de potência fica exposto a níveis de tensão superiores aos nominais. Este fenômeno pode ocorrer na energização ou no desligamento do equipamento, assim como em casos de rejeição de cargas remotas. Tais casos trazem como consequência sinais transitórios caracterizados pela presença de componentes de 5º harmônico, bem como a possibilidade de presença de correntes diferenciais devido à saturação do núcleo do transformador, podendo ocasionar a má operação do relé diferencial de proteção do transformador de potência. A simulação consiste na aplicação de bancos de capacitores no lado primário do transformador de potência a fim de se produzir elevações de tensão no mesmo que possam caracterizar situações de sobre-excitação no equipamento.

As situações descritas são importantes para a realização de testes nos algoritmos propostos de proteção, como também no algoritmo tradicional baseado na filtragem harmônica de Fourier.

Energização de bancos de capacitores

Para a simulação das situações de energização de bancos de capacitores, inseriram-se nos arquivos valores relativos a tais equipamentos, alocados nas linhas do lado primário do transformador de potência. Tais simulações serão de grande importância na pesquisa desenvolvida, pois se tratam de situações nas quais são gerados sinais transitórios críticos e comuns ao sistema elétrico, importantes na avaliação final dos algoritmos propostos no trabalho.

4.6.2 Resultados Obtidos

A seguir serão mostrados alguns dos resultados obtidos com a simulação do sistema de potência no programa ATP, referentes aos casos citados na seção anterior. Para alguns casos, serão ilustradas também situações nas quais ocorre o fenômeno de saturação dos TCs, para efeito comparativo entre os sinais estudados. Os demais casos simulados serão ilustrados no APÊNDICE B.

A FIGURA 31 e a FIGURA 32 trazem situações de energização. Na FIGURA 31, a energização acontece sob tensão de 112,7 kV (valor de pico fase-neutro), quando as fases A,B e C são fechadas todas no instante 6 ms. A FIGURA 32 é análoga à anterior, porém com instantes de fechamentos das fases A,B e C de 7, 9 e 11 ms, respectivamente. A FIGURA 33 ilustra um caso de energização sob um valor de tensão de 118 kV com instantes de fechamentos das fases A,B e C de 6, 11 e 15 ms, respectivamente. Neste caso, pode-se observar a presença do fenômeno de saturação nos sinais. Na FIGURA 34 há a representação de um caso de energização em 5, 7 e 9 ms para as fases A, B e C respectivamente com a presença de uma falta interna entre espira e terra em 50% do enrolamento da fase A. A FIGURA 35, FIGURA 36, FIGURA 37 e FIGURA 38 ilustram situações de faltas internas ao transformador, ocorridas de espira a terra. Na FIGURA 35, a falta interna ocorre no instante 10 ms, em 10% do enrolamento da fase A, sob tensão de 112,7 kV (valor de pico fase-neutro) e carga de 10 MVA. A FIGURA 36 mostra um caso de falta interna

em 10% do enrolamento da fase A, ocorrida em 15 ms, sob tensão de 112,7 kV e carga de 12 MVA. Observa-se, nesse caso, a presença do fenômeno de saturação dos TCs, distorcendo a forma de onda do sinal obtido. A FIGURA 37 é análoga à FIGURA 35, porém com o enrolamento afetado em 50%. Nota-se nesta figura, que as fases A e B são coincidentes. Para a FIGURA 38, a situação é semelhante, embora a percentagem de enrolamento afetado nesse caso é de 70%. A FIGURA 39 mostra um caso de falta interna com 10% do enrolamento da fase A envolvido, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador, onde se pode notar a presença do fenômeno de saturação dos TCs. Na FIGURA 40 e FIGURA 41 observam-se casos análogos ao anterior, porém com as faltas internas envolvendo 50 e 90% do enrolamento da fase A, respectivamente. Observa-se novamente nesses casos a presença de saturação dos transformadores de corrente.

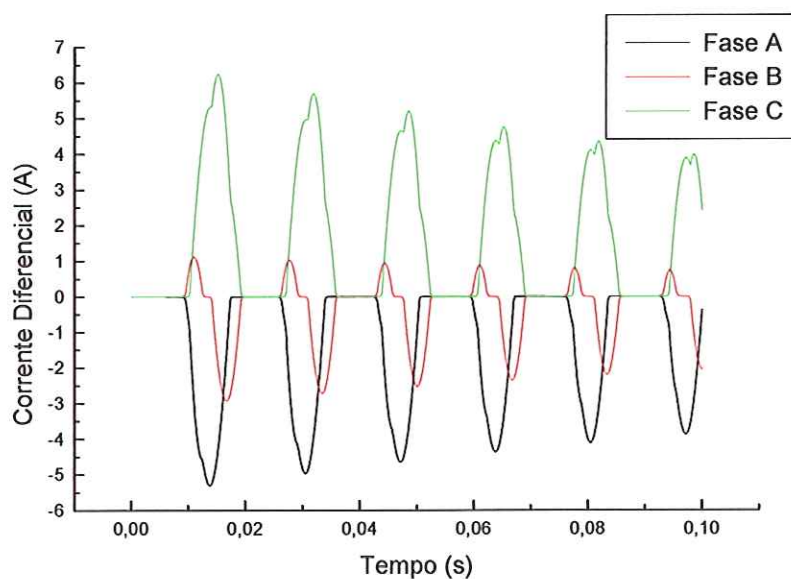


FIGURA 31 - Condição de energização com tensão=112,7 kV e fechamento em 6 ms na fase A, 6 ms na fase B e 6 ms na fase C

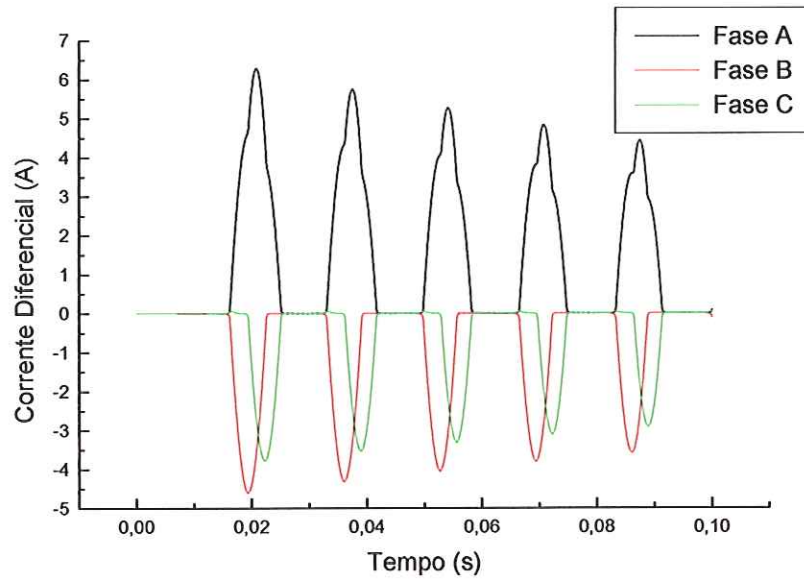


FIGURA 32 - Condição de energização com tensão=112,7 kV e fechamento em 7 ms na fase A, 9 ms na fase B e 11 ms na fase C

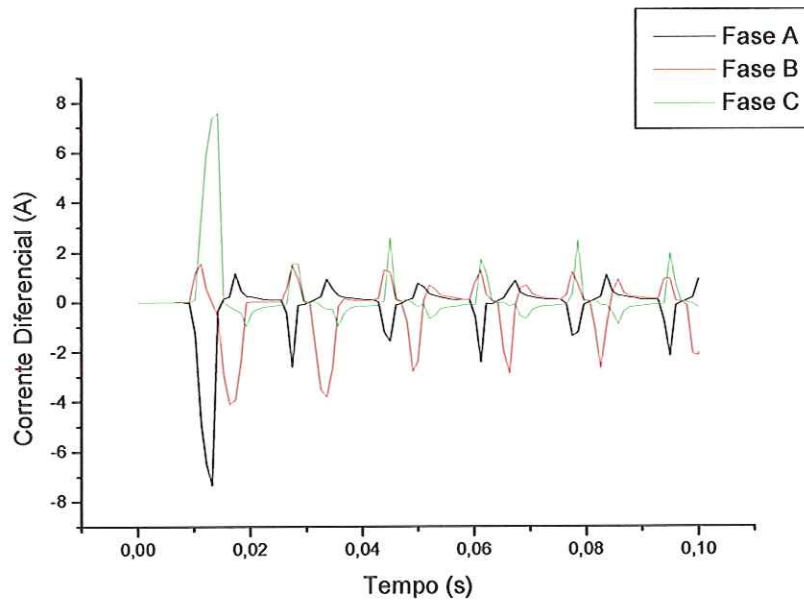


FIGURA 33 - Condição de energização com tensão=118,0 kV e fechamento em 6 ms na fase A, 11 ms na fase B e 15 ms na fase C com a presença de saturação dos TCs

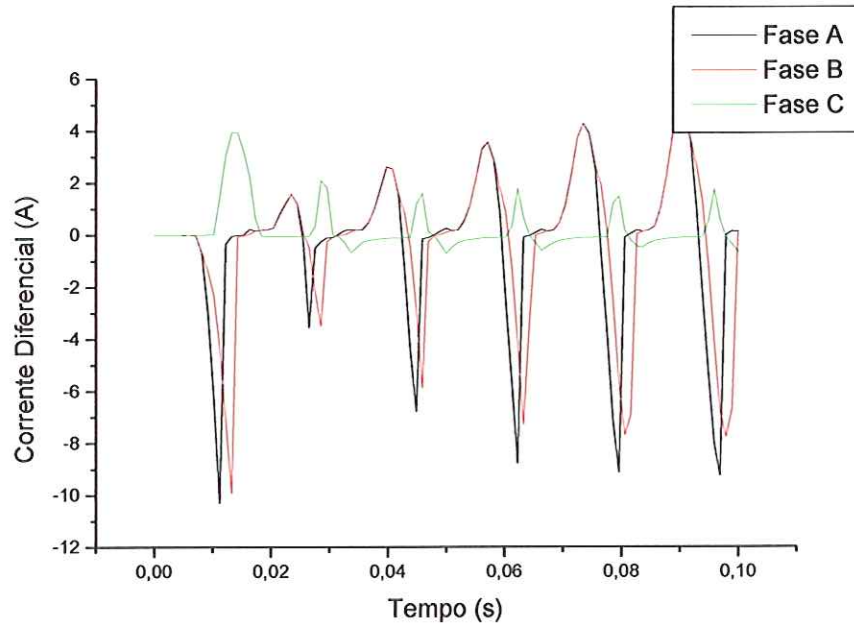


FIGURA 34 - Condição de energização com tensão=112,7 kV e fechamento em 5 ms na fase A, 7 ms na fase B e 9 ms na fase C, com falta interna entre espira e terra em 50% do enrolamento

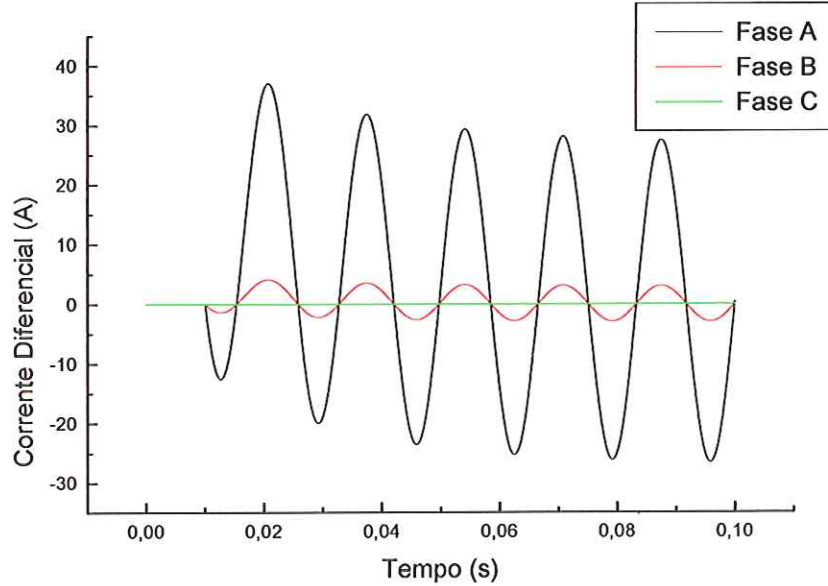


FIGURA 35 - Condição de falta interna entre espira e terra em 10% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

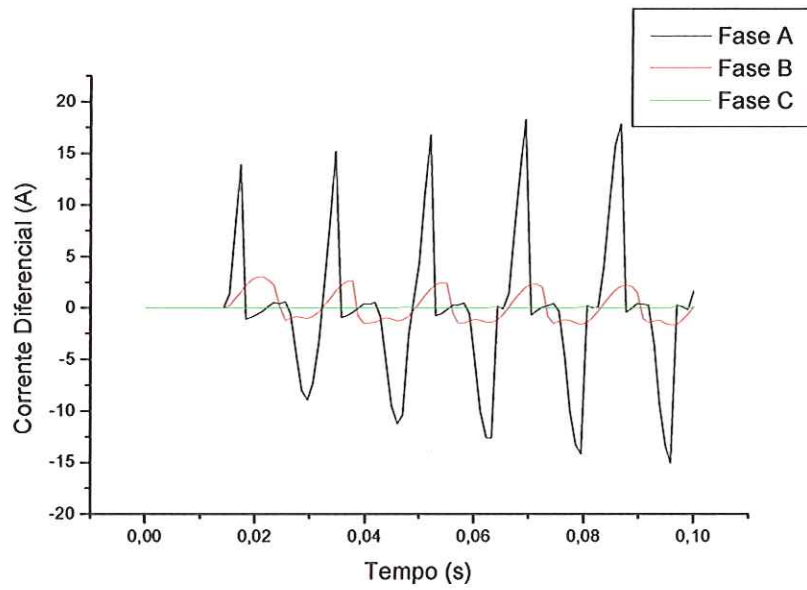


FIGURA 36 - Condição de falta interna entre espira e terra em 10% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=12 MVA em 15 ms com a presença de saturação dos TCs

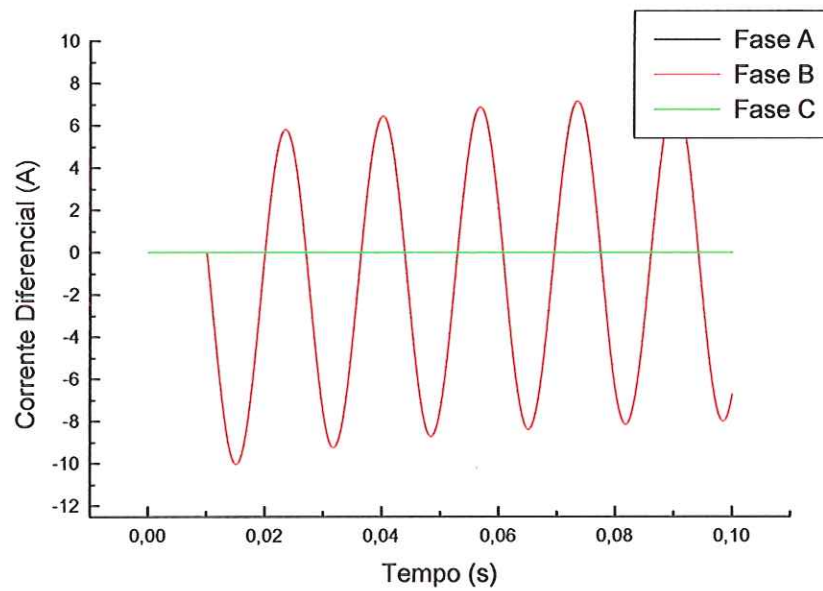


FIGURA 37 - Condição de falta interna entre espira e terra em 50% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

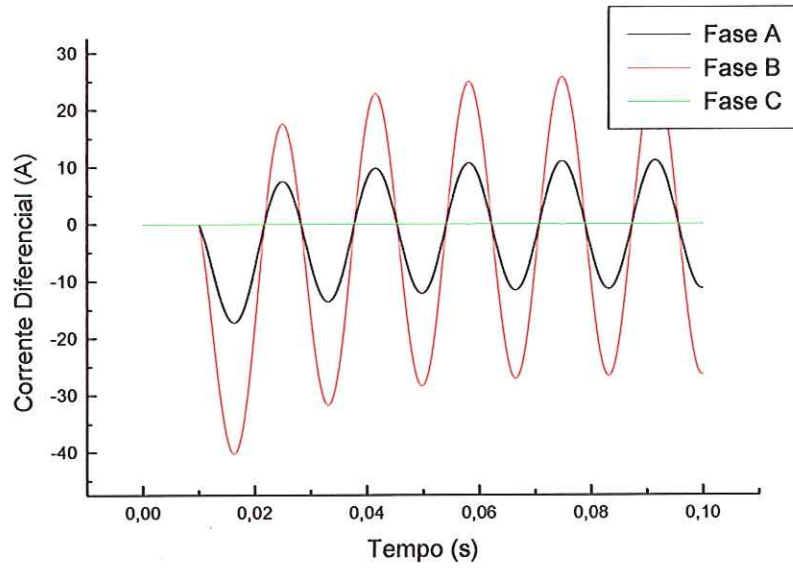


FIGURA 38 - Condição de falta interna entre espira e terra em 70% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

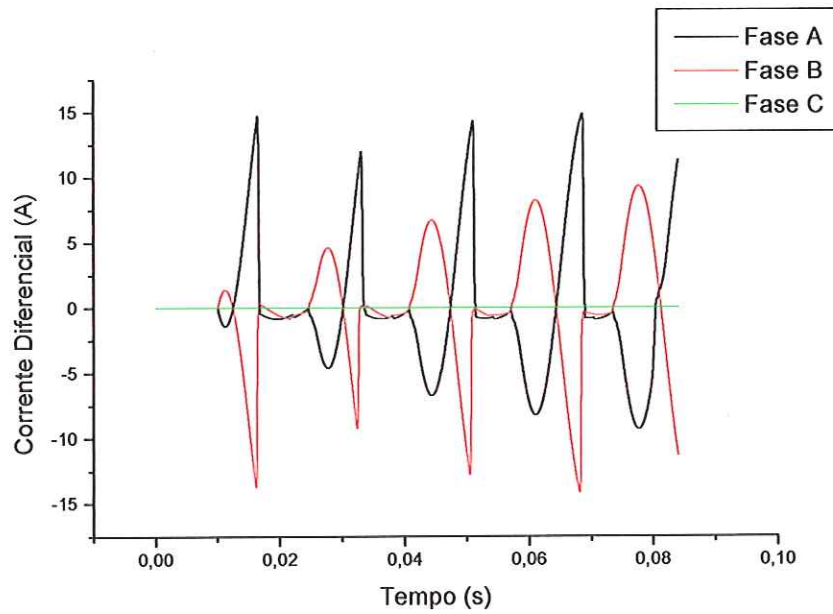


FIGURA 39 – Caso de falta interna em 10% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador com a presença de saturação dos TCs

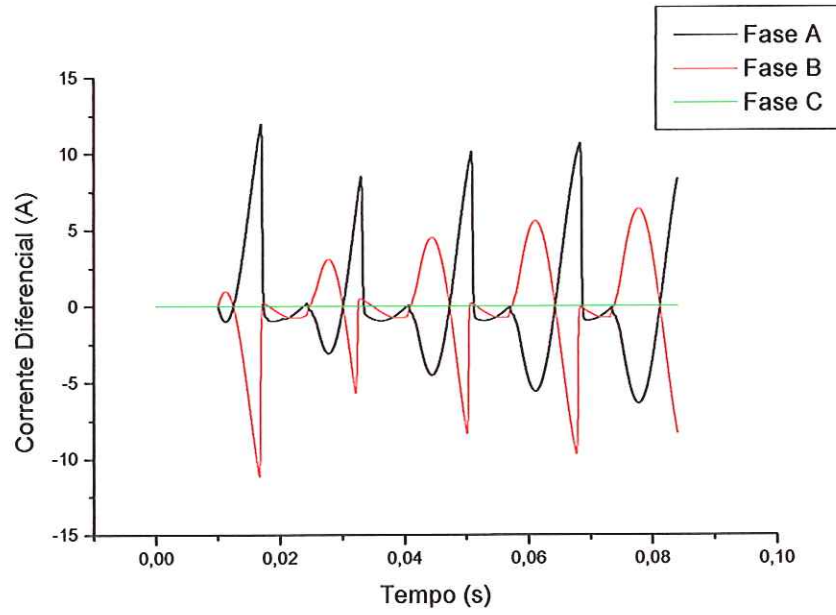


FIGURA 40 – Caso de falta interna em 50% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador com a presença de saturação dos TCs

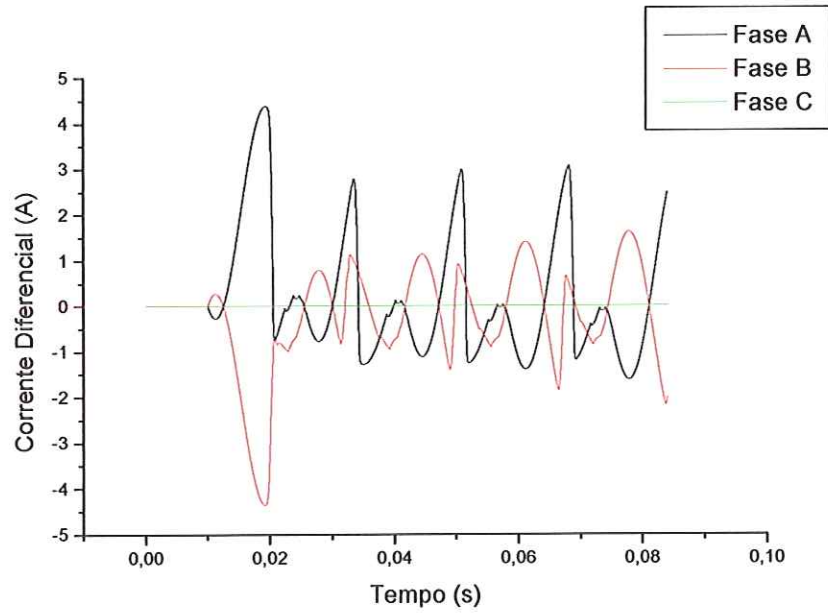


FIGURA 41 – Caso de falta interna em 90% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10ms no lado secundário do transformador com a presença de saturação dos TCs

Com o intuito de gerar uma quantidade suficiente e diversificada de dados, englobando uma gama de situações presentes em casos reais, os arquivos de dados de entrada do programa ATP foram submetidos a alguns programas adicionais em linguagem FORTRAN, a fim de efetuar-se todas as combinações de valores pretendidas no trabalho. Da TABELA 5 à TABELA 14 são mostradas as combinações de casos utilizados na geração do conjunto de dados de todas as situações envolvidas no trabalho, considerando-se o transformador originalmente modelado. Na TABELA 5, é ilustrada a combinação de parâmetros realizada na simulação dos casos de energização do transformador. Os valores de tensão primária da primeira coluna foram combinados aos instantes de fechamentos das chaves da segunda coluna, resultando em um total de 108 arquivos de dados. Na TABELA 6, são mostrados os valores variados nos casos de energização com a presença de falta interna ao transformador. Os valores de tensão primária da primeira coluna combinaram-se aos valores dos instantes de fechamentos das chaves e aos valores de percentagem do enrolamento envolvido na aplicação das faltas (10, 30, 50 e 90%), totalizando 72 casos. A TABELA 7 mostra a variação de parâmetros na elaboração do banco de dados relativo às faltas internas ao transformador, considerando-se faltas de espira à terra, faltas entre espiras, de ambos os lados do transformador. Desta forma, os valores de carga combinaram-se aos valores de percentagem dos enrolamentos envolvidos na aplicação das faltas e aos valores dos ângulos de inepção das faltas, totalizando assim 432 casos. Na TABELA 8, pode-se observar a combinação de valores realizada a fim de formar os arquivos de dados para os casos de faltas ocorrendo entre o transformador e o TC secundário. Os valores de carga do sistema foram combinados aos valores de resistência de falta e aos valores dos ângulos de inepção das faltas. Tal banco de dados totalizou 81 situações. Destaca-se que esse tipo de caso foi considerado devido ao fato do mesmo conter formatos de onda diferentes daqueles de faltas internas e externas ao transformador. A TABELA 9 traz os parâmetros variados para os casos de faltas externas ao transformador de potência. Da mesma forma que a combinação anterior, esses casos variaram a carga, a resistência da falta e o ângulo de inepção da mesma. Os casos de remoção de faltas externas foram simulados conforme a combinação de valores ilustrados na próxima TABELA 10. Para estes casos, os parâmetros variados foram: tensão, o

instante de fechamento das chaves, a carga e a resistência de falta. Na TABELA 11 seguinte, pode-se notar o conjunto de valores combinados na formação dos casos de rejeição de cargas. Tais situações foram simuladas através da variação dos valores de tensão, dos instantes de fechamento das chaves do sistema e das cargas. Os casos de sobre-excitação do transformador foram elaborados conforme a variação de valores mostrados na TABELA 12. Nestes casos, os parâmetros combinados foram a tensão, as capacitâncias utilizadas na elevação da tensão do transformador e os instantes de fechamento das chaves. Na elaboração do banco de dados correspondente aos casos de energização de bancos de capacitores, os parâmetros variados foram a tensão, os valores de capacitância dos bancos empregados, além dos instantes em que as chaves de energização são fechadas, como pode ser observado na TABELA 13. Por fim, são ilustrados na TABELA 14, os valores combinados nas simulações dos casos de regime permanente do sistema. Os parâmetros combinados foram a tensão e a carga do sistema elétrico. Ressalta-se que, em todas as tabelas citadas, os valores de tensão empregados foram os valores eficazes.

A seguir, são mostradas as tabelas citadas anteriormente, ilustrando as combinações de parâmetros realizadas na formação de todos os casos constantes no banco de dados completo utilizado no trabalho.

TABELA 5 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização do transformador

| Tensão (kV) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | |
|-------------|--|--------|--------|
| | Fase A | Fase B | Fase C |
| 107,0 | 6 | 6 | 6 |
| 109,0 | 6 | 6 | 10 |
| 112,7 | 6 | 7 | 6 |
| 114,0 | 6 | 7 | 10 |
| 116,0 | 6 | 9 | 12 |
| 118,0 | 6 | 11 | 15 |
| | 7 | 9 | 11 |
| | 7 | 11 | 7 |
| | 7 | 11 | 12 |
| | 7 | 6 | 9 |
| | 7 | 7 | 6 |
| | 7 | 7 | 7 |
| | 9 | 9 | 13 |
| | 9 | 10 | 13 |
| | 9 | 6 | 6 |
| 9 | 9 | 12 | |
| 9 | 7 | 10 | |
| 9 | 11 | 7 | |

TABELA 6 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização do transformador com a presença de faltas internas

| Tensão (kV) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | | % do enrolamento envolvido na aplicação da falta |
|-------------|--|--------|--------|--|
| | Fase A | Fase B | Fase C | |
| 107,0 | 6 | 6 | 10 | 10,0 |
| 112,7 | 6 | 9 | 12 | 30,0 |
| 118,0 | 7 | 11 | 12 | 50,0 |
| | 7 | 7 | 6 | 90,0 |
| | 9 | 9 | 12 | |
| | 9 | 11 | 7 | |

TABELA 7 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas internas ao transformador

| Tensão (kV) | Carga (MVA) | % do enrolamento envolvido na aplicação da falta | Ângulo de inepção (graus) | |
|-------------|-------------|--|---------------------------|-------|
| 112,7 | 8,0 | 10,0 | 43,0 | |
| | 10,0 | 30,0 | 65,0 | |
| | 12,0 | 50,0 | 50,0 | 108,0 |
| | | 90,0 | 90,0 | 173,0 |
| | | | | 216,0 |
| | | | | 238,0 |
| | | | | 260,0 |
| | | 281,0 | | |
| | | 324,0 | | |

TABELA 8 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas ocorridas entre o transformador e o TC

| Tensão (kV) | Carga (MVA) | Resistência de falta (Ω) | Ângulo de inepção (graus) | |
|-------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------|-------|
| 112,7 | 8,0 | 25,0 | 43,0 | |
| | 10,0 | 50,0 | 65,0 | |
| | 12,0 | 100,0 | 100,0 | 108,0 |
| | | | | 173,0 |
| | | | | 216,0 |
| | | | | 238,0 |
| | | | | 260,0 |
| | | 281,0 | | |
| | | 324,0 | | |

TABELA 9 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas externas ao transformador

| Tensão (kV) | Carga (MVA) | Resistência de falta (Ω) | Ângulo de inepção (graus) | |
|-------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------|-------|
| 112,7 | 8,0 | 25,0 | 43,0 | |
| | 10,0 | 50,0 | 65,0 | |
| | 12,0 | 100,0 | 100,0 | 108,0 |
| | | | | 173,0 |
| | | | | 216,0 |
| | | | | 238,0 |
| | | | | 260,0 |
| | | 281,0 | | |
| | | 324,0 | | |

TABELA 10 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de remoção de faltas externas ao transformador

| Tensão (kV) | Instante de abertura das chaves (ms) | | | Carga (MVA) | Resistência de falta (Ω) |
|-------------|--------------------------------------|--------|--------|-------------|-----------------------------------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | | |
| 107,0 | 6 | 6 | 10 | 8,0 | 25,0 |
| 112,7 | 6 | 9 | 12 | 10,0 | 50,0 |
| 118,0 | 7 | 11 | 12 | 12,0 | 100,0 |
| | 7 | 7 | 6 | | |
| | 9 | 9 | 12 | | |
| | 9 | 11 | 7 | | |

TABELA 11 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de rejeição de cargas

| Tensão (kV) | Instante de abertura das chaves (ms) | | | Carga (MVA) |
|-------------|--------------------------------------|--------|--------|-------------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | |
| 107,0 | 6 | 6 | 10 | 8,0 |
| 112,7 | 6 | 9 | 12 | 10,0 |
| 118,0 | 7 | 11 | 12 | 12,0 |
| | 7 | 7 | 6 | |
| | 9 | 9 | 12 | |
| | 9 | 11 | 7 | |

TABELA 12 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de sobre-excitação do transformador

| Tensão (kV) | Capacitâncias (μF) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | |
|-------------|---------------------------------|--|--------|--------|
| | | Fase A | Fase B | Fase C |
| 107,0 | 70,0 | 6 | 6 | 10 |
| 112,7 | 80,0 | 7 | 9 | 11 |
| 118,0 | 90,0 | 7 | 11 | 12 |
| | | 9 | 10 | 13 |
| | | 9 | 7 | 10 |

TABELA 13 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização de bancos de capacitores

| Tensão (kV) | Capacitâncias (μF) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | |
|-------------|---------------------------------|--|--------|--------|
| | | Fase A | Fase B | Fase C |
| 107,0 | 10,0 | 6 | 6 | 10 |
| 118,0 | 20,0 | 7 | 9 | 11 |
| | | 7 | 11 | 12 |
| | | 9 | 10 | 13 |
| | | 9 | 7 | 10 |

TABELA 14 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de regime permanente

| Tensão (kV) | Carga (MVA) |
|-------------|-------------|
| 107,0 | 8,0 |
| 112,7 | 10,0 |
| 118,0 | 12,0 |

Após a geração dos dados, processo que envolveu a execução pelo programa ATP de todos os arquivos mostrados, os dados numéricos resultantes foram submetidos ao próximo passo, que consistiu de um programa destinado a organizar os valores em vetores, a fim de serem usados como entradas para os simuladores de redes neurais SNNS – *Stuttgart Neural Network Simulator* [66] e MATLAB [67].

4.7 Transformador Alternativo Modelado

Uma etapa importante a ser considerada no desenvolvimento da pesquisa é a validação dos resultados obtidos em um sistema elétrico de configuração diferente daquela utilizada para a geração inicial dos dados de treinamento e testes das RNAs. Esta análise indicará se a ferramenta inteligente desenvolvida no trabalho possui a flexibilidade esperada a fim de ser empregada com precisão e confiabilidade em um sistema elétrico de características diferentes. Para tanto, mais de um modelo de transformador será necessário para a representação dos sistemas elétricos a serem avaliados no projeto.

Atendendo às necessidades mencionadas, elaboraram-se os cálculos para a construção de novos arquivos de dados de entrada para o programa ATP referentes à simulação de um transformador de potência de 6,25 MVA, relação de tensão 69/13,8 kV, cujos parâmetros foram fornecidos pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Tais cálculos, por serem análogos aos realizados para o transformador de 25 MVA, são mostrados no APÊNDICE C.

4.7.1 Simulações Realizadas

Analogamente aos arquivos de dados elaborados para o transformador inicial modelado e descrito no item 4.6.1, foram construídos arquivos de simulação computacional para o transformador de 6,5 MVA através da variação dos mesmos parâmetros mostrados para o primeiro transformador.

Desta forma, da TABELA 15 à TABELA 24 a seguir, observa-se a combinação dos valores empregados nos diversos casos estudados.

Na TABELA 15, estão os valores de parâmetros a serem combinados para a geração dos casos de energização do transformador. A TABELA 16 ilustra os valores utilizados para a geração das situações de energização com a presença de faltas internas ao transformador. Os casos de falta interna ao transformador de potência foram simulados com a utilização dos valores presentes na TABELA 17. Analogamente, os casos de faltas ocorrendo entre o transformador e o TC secundário foram construídos conforme os parâmetros ilustrados na TABELA 18. A TABELA 19 traz a variação de parâmetros empregados na formação do banco de dados dos casos de faltas externas ao transformador. Na simulação das situações de remoção de faltas externas ao transformador, utilizaram-se os valores constantes da TABELA 20. Para a geração do banco de dados de casos de rejeição de cargas, os parâmetros mostrados na TABELA 21 foram utilizados e a próxima TABELA 22 mostra os valores usados na formação das situações de sobre-excitação do transformador. Por fim, os casos de energização de bancos de capacitores e de regime permanente foram simulados através da combinação de parâmetros que podem ser observados na TABELA 23 e na TABELA 24 respectivamente.

TABELA 15 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização do transformador

| Tensão (kV) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | |
|-------------|--|--------|--------|
| | Fase A | Fase B | Fase C |
| 53,58 | 6 | 6 | 6 |
| 54,70 | 6 | 6 | 10 |
| 56,40 | 6 | 7 | 6 |
| 57,50 | 6 | 7 | 10 |
| 58,30 | 6 | 9 | 12 |
| 59,22 | 6 | 11 | 15 |
| | 7 | 9 | 11 |
| | 7 | 11 | 7 |
| | 7 | 11 | 12 |
| | 7 | 6 | 9 |
| | 7 | 7 | 6 |
| | 7 | 7 | 7 |
| | 9 | 9 | 13 |
| | 9 | 10 | 13 |
| | 9 | 6 | 6 |
| | 9 | 9 | 12 |
| | 9 | 7 | 10 |
| | 9 | 11 | 7 |

TABELA 16 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização com a presença de faltas internas ao transformador

| Tensão (kV) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | | % do enrolamento envolvido na aplicação da falta |
|-------------|--|--------|--------|--|
| | Fase A | Fase B | Fase C | |
| 53,58 | 6 | 6 | 10 | 10,0 |
| 56,40 | 6 | 9 | 12 | 30,0 |
| 59,22 | 7 | 11 | 12 | 50,0 |
| | 7 | 7 | 6 | 90,0 |
| | 9 | 9 | 12 | |
| | 9 | 11 | 7 | |

TABELA 17 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas internas ao transformador

| Tensão (kV) | Carga (MVA) | % do enrolamento envolvido na aplicação da falta | Ângulo de inepção (graus) |
|-------------|-------------------|--|---------------------------|
| 56,40 | 4,0 5,0 6,0 | 10,0 | 43,0 |
| | | 30,0 | 65,0 |
| | | 50,0 | 108,0 |
| | | 90,0 | 173,0 |
| | | | 216,0 |
| | | | 238,0 |
| | | | 260,0 |
| | 281,0 | | |
| | 324,0 | | |

TABELA 18 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas ocorrendo entre o transformador e o TC secundário

| Tensão (kV) | Carga (MVA) | Resistência de falta (Ω) | Ângulo de injeção (graus) |
|-------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 56,40 | 4,0 | 25,0 | 43,0 |
| | 5,0 | 50,0 | 65,0 |
| | 6,0 | 100,0 | 108,0 |
| | | | 173,0 |
| | | | 216,0 |
| | | | 238,0 |
| | | | 260,0 |
| | | 281,0 | |
| | | 324,0 | |

TABELA 19 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas externas

| Tensão (kV) | Carga (MVA) | Resistência de falta (Ω) | Ângulo de injeção (graus) |
|-------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 56,40 | 4,0 | 25,0 | 43,0 |
| | 5,0 | 50,0 | 65,0 |
| | 6,0 | 100,0 | 108,0 |
| | | | 173,0 |
| | | | 216,0 |
| | | | 238,0 |
| | | | 260,0 |
| | | 281,0 | |
| | | 324,0 | |

TABELA 20 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de remoção de faltas externas ao transformador

| Tensão (kV) | Instante de abertura das chaves (ms) | | | Carga (MVA) | Resistência de falta (Ω) |
|-------------|--------------------------------------|--------|--------|-------------|-----------------------------------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | | |
| 53,58 | 6 | 6 | 10 | 4,0 | 25,0 |
| 56,40 | 6 | 9 | 12 | 5,0 | 50,0 |
| 59,22 | 7 | 11 | 12 | 6,0 | 100,0 |
| | 7 | 7 | 6 | | |
| | 9 | 9 | 12 | | |
| | 9 | 11 | 7 | | |

TABELA 21 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de rejeição de cargas

| Tensão (kV) | Instante de abertura das chaves (ms) | | | Carga (MVA) |
|-------------|--------------------------------------|--------|--------|-------------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | |
| 53,58 | 6 | 6 | 10 | 4,0 |
| 56,40 | 6 | 9 | 12 | 5,0 |
| 59,22 | 7 | 11 | 12 | 6,0 |
| | 7 | 7 | 6 | |
| | 9 | 9 | 12 | |
| | 9 | 11 | 7 | |

TABELA 22 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de sobre-excitação do transformador

| Tensão (kV) | Capacitâncias (μF) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | |
|-------------|---------------------------------|--|--------|--------|
| | | Fase A | Fase B | Fase C |
| 53,58 | 6,0 | 6 | 6 | 10 |
| 56,40 | 7,0 | 7 | 9 | 11 |
| 59,22 | 8,0 | 7 | 11 | 12 |
| | | 9 | 10 | 13 |
| | | 9 | 7 | 10 |

TABELA 23 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de energização de bancos de capacitores

| Tensão (kV) | Capacitâncias (μF) | Instante de fechamento das chaves (ms) | | |
|-------------|---------------------------------|--|--------|--------|
| | | Fase A | Fase B | Fase C |
| 53,58 | 5,0 | 6 | 6 | 10 |
| 59,22 | 7,0 | 7 | 9 | 11 |
| | 9,0 | 7 | 11 | 12 |
| | | 9 | 10 | 13 |
| | 9 | 7 | 10 | |

TABELA 24 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de regime permanente

| Tensão (kV) | Carga (MVA) |
|-------------|-------------|
| 53,58 | 4,0 |
| 56,40 | 5,0 |
| 59,22 | 6,0 |

4.7.2 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos pela simulação do sistema de potência no programa ATP, referentes aos casos citados na seção anterior para o transformador de 6,5 MVA modelado, serão ilustrados no APÊNDICE D. Com o propósito de melhor ilustrar um dos principais problemas descritos neste trabalho, as figuras mostram casos que contêm o efeito de saturação dos transformadores de corrente.

5 ALGORITMOS APLICADOS À PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

O presente capítulo tem por objetivo apresentar um breve histórico sobre a evolução dos relés, sua arquitetura e seus algoritmos. Desta forma, é apresentado o algoritmo convencional do relé diferencial, bem como o algoritmo proposto, contando com o auxílio de Redes Neurais Artificiais.

5.1 A Evolução dos Relés

Os primeiros relés conhecidos eram dispositivos eletromecânicos que necessitavam de constantes ajustes e aperfeiçoamentos, apesar de sua evidente robustez.

Com o desenvolvimento da tecnologia, estes equipamentos tornaram-se cada vez mais precisos e confiáveis, proporcionando ainda maior rapidez na operação da proteção. No início dos anos 60, quando aconteceu a explosão da tecnologia eletrônica, surgiu um novo conceito relacionado a esse tipo de aplicação [3]. Tivemos assim, a criação dos dispositivos transistorizados. Este conceito trouxe significativos avanços para a área de proteção de transformadores e para muitos outros setores. Estes avanços ocorreram obviamente no sentido do fornecimento de uma maior precisão na operação, mas também se conseguiu paralelamente uma grande redução no custo de produção dos relés. Isso se deve ao fato de que, a essa altura, não era mais necessária uma construção mecânica refinada, como no caso dos relés anteriores [3]. A partir daí, foram empreendidas muitas pesquisas com o objetivo de tornar cada vez mais próximos os requisitos de menor custo e maior desempenho.

Quando despontou a era da tecnologia digital, atingiu-se o ápice nos conceitos de rapidez e precisão dos equipamentos de proteção da época. Dessa forma, aconteceu a substituição dos circuitos analógicos empregados até então. Esse avanço permitiu a utilização de características importantes nos dispositivos, como por exemplo, a propriedade de auto-monitoramento [1] que os relés atuais possuem, obtendo a importante vantagem de não mais necessitar de manutenção frequente.

Como destacado anteriormente, uma das principais vantagens adicionais dos relés digitais ou microprocessados é a possibilidade do acompanhamento de várias funções de proteção no mesmo equipamento [1], tais como:

Rotinas de auto- Checagem

Permitem que o próprio relé faça as verificações de suas condições de funcionamento, aumentando a confiabilidade da operação.

Registro de eventos

O relé possui um gravador de sinais registrando os eventos de forma seqüencial, quando da ocorrência de uma perturbação no sistema elétrico. Tais registros são importantes para análises das perturbações.

Medição, oscilografia, etc.

Funções auxiliares úteis em certas aplicações. O relé registra as grandezas analógicas durante as perturbações, que são imprescindíveis nas análises de sinal.

Ainda, podem-se citar outros importantes benefícios obtidos com o emprego do relé digital, tais como:

Redução de custo

Atualmente o relé microprocessado possui um preço equivalente ou mesmo menor que o dos relés convencionais (eletromecânicos). À época de seu surgimento, um relé computadorizado tinha o custo de dez a vinte vezes maior que o do relé convencional [1].

Característica Adaptativa

Sendo o dispositivo programável, este pode mudar suas características para uma melhor adaptação às alterações no sistema.

Cabe salientar, porém, a necessidade de técnicas de processamento digital de sinais como um requisito para a operação do relé. São também necessários a aquisição e o tratamento dos dados para uma correta operação do equipamento.

5.2 Arquitetura do Relé

A viabilização da função de proteção diferencial através do emprego de tecnologia digital implica na conversão analógico-digital das grandezas monitoradas e do processamento desses valores através de um *hardware* digital que executa o algoritmo de proteção, gerando um sinal para o eventual desligamento do equipamento, através de algum tipo de chave apropriada. A FIGURA 42 ilustra resumidamente o diagrama funcional do relé digital de transformadores [1].

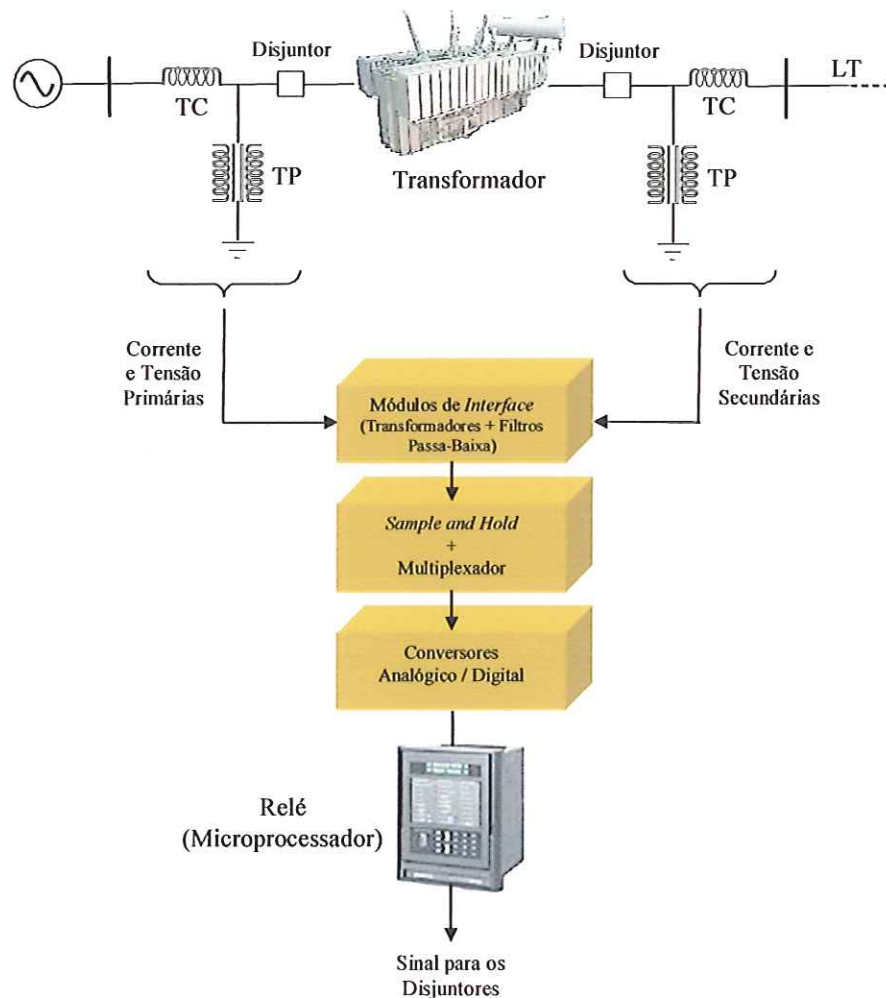


FIGURA 42 - Diagrama funcional do relé digital

As grandezas necessárias à operação de proteção (tensão e corrente) são monitoradas e filtradas, onde são evitados alguns problemas que serão descritos oportunamente.

Estes sinais de tensão e corrente provenientes dos TPs e TCs são reduzidos para níveis computacionais ($\sim 10V$) adequados aos circuitos do relé nos Módulos de *Interface*. Nesta fase de entradas analógicas, também são realizadas as isolações galvânicas, a proteção elétrica contra surtos e o acondicionamento. Ali também são transformados os sinais de corrente em sinais de tensão, e estes sinais são submetidos a um filtro analógico passa-baixa *anti-aliasing* para limitar a faixa das frequências de entrada [1].

Nos módulos *Sample and Hold*, Multiplexador e Conversor A/D (analógico / digital) é feita a digitalização do sinal de entrada e estes são tratados assim até o final do processo. Entende-se por final do processo o envio ou o bloqueio de um sinal de abertura para o disjuntor correspondente. A função da etapa *Sample and Hold* é evitar que os sinais provenientes de todas as fases do circuito fiquem fora de sincronismo. O Multiplexador canaliza estas informações de maneira a diminuir o número de conversores A/D necessários para a conversão.

Finalmente os sinais entram no Microprocessador para a tomada de decisão 0 ou 1, isto é, bloqueio ou abertura do disjuntor.

* O algoritmo do relé é, portanto, o conjunto de rotinas de proteção que recebem os sinais convertidos para sinais digitais, executam a seqüência determinada de funções, fazem o julgamento da informação e decidem sobre a atuação ou não da proteção. Tal decisão, baseada em parâmetros previamente ajustados, poderá resultar em um sinal de desligamento enviado aos disjuntores do equipamento protegido.

Existe ainda uma função de ajuste, rotina que permite introduzir na lógica do relé os valores fixados pelo usuário de acordo com a necessidade da aplicação. No caso do relé diferencial, estes ajustes envolvem principalmente os níveis de restrição percentual e de harmônicos.

O sistema de saída de dados digitais, em comunicação com o disjuntor, é encarregado de comandar as ações dos dispositivos de desligamento com capacidade de promover a atuação de chaves e contatos em campo, além de representar todas as informações disponíveis para o dispositivo na forma de saídas digitais.

Além da funcionalidade do dispositivo, existe ainda um compromisso do equipamento em executar a função de proteção e gerar a saída num espaço de tempo curto, o suficiente para que o defeito existente não danifique ainda mais a área afetada ou comprometa a integridade do sistema no qual ele opera. Desta forma, é interessante que o algoritmo aplicado apresente um conjunto de operações matemáticas que exijam pouco tempo e esforço de processamento, sem que para isso ele se torne menos sensível e eficiente.

5.3 Algoritmo Convencional do Relé Diferencial Digital

A lógica de processamento do relé convencional, incluindo a proteção diferencial com restrição harmônica, é exibida na FIGURA 43 a seguir, segundo [3].

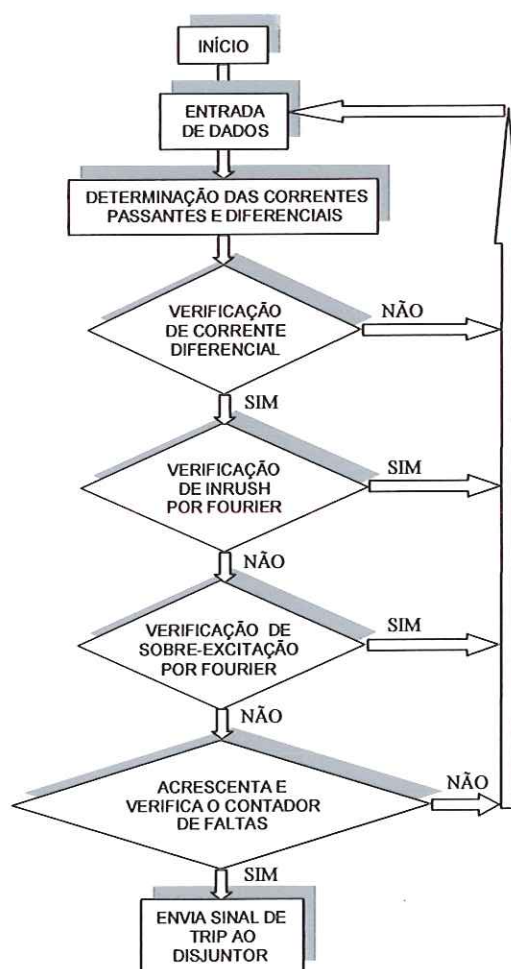


FIGURA 43 - Lógica de processamento do relé digital convencional

✂ Após o cálculo inicial das correntes passantes e diferenciais, o algoritmo do relé faz a verificação de em qual região da curva característica do relé (FIGURA 3) o sinal está classificado, ou seja, o relé determina se o sinal está contido na zona de restrição ou de operação do relé, de acordo com o ajuste de restrição percentual escolhido. Caso o sinal seja classificado no interior da zona de restrição, o algoritmo retorna ao seu ponto inicial. Caso contrário, é calculada a composição harmônica dos sinais para a verificação das restrições de 2º e 5º harmônicos. Se o nível harmônico encontrado for suficiente para representar uma situação de energização (*inrush*), o relé retorna à entrada de dados. Se não ficar caracterizado o caso de magnetização, o processo passa então a considerar a possibilidade de uma falta interna ao sistema. Porém, o algoritmo ainda analisa a possibilidade de sobre-excitação do transformador. Novamente, se o conteúdo harmônico do sinal representar um caso de sobre-excitação, o relé retorna à leitura de dados. Caso contrário, o algoritmo passa novamente a considerar o sinal como sendo o de uma falta interna. Finalmente, o relé analisa se o contador de faltas excedeu um valor limite preestabelecido e decide pelo envio do sinal de atuação para o disjuntor ou bloqueio.

A título de esclarecimento do processo, se tivermos um transformador conectado em triângulo-estrela (grupo fasorial DY11), as correntes diferenciais trifásicas que regem o cálculo serão da seguinte forma²:

$$i_{DA} = i_A - (i_a - i_c) \frac{1}{K} \quad (20)$$

$$i_{DB} = i_B - (i_b - i_a) \frac{1}{K} \quad (21)$$

$$i_{DC} = i_C - (i_c - i_b) \frac{1}{K} \quad (22)$$

onde as correntes com índices maiúsculo e minúsculo correspondem às correntes de fase do primário e secundário do transformador, respectivamente.

²As correntes incluídas nas equações (20), (21) e (22) são fasores.

O valor K refere-se à relação dos números de espiras N_1 e N_2 dos lados primário e secundário do transformador, respectivamente. Portanto,

$$K = \frac{N_1}{N_2}$$

Geralmente, um sinal de abertura instantânea é enviado quando o valor do sinal diferencial excede o valor de 10 pu para um número predefinido de amostras consecutivas.

A verificação da restrição de 2º harmônico é feita pela análise da relação $I_2 > C_2 \cdot I_1$, onde I_1 e I_2 são as componentes fundamentais e de 2º harmônico das correntes diferenciais e C_2 é o conteúdo máximo estipulado de 2º harmônico em relação à fundamental, sendo C_2 aproximadamente 12% [21].

Se I_2 exceder este limite, considera-se uma situação de magnetização.

Na verificação da restrição de 5º harmônico o método é análogo, onde, se a relação $I_5 > C_5 \cdot I_1$ for estabelecida, a condição de sobre-excitação é constatada e o relé faz a mudança no valor de *pick-up* da curva para CO' e checa sua declividade (operação ou bloqueio).

5.4 Algoritmos de Proteção Diferencial Propostos com o Auxílio de Redes Neurais Artificiais

O algoritmo da FIGURA 44 ilustra o princípio lógico proposto para o relé diferencial, considerando o emprego da ferramenta baseada em Redes Neurais Artificiais em substituição ao procedimento de extração de componentes harmônicos tradicional.

Neste algoritmo, após a chegada dos sinais ao processador, são calculadas as correntes passantes e diferenciais. Após esta etapa, o relé verifica a ocorrência de correntes diferenciais de valores consideráveis no sistema, analisando a área de operação do dispositivo em função da característica diferencial escolhida, conforme a inclinação ajustada para a curva de restrição percentual do relé. Se a presença de correntes diferenciais não for acusada pelo dispositivo, o algoritmo retorna ao passo

inicial. Caso contrário, o algoritmo realiza a verificação da condição de abertura ou bloqueio do disjuntor através da rede neural artificial. Tal ferramenta substitui então, no algoritmo proposto, a lógica convencional de restrição harmônica baseada na decomposição por Fourier. Se confirmada a condição de acionamento do relé, o algoritmo faz o acréscimo na contagem de sinais de falta e verifica o valor limite para que o contador envie o sinal de desligamento ao disjuntor correspondente. Não havendo a presença de um sinal característico de uma situação de acionamento do disjuntor, o processamento volta à sua etapa inicial, como se pode observar na FIGURA 44.

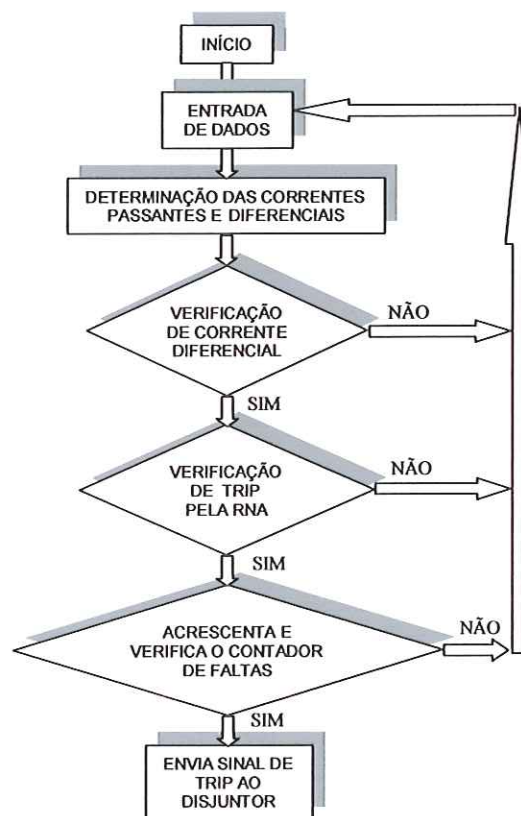


FIGURA 44 - Algoritmo da proteção diferencial proposto com a inclusão do módulo de reconhecimento de padrões por RNA

O algoritmo de proteção mostrado envolve a metodologia proposta na qual os sinais de entrada incluem casos que contêm o efeito da distorção causada pela saturação dos transformadores de corrente. A ferramenta de inteligência artificial

empregada realiza a distinção de situações de acionamento ou bloqueio do disjuntor, respondendo inclusive a dados saturados. A rede neural utilizada neste algoritmo será, portanto, treinada e testada com um banco de dados que contém as situações de saturação mencionadas, além dos casos nos quais o fenômeno de saturação não está presente.

O esquema proposto e ilustrado na próxima FIGURA 45 representa a segunda metodologia empregada neste trabalho, onde os sinais de correntes diferenciais saturados são previamente reconstruídos no início do algoritmo pelas Redes Neurais Artificiais.

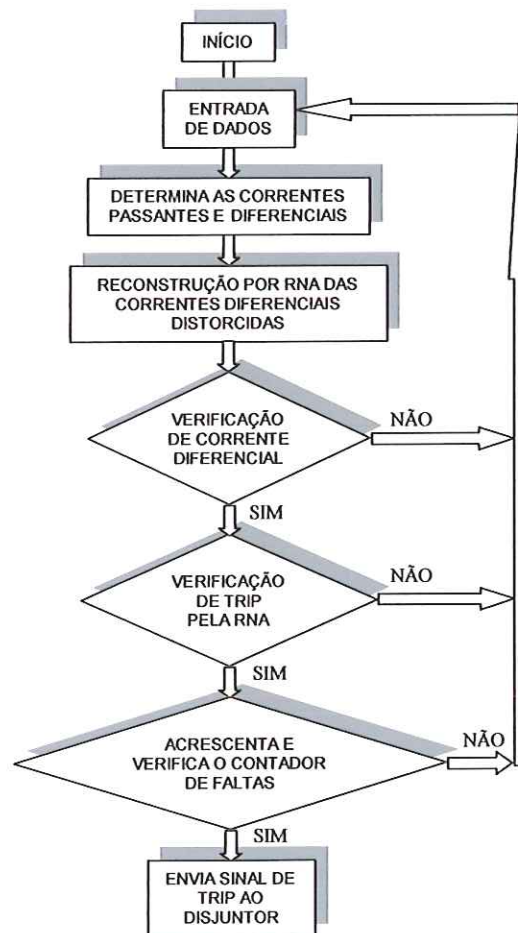


FIGURA 45 - Algoritmo da proteção diferencial proposto com a inclusão dos módulos de reconstrução e reconhecimento de padrões por RNA

O algoritmo mostrado na FIGURA 45 emprega, além da reconstrução de sinais saturados, o mesmo princípio lógico proposto para o relé diferencial mostrado na

FIGURA 44, considerando a aplicação das ferramentas baseadas em Redes Neurais Artificiais em substituição ao procedimento de extração de componentes harmônicos utilizado no algoritmo convencional. Desta forma, o primeiro módulo baseado em RNAs realiza a reconstrução dos sinais e o segundo toma a decisão de abertura ou bloqueio do disjuntor correspondente.

✕ Assim, após a chegada dos sinais ao processador, são calculadas as correntes passantes e diferenciais. Em seguida, os sinais são inseridos no módulo de reconstrução baseado em inteligência artificial. Nesta fase, a ferramenta implementada realiza a reconstrução dos sinais que contêm a distorção causada pelo efeito de saturação dos transformadores de corrente.

Após essa etapa, o relé verifica a ocorrência de correntes diferenciais de valores consideráveis no sistema, analisando a área de operação do dispositivo em função da característica diferencial escolhida, conforme a inclinação ajustada para a curva de restrição percentual do relé. Se a presença de correntes diferenciais não for acusada pelo dispositivo, o algoritmo retorna ao passo inicial.

Caso contrário, o algoritmo realiza a verificação da condição de abertura ou bloqueio, através do segundo módulo de Redes Neurais Artificiais. Se confirmada a condição, o algoritmo faz o acréscimo na contagem de sinais de falta e verifica o valor limite para que o contador envie o sinal de desligamento ao disjuntor correspondente. Não havendo a presença de um sinal característico de uma situação de acionamento do disjuntor, o processamento volta à sua etapa inicial.

Apesar de o algoritmo ilustrado na FIGURA 45 conter duas estruturas neurais implementadas, pretende-se, com essa abordagem, obter uma maior precisão nas respostas finais do algoritmo, devido à eficiência esperada pelo emprego do módulo de reconstrução de sinais distorcidos.

✕ De forma geral, são evidentes as vantagens em substituir-se o reconhecimento de sinais através da análise harmônica por detecção baseada em redes neurais, pois as ferramentas auxiliadas por mecanismos de inteligência artificial oferecem facilidade de implementação em ambientes digitais, maior precisão e confiabilidade, além de alta velocidade de resposta.

No caso do segundo algoritmo mostrado, além das funções de proteção realizadas, há a possibilidade de utilização dos sinais diferenciais reconstruídos no aprimoramento das funções de oscilografia do sistema.

6 A APLICAÇÃO DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES NA PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES – AS ABORDAGENS CONSIDERADAS

6.1 Introdução

Este capítulo abordará a aplicação das ferramentas de inteligência artificial que serão posteriormente incluídas nos algoritmos de proteção diferencial de transformadores de potência com base em Redes Neurais Artificiais, conforme descrito no capítulo 5.

Inicialmente serão apresentadas descrições de funcionamento do simulador SNNS e do programa MATLAB [67], utilizados no reconhecimento de padrões e na reconstrução de sinais elétricos, etapas que constituem apenas parte dos algoritmos completos propostos.

A seguir serão apresentados os treinamentos e testes efetuados com relação às aplicações de ferramentas inteligentes, tanto para a tarefa de reconhecimento de padrões como também na função de reconstrução de sinais. Tais módulos foram empregados nos algoritmos propostos no capítulo 5.

6.2 Reconhecimento de Padrões Considerando a Saturação dos Transformadores de Corrente

6.2.1 O Programa SNNS – *Stuttgard Neural Network Simulator*

Um dos *softwares* empregados com a finalidade de simular uma rede neural artificial foi o SNNS – *Stuttgard Neural Network Simulator*, devido a sua comprovada eficiência e simplicidade em termos de interface gráfica [66].

O SNNS destina-se à simulação de Redes Neurais Artificiais, possibilitando um ambiente flexível para pesquisa e aplicação das técnicas que o envolvem. O programa foi desenvolvido pela Universidade de Stuttgard e disponibilizado como um sistema de domínio público.

As principais funções predefinidas pelo programa SNNS e seus respectivos parâmetros são comentados a seguir e foram utilizadas em arquiteturas *feedforward*, em redes neurais do tipo MLP, RBF e redes recorrentes.

✱ A seguir são apresentadas algumas funções relativas às redes neurais do tipo MLP com o algoritmo de treinamento *Backpropagation*, estruturas que se constituem

a ferramenta de aplicação mais comum nos tipos de problema abordados neste trabalho.

a) Método de Aprendizagem

• *Std Backpropagation* (*Backpropagation* padrão)

α = taxa de aprendizagem, especifica o passo de aproximação considerado pelo método do gradiente descendente. Valores típicos situam-se 0 (zero) e 1;

δ_j = diferença máxima que é tolerada entre o valor desejado d_j e o obtido y_j ;

• *BackpropMomentum* (*Backpropagation* com o termo *momentum*)

α = taxa de aprendizagem;

μ = termo *momentum*, especifica o quanto se altera o peso anterior, sendo este valor adicionado à variação corrente. Os valores utilizados também se situam entre 0 (zero) e 1;

δ_j = diferença máxima que é tolerada entre o valor desejado d_j e o obtido y_j .

A fórmula geral de correção dos pesos utilizada por este último método apresenta-se como segue e foi utilizada no presente trabalho, conforme [48][66].

$$\Delta w_{ij}(k+1) = \alpha \delta_j(k) y_j(k) + \mu \Delta w_{ij}(k) \quad (23)$$

b) Função de Atualização: as unidades que compõem as camadas da rede neural são ordenadas pela sua topologia (camadas de entrada, intermediárias e de saída) e a propagação natural da atividade (informação) é a partir das unidades de entrada para as unidades de saída.

c) Função de Inicialização: inicializa os pesos da rede neural a ser treinada com valores aleatórios que pertencem ao intervalo $[-1,1]$.

d) Função de Ativação: determina o nível de transmissão de informação de uma unidade à outra, geralmente definida pelas funções Sigmóide Logística ou Tangente Hiperbólica.

e) Função de Saída: atribui o valor de ativação da unidade em questão, como saída desta.

6.2.2 O Programa MATLAB – *Neural Toolbox*

Em relação às simulações de ferramentas inteligentes necessárias ao projeto, o trabalho tem como meta a utilização de outra plataforma computacional capaz de fornecer eficiência na construção de modelos alternativos de RNAs, como as redes RBF – *Radial Basis Function*. Tal ferramenta foi implementada com base no programa MATLAB [67], pela comprovada versatilidade e eficiência na realização de tais tarefas.

A utilização dos recursos presentes no *Neural Toolbox* possibilitou a implementação dos treinamentos e testes de redes neurais do tipo MLP e redes RBF, inseridas nas sub-rotinas do programa MATLAB versão 5.2.

6.2.3 A Formação dos Conjuntos de Padrões

A formação dos conjuntos de padrões para o treinamento e testes das Redes Neurais Artificiais é descrita a seguir. Tal conjunto de dados será utilizado nas aplicações de RNAs destinadas ao reconhecimento de padrões, nas quais a ferramenta será responsável pelas respostas 1 (um) ou 0 (zero), para situações equivalentes à atuação ou ao bloqueio do relé diferencial, respectivamente.

O banco de dados elaborado para tal fim envolve situações nas quais os sinais gerados contêm a distorção causada pela saturação dos TCs e utiliza a mesma combinação de parâmetros descrita no capítulo 4 deste trabalho.

Os casos envolvidos nesta etapa, nos quais são empregadas somente as situações que ocasionam correntes diferenciais relevantes ao relé de proteção, são:

- Energização do transformador;
- Faltas internas ao transformador;

- Faltas externas ao transformador;
- Faltas ocorrendo entre o transformador e o TC;
- Energização do transformador com a presença de faltas internas;
- Rejeição de cargas;
- Remoção de faltas externas ao transformador;
- Sobre-excitação do transformador.

* } As situações de energização de bancos de capacitores e de regime permanente não foram incluídas na formação do banco de dados deste capítulo pelo fato de não ocasionarem correntes diferenciais significativas ao relé. Assim, construiu-se um conjunto de dados contendo um total de 7668 padrões (2556 casos com 3 movimentos de janelas de dados), envolvendo 216 situações de energização do transformador, 864 casos de faltas internas entre espiras e entre espiras e terra, de ambos os lados do transformador, 324 casos de faltas externas monofásicas e trifásicas, 162 situações de faltas ocorrendo no trecho entre o transformador de potência e o TC secundário, 144 casos de energização do transformador com a presença de faltas internas, 108 casos de rejeição de cargas, 648 situações de remoção de faltas externas ao transformador e, por fim, 90 casos de sobre-excitação do transformador.

* É importante salientar que o banco de dados descrito envolve 50% de dados correspondentes a casos simulados nos quais há a presença do fenômeno de saturação dos TCs.

Após os conjuntos de dados gerados serem devidamente misturados, estes foram divididos em conjunto de treinamento e validação (2/3 do total) e conjunto de testes (1/3 restante). Apenas o conjunto destinado aos testes foi mantido ordenado com o objetivo de uma melhor visualização das respostas da rede neural.

A organização dos valores para a formação dos vetores de entrada da rede neural envolveu os seguintes passos:

- * • Determinação de 4 amostras consecutivas de cada fase das correntes diferenciais a partir dos arquivos .PL4 resultantes e aplicação de janela de dados móveis de 3 movimentos para cada fase, a partir de uma frequência amostral de 1

Handwritten note: *1/3 dos*

kHz (16 amostras por ciclo) e da amostra correspondente ao instante de incidência de cada caso de falta ou energização simulados.

- Normalização dos vetores entre 0,0 e 1,0.
- Formação dos vetores de entrada da rede neural com atribuição do valor 0,0 (zero) para a saída da mesma nos casos de energização (situação de não atuação do relé) e do valor 1,0 (um) para as saídas da rede nas situações de falta interna.

A divisão da camada de entrada das redes neurais estudadas, em função dos sinais de correntes diferenciais gerados para cada fase e submetidos à janela de dados móveis é mostrada na FIGURA 46.

Também são representados na figura os pesos w_{ij} , conectando os neurônios da camada i aos neurônios da camada j e os valores 1 (um) ou 0 (zero) desejados para a célula da camada de saída.

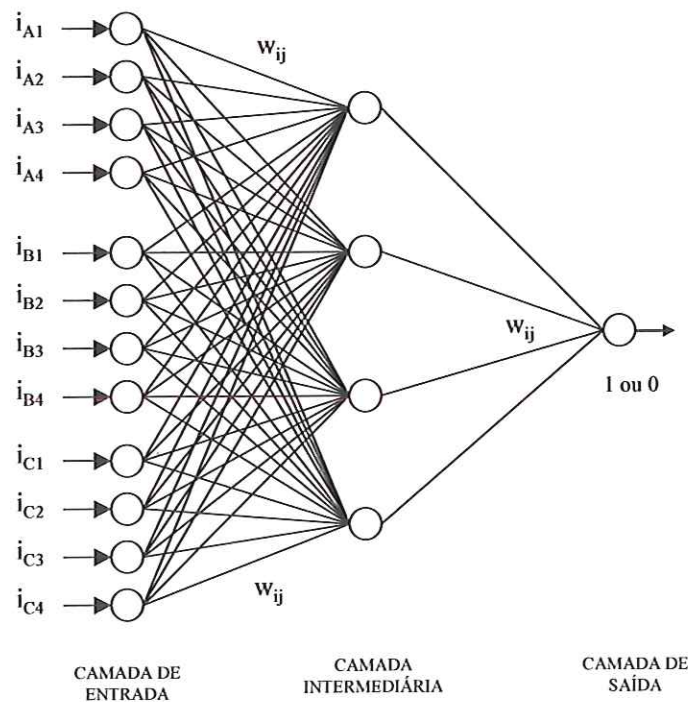


FIGURA 46 - Representação das entradas e saídas das redes neurais para a finalidade proposta

As correntes i_{A1} , i_{A2} , i_{A3} e i_{A4} representam quatro amostras sucessivas das correntes diferenciais da fase A, na frequência amostral de 1 kHz. Analogamente, i_{B1} , i_{B2} , i_{B3} , e i_{B4} para a fase B e i_{C1} , i_{C2} , i_{C3} e i_{C4} para a fase C.

A janela de dados móvel pode ser explicada da seguinte forma para a fase A, sendo que o raciocínio segue análogo para as outras fases:

A primeira janela envolve os valores i_{A1} , i_{A2} , i_{A3} e i_{A4} . Na segunda janela, descarta-se o primeiro valor e adiciona-se o próximo e assim sucessivamente. Portanto, as três janelas podem ser consideradas como segue:

Primeira janela $\rightarrow i_{A1}, i_{A2}, i_{A3}, i_{A4}$

Segunda janela $\rightarrow i_{A2}, i_{A3}, i_{A4}, i_{A5}$

Terceira janela $\rightarrow i_{A3}, i_{A4}, i_{A5}, i_{A6}$

Foram gerados, portanto, um total de 2556 casos, envolvendo as situações descritas, significando 7668 padrões (2556×3 janelas) para a rede neural, sendo que 3024 vetores correspondem a situações nas quais a resposta esperada pela rede neural é 1 (um), ou seja, situações que ocasionariam o acionamento do relé diferencial, como faltas internas e energização com a presença de faltas internas ao transformador. Outros 4644 vetores correspondem a situações de resposta desejada 0 (zero), ou seja, casos nos quais o relé não deve ser sensibilizado. Do total dos dados, 50% foram utilizados para treinamento e validação das redes neurais e 50% foram empregados na fase de testes.

Para a aplicação de Redes Neurais Artificiais à proteção digital de transformadores de potência convencionou-se, para as respostas das redes, que saídas menores ou iguais a 0,5 indicariam situações de bloqueio do relé e que saídas maiores que 0,5 corresponderiam a situações nas quais o sinal de acionamento deveria ser enviado.

Muitas topologias de redes neurais foram construídas, treinadas e testadas pelos programas SNNS e MATLAB. Uma gama de testes foram realizados visando a correta distinção entre as situações às quais fica submetido o transformador de potência. Serão apresentadas aqui algumas configurações que obtiveram êxito nesse

objetivo, bem como as curvas de convergência dos erros de treinamento e validação e os gráficos de resposta aos testes efetuados na fase pós-treinamento.

6.2.4 Redes MLP

O conjunto de dados mostrado no item anterior foi empregado no treinamento e testes de redes neurais do tipo MLP – *Multi-Layer Perceptron* – utilizando o simulador MATLAB – *Neural Toolbox*.

Utilizaram-se dois terços dos dados simulados (5112 padrões) para a composição dos conjuntos de treinamento (2556 padrões) e validação (2556 padrões). Na etapa de testes, o conjunto envolveu outros 2556 padrões não utilizados no processo de treinamento e validação das RNAs.

Conjuntos de treinamento com 300, 1000 e 2000 padrões foram ainda utilizados para fins comparativos entre as ferramentas de inteligência artificial analisadas.

Muitas arquiteturas de redes neurais foram construídas e treinadas para esta tarefa, porém é ilustrada aqui aquela que conseguiu o melhor desempenho dentre os modelos testados.

A melhor rede neural obtida conteve duas camadas intermediárias ou ocultas. A primeira camada constituiu-se de 8 células e a segunda, de 5 neurônios. Esta configuração foi a mais simples alcançada e capaz de fornecer 99,18% de acertos na distinção entre as situações estudadas, fornecendo 2535 respostas corretas.

Vale lembrar que na avaliação das ferramentas citadas consideraram-se como respostas de valor 1 (um) as saídas fornecidas pela rede que ficaram acima de 0,5. Por outro lado, as respostas fornecidas através de valores abaixo ou igual a 0,5 foram tomadas como sendo 0 (zero).

A FIGURA 47 seguinte mostra a curva de decaimento dos erros quadráticos médios (*Mean Square Error* – MSE) de treinamento (na cor preta) e validação (na cor vermelha) para a rede neural de topologia 12+8+5+1. Convém lembrar que a referida topologia significa que a rede neural contém 12 padrões na camada de entrada, representados por 4 amostras de corrente diferencial de cada uma das 3 fases do sistema. A camada de saída é constituída por apenas um neurônio, onde a RNA deverá fornecer a resposta 0 ou 1.

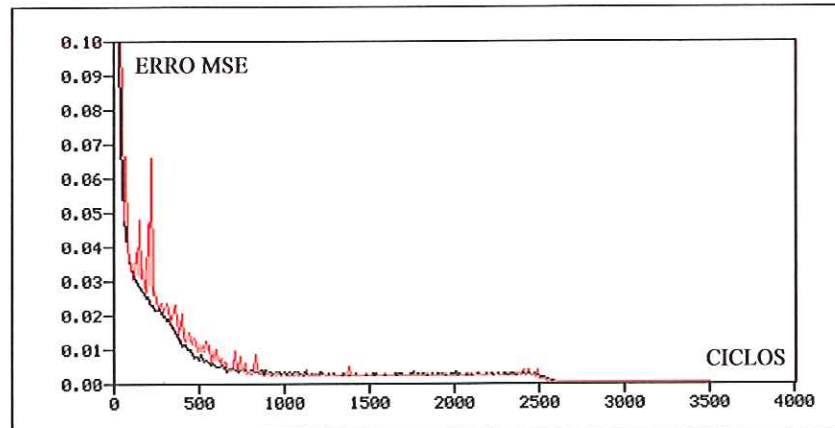


FIGURA 47 - Decaimento dos erros de treinamento e validação para a rede 12+8+5+1

O erro quadrático médio das respostas fornecidas pela rede nesta etapa atingiu o valor de 0,00001 após 3500 ciclos de treinamento realizado através do método *Backpropagation* contendo o termo *Momentum*.

A FIGURA 48 traz a topologia da rede neural em questão, extraída do simulador SNNS, indicando o número de cada célula seguido do valor de sua função de ativação.

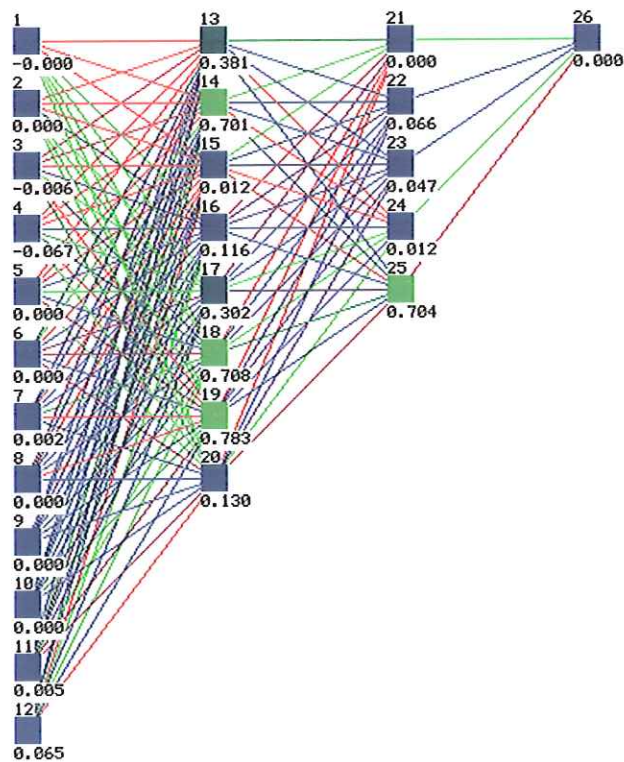


FIGURA 48 - Rede neural de topologia 12+8+5+1

Durante a fase de testes da rede neural, quando se utilizaram 2556 vetores não empregados durante a fase de treinamento e validação, os casos de resposta desejada igual a 0 (zero) simulados compreenderam 516 situações (1548 padrões). Por outro lado, para os casos de resposta desejada igual a 1 (um) simulados, o número de casos totalizou 336 situações (1008 padrões).

A FIGURA 49 apresenta o gráfico de testes realizados, no qual estão presentes dados de resposta desejada 0 (zero) da amostra 1 a 1458 e dados de resposta desejada 1 (um) da amostra 1459 a 2556. Nota-se que a maioria dos erros cometidos pela rede neural concentrou-se na seção do gráfico onde se encontram os dados de resposta desejada 0 (zero), ou seja, valores que não acionariam o relé diferencial. A quantidade total de erros neste caso totalizou 21 vetores, para o conjunto de treinamento de 5112 vetores. Portanto, a rede neural classificou corretamente 99,18% dos casos testados (2535 vetores).

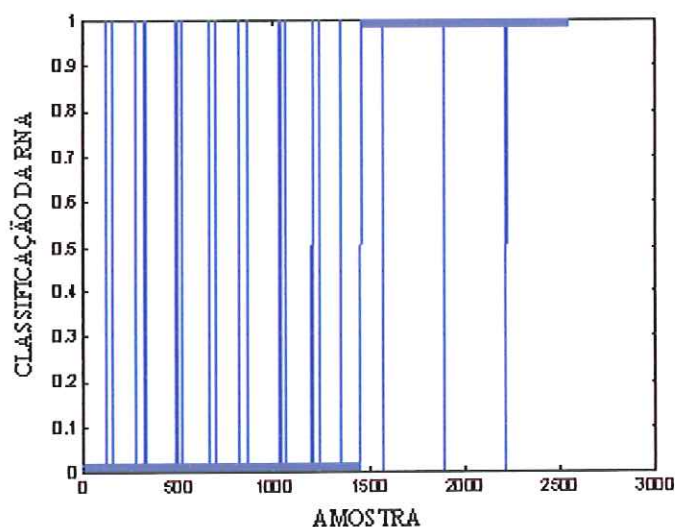


FIGURA 49 - Classificação da rede 12+8+5+1 MLP para 2556 padrões testados

Para uma melhor avaliação das respostas obtidas pela RNA, implementou-se o cálculo do Desvio-Padrão para o conjunto de valores de saída gerados pela rede, conforme procedimento ilustrado no APÊNDICE E. No caso da rede neural tipo MLP melhor classificada, o valor do Desvio-Padrão para o conjunto de dados de resposta desejada igual a 0 (zero) foi de 0,00074968. Por outro lado, o valor do Desvio-Padrão para o conjunto de dados de resposta desejada igual a 1 (um) foi de

0,00037248. Tais valores atestam a precisão atingida pelas redes neurais, uma vez que os valores fornecidos permaneceram muito próximos a 0 (zero) e a 1 (um), respectivamente, apesar de se considerar o valor de 0,5 como o limiar de divisão entre as respostas esperadas.

6.2.5 Redes RBF

✕ Na avaliação das ferramentas empregadas no trabalho realizou-se um estudo completo de aplicação de Redes Neurais Artificiais dos tipos RBF (*Radial Basis Function*) e foi feita uma comparação com o método utilizando redes tipo MLP. Esta comparação foi realizada com base em seus métodos de treinamento (número de padrões de treinamento requeridos, tempo de treinamento) e na precisão da resposta obtida.

O conjunto de dados mostrado no item anterior foi empregado no treinamento de redes neurais do tipo RBF – *Radial Basis Function* – utilizando o programa *MATLAB Neural Toolbox*, através de bibliotecas de funções especialmente programadas para tal fim, segundo rotinas extraídas do método *Netlab* proposto por Bishop [49].

✕ Geralmente, um grande número de padrões é requerido para o processo de treinamento da RNA. A rede RBF é introduzida a fim de diminuir o número de padrões de treinamento necessários ao processo. Esta é uma importante contribuição sob o ponto de vista prático, considerando uma futura aplicação do dispositivo. Tais rotinas foram empregadas com o objetivo de comparação com o desempenho das redes MLP citadas, devido ao fato de as redes RBF necessitarem de menores conjuntos de treinamento se comparadas às redes MLP, em muitos tipos de aplicação, com pouco comprometimento da precisão.

Muitas arquiteturas de redes neurais RBF foram construídas e treinadas para esta tarefa, porém são ilustradas aqui aquelas que conseguiram os melhores desempenhos dentre os modelos testados.

Utilizaram-se dois terços dos dados simulados (5112 padrões) para a composição dos conjuntos de treinamento (2556 padrões) e validação (2556 padrões), de forma idêntica àqueles construídos para o treinamento das redes do tipo MLP. As redes RBF foram ainda treinadas com conjuntos de 300, 1000 e 2000

padrões para fins comparativos, também da mesma maneira que as redes MLP mostradas anteriormente.

Os testes foram realizados com um conjunto de 2556 padrões não utilizados no processo de treinamento e validação. Este conjunto também foi elaborado de forma idêntica àquele empregado para testar as redes do tipo MLP.

Para a avaliação das ferramentas citadas, consideraram-se como respostas de valor 1 (um) as saídas fornecidas pela rede que ficaram acima de 0,5. Por outro lado, as respostas fornecidas através de valores abaixo ou iguais a 0,5 foram tomadas como sendo 0 (zero).

A melhor arquitetura de rede neural do tipo RBF obtida foi a rede 12+35+1, ou seja, a estrutura contém 12 neurônios na camada de entrada, 35 células na camada intermediária e 1 neurônio na camada de saída, fornecendo as respostas 0 (zero) ou 1 (um).

* A FIGURA 50 apresenta o gráfico de testes realizados, no qual estão presentes dados de resposta desejada 0 (zero) da amostra 1 a 1458 e dados de resposta desejada 1 (um) da amostra 1459 a 2556. Nota-se que os erros distribuíram-se pelo gráfico de testes. A quantidade de respostas erradas neste caso totalizou 62 vetores, para o conjunto de treinamento de 5112 vetores.

Portanto, a rede neural classificou corretamente 97,57% dos casos testados (2494 vetores).

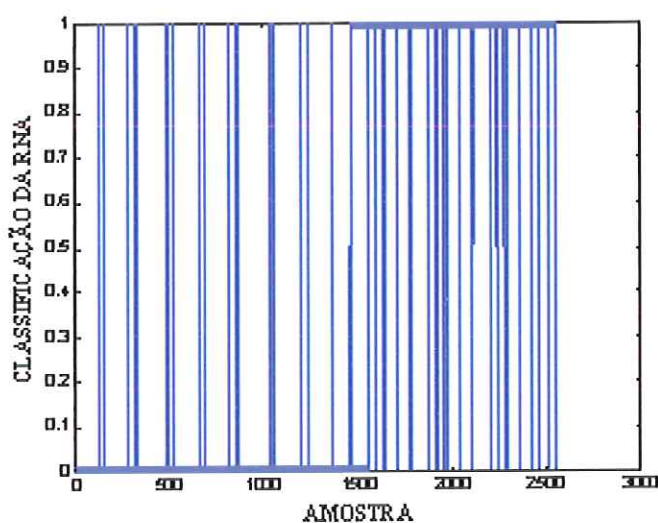


FIGURA 50 - Classificação da rede 12+35+1 RBF para 2556 padrões testados

Para a melhor avaliação das respostas obtidas pelas RNAs do tipo RBF estudadas, implementou-se o cálculo do Desvio-Padrão para o conjunto de valores de saída gerados pela rede, conforme procedimento ilustrado no APÊNDICE E e idêntico àquele realizado para as redes neurais do tipo MLP. No caso da rede neural tipo RBF melhor classificada, o valor do Desvio-Padrão para o conjunto de dados de resposta desejada igual a 0 (zero) foi de 0,00091566. Por outro lado, o valor do Desvio-Padrão para o conjunto de dados de resposta desejada igual a 1 (um) foi de 0,00050827. Tais valores atestam novamente a precisão atingida pelas redes neurais, ou seja, os valores fornecidos permaneceram muito próximos a 0 (zero) e a 1 (um) respectivamente, apesar de se considerar o valor de 0,5 como o limiar de divisão entre as respostas esperadas.

A TABELA 25 mostra as arquiteturas e os índices de acertos conseguidos através do emprego das redes neurais dos tipos RBF e MLP, conforme o número de padrões de treinamento utilizado.

TABELA 25 - Índices de acerto das redes RBF e MLP testadas com dados saturados

| Redes RBF - 2556 Padrões de Testes | | | |
|------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|
| Padrões de Treinamento | Respostas Corretas | % Respostas Corretas | Arquitetura |
| 300 | 2315 | 90,57 | 12+20+1 |
| 1000 | 2351 | 91,98 | 12+23+1 |
| 2000 | 2440 | 95,46 | 12+28+1 |
| 5112 | 2494 | 97,57 | 12+35+1 |
| Redes MLP - 2556 Padrões de Testes | | | |
| Padrões de Treinamento | Respostas Corretas | % Respostas Corretas | Arquitetura |
| 300 | 1942 | 75,98 | 12+12+7+1 |
| 1000 | 2223 | 86,97 | 12+12+5+1 |
| 2000 | 2402 | 93,98 | 12+10+4+1 |
| 5112 | 2535 | 99,18 | 12+8+5+1 |

X Deve-se enfatizar que os dados de testes das redes neurais do tipo RBF foram idênticos àqueles utilizados na análise das redes do tipo MLP (2556 padrões). Nota-se que os desempenhos das duas topologias de redes neurais foram diferentes na medida em que o tamanho dos conjuntos de treinamento foi variado. As redes MLP tiveram uma redução no número de respostas corretas conforme o banco de dados de treinamento decresceu.

✕ Por outro lado, as redes neurais do tipo RBF mantiveram sua precisão apesar da diminuição no tamanho do conjunto de dados de treinamento.

Ressalta-se, novamente, que as arquiteturas são diferentes. As redes neurais do tipo RBF apresentaram três camadas com até 35 neurônios na camada intermediária. Por sua vez, as arquiteturas neurais do tipo MLP usaram quatro camadas para alcançar tais precisões com, no máximo, 12 neurônios em cada camada oculta.

✕ Os resultados obtidos com a aplicação das Redes Neurais Artificiais indicam, em primeiro lugar, a precisão alcançada nas respostas obtidas. A comparação efetuada entre as estruturas neurais do tipo MLP e RBF mostra que, embora as redes neurais RBF forneçam respostas um pouco menos precisas que as redes MLP, o seu emprego é bem mais simplificado no que diz respeito ao número de padrões requeridos na fase de treinamento, em proporção à precisão alcançada.

6.3 Compensação do Efeito da Saturação Aliado ao Reconhecimento de Padrões para a Proteção de Transformadores de Potência

O objetivo principal deste estudo é a obtenção de uma ferramenta computacional de maior precisão em relação às demais metodologias estudadas. Tal iniciativa justifica-se pelos problemas apresentados e decorrentes do fenômeno de saturação dos TCs, como apresentado no capítulo 1.

✕ Neste item é descrito o estudo da correção dos sinais distorcidos pela saturação dos transformadores de corrente, além de testes realizados a fim de comprovar a precisão e a eficiência do método. Desta forma, essa aplicação visa fornecer maior precisão aos algoritmos baseados em ferramentas inteligentes, para a proteção de transformadores de potência.

Este estudo consiste, portanto, do módulo de compensação de ondas distorcidas, apresentado anteriormente como uma etapa adicional a ser inserida em um dos algoritmos alternativos propostos neste trabalho e descritos no capítulo 5.

6.3.1 Algoritmo Proposto na Correção dos Sinais Saturados

Como um método auxiliar aos problemas apresentados neste capítulo, foi elaborada uma nova abordagem no tratamento de sinais distorcidos pela saturação dos TCs na proteção de transformadores. Para tal fim, implementou-se um sistema baseado em Redes Neurais Artificiais com o intuito de corrigir os sinais distorcidos pela saturação dos TCs, e que constitui uma parte do novo algoritmo proposto em questão, já ilustrado na FIGURA 45 do capítulo 5.

Neste algoritmo, os sinais inseridos passam inicialmente por um módulo de reconstrução que os torna adequados às etapas seguintes. Este módulo pode ser observado na quarta etapa do algoritmo ilustrado na FIGURA 45.

Esta rotina de reconstrução de sinais foi elaborada através da ferramenta redes neurais artificiais recorrentes, como descrito no próximo item.

6.3.2 Treinamento e Testes das Redes Neurais Artificiais

Para o treinamento e testes das redes neurais no desempenho da tarefa mencionada anteriormente construiu-se um banco de dados completo, envolvendo os casos elaborados para as aplicações anteriores adicionados de casos nos quais não são enviados sinais diferenciais significativos ao relé, ou seja, os casos de energização de bancos de capacitores e de regime permanente. Tal estudo se faz necessário pelo fato de o módulo de reconstrução de sinais em questão estar localizado na entrada do algoritmo proposto. Assim sendo, todos os sinais que são inseridos no algoritmo do relé diferencial são analisados pelo referido módulo.

O banco de dados completo gerado pelas simulações computacionais corresponde a 216 casos de energização, 864 casos de faltas internas de espira para terra e entre espiras, de ambos os lados do transformador, 324 casos de faltas externas monofásicas e trifásicas, 162 situações de faltas ocorrendo no trecho entre o transformador de potência e o TC secundário, 144 casos de energização do transformador com a presença de faltas internas, 108 casos de rejeição de cargas, 648 situações de remoção de faltas monofásicas e trifásicas externas ao transformador, 90

casos de sobre-excitação do transformador, 30 casos de energização de bancos de capacitores e, por fim, 9 casos de regime permanente.

É importante lembrar novamente que o banco de dados referido contém 50% de parâmetros envolvendo sinais saturados, com exceção das duas últimas situações citadas, quando não houve a consideração de dados relativos à saturação.

O número total de simulações realizadas nesta etapa totalizou então 2595 casos, correspondendo a 7785 vetores de entrada para as RNAs (2595x3 janelas de dados móveis).

Para o estudo da aplicação de redes neurais no objetivo de reconstrução dos sinais distorcidos foi elaborado, portanto, um conjunto de treinamento e validação composto de 5190 vetores (2/3 do total de dados) e um conjunto de testes contendo 2595 vetores (1/3 do total de dados), considerando-se a janela de dados móveis de 3 movimentos.

Muitas ferramentas inteligentes foram estudadas e testadas nesta etapa, porém, as estruturas neurais finalmente empregadas nesta fase do trabalho foram as Redes Neurais Recorrentes, que conseguiram realizar a função de reconstrução de sinais com o nível de precisão esperado.

Após a adequação dos vetores ao simulador SNNS, executou-se o processo de treinamento da rede neural recorrente de Elman [48], que conseguiu seu menor erro após 8000 ciclos, onde atingiu a média quadrática de erros no valor de 0,0005.

Destaca-se que, durante esta etapa, foi necessária a realização de uma adaptação na função de transferência dos neurônios. Desta forma, a função Sigmóide Logística presente inicialmente nessas células foi substituída pela função Tangente Hiperbólica a fim de que as redes neurais pudessem realizar cálculos precisos com valores numéricos negativos.

As camadas de entrada e saída das redes neurais contiveram em cada uma 24 dados, pois foram utilizados os 8 primeiros pontos (meio ciclo de dados) de cada uma das 3 fases dos sinais.

Para tal resultado, a melhor topologia de rede neural recorrente de Elman obtida foi a 24+20+24, ou seja, 24 neurônios na camada de entrada, 20 neurônios na camada oculta e 24 células na camada de saída, a qual reconstruiu o sinal, além de 24 neurônios na camada de recorrência.

A FIGURA 51 ilustra a curva de decaimento dos erros médios quadráticos (MSE) de treinamento (na cor preta) e validação (na cor vermelha) da rede, após 8000 ciclos de processamento.

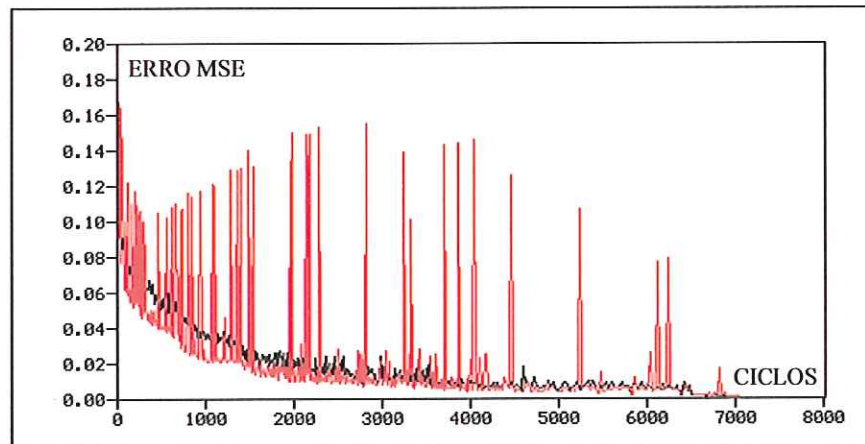


FIGURA 51 - Curva dos erros de treinamento e validação da rede 24+20+24 de Elman

Na fase de testes da rede neural melhor classificada na tarefa de reconstrução dos sinais distorcidos, utilizou-se um conjunto de dados com 2595 vetores.

A FIGURA 52 a seguir ilustra a rede de Elman obtida pelo simulador SNNS.

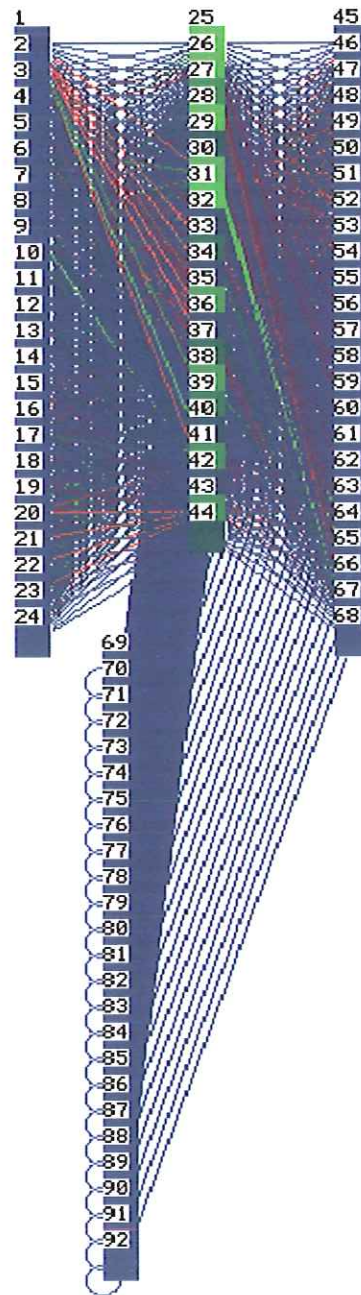


FIGURA 52 – Rede Neural Recorrente de Elman extraída do simulador SNNS

A FIGURA 53 mostra o gráfico da média dos erros quadráticos de todos os testes efetuados na rede neural de topologia 24+20+24, para os 2595 testes efetuados.

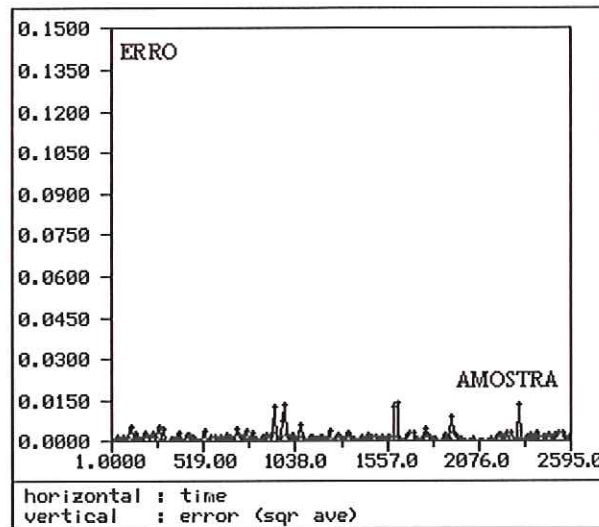


FIGURA 53 - Erros dos testes efetuados na rede 24+20+24

Para a confirmação dos resultados obtidos nos testes da RNA mostrada, são exibidos a seguir os gráficos dos sinais obtidos através da correção efetuada pela rede neural. A FIGURA 54 mostra o sinal de um caso de energização do transformador contendo distorção causada pela saturação do TC primário. A seguir, na FIGURA 55, é ilustrado o sinal ideal desejado para o mesmo caso, ou seja, sem conter a saturação do TC. Na próxima FIGURA 56, pode-se observar o caso em questão corrigido pela rede neural. Salienta-se que os sinais das 3 fases de cada figura foram tomados em sincronismo.

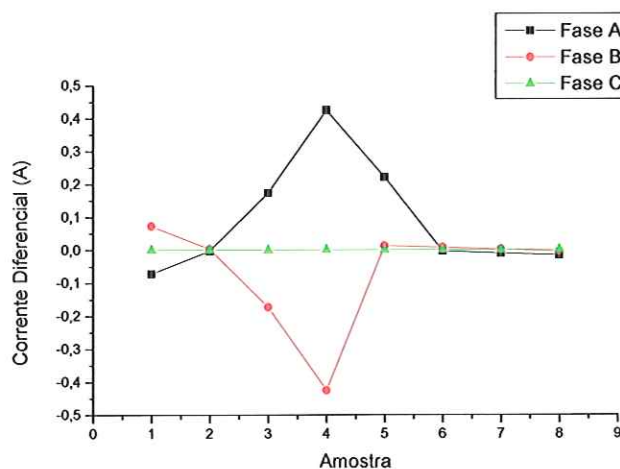


FIGURA 54 - Sinal de energização distorcido por saturação

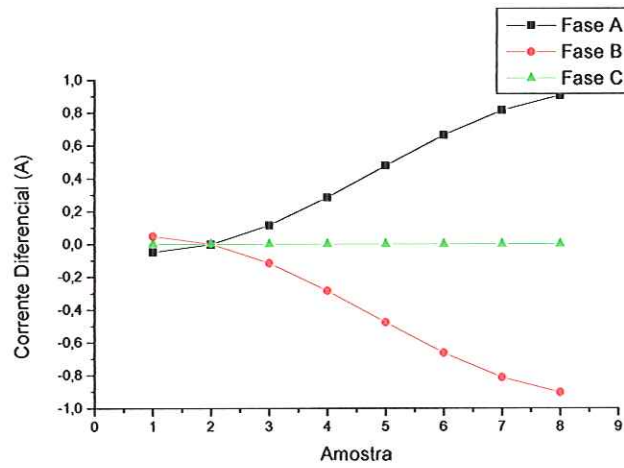


FIGURA 55 - Sinal de energização com TC ideal

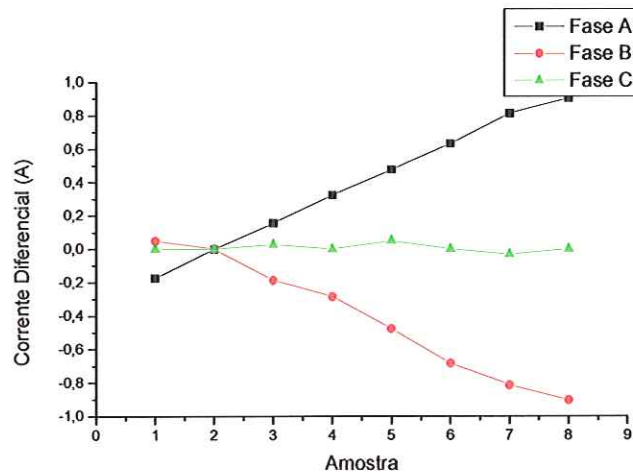


FIGURA 56 - Sinal de energização reconstruído pela RNA

As próximas ilustrações, FIGURA 57, FIGURA 58 e FIGURA 59 mostram situações análogas às anteriores, porém para um caso de falta interna ao transformador.

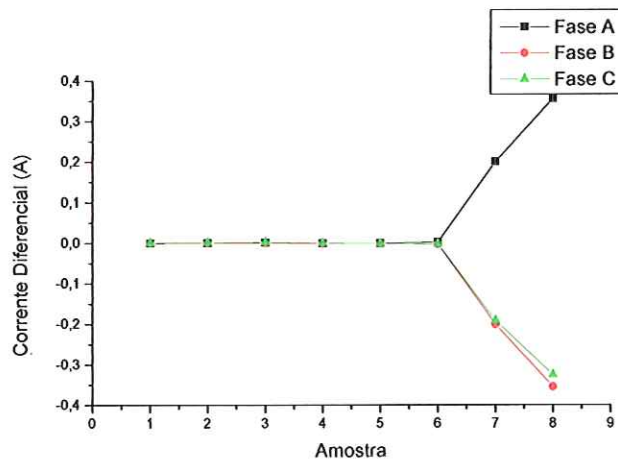


FIGURA 57 - Sinal de falta interna distorcido pela saturação

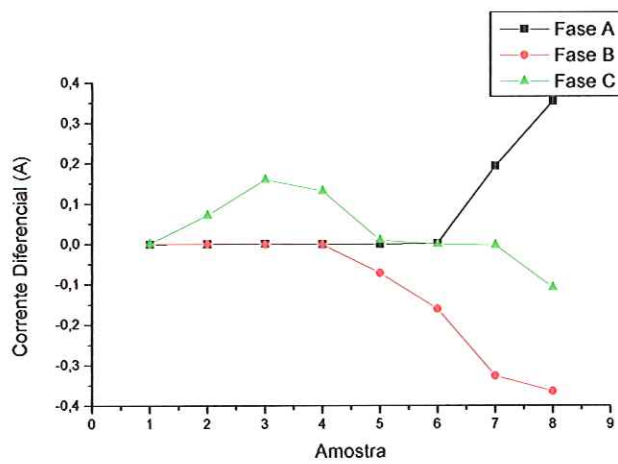


FIGURA 58 - Sinal de falta interna com TC ideal

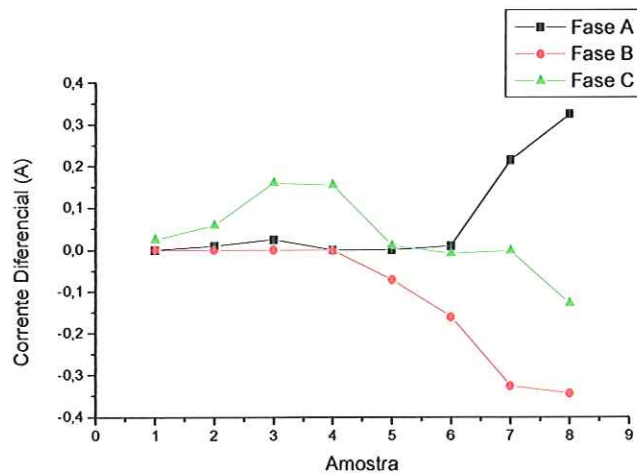


FIGURA 59 - Sinal de falta interna reconstruído pela RNA

A FIGURA 60 mostra o sinal de um outro caso de falta interna ao transformador contendo distorção causada pela saturação do TC primário. Na FIGURA 61 é ilustrado o sinal ideal desejado para o mesmo caso, ou seja, sem conter a saturação do transformador de corrente. Na próxima FIGURA 62 pode-se observar o caso em questão corrigido pela RNA.

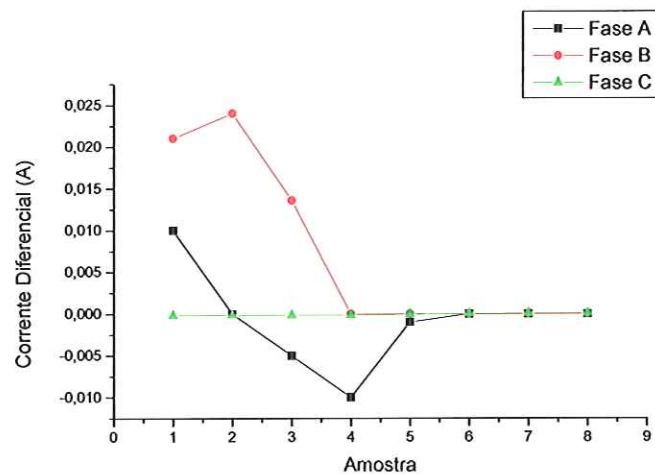


FIGURA 60 – Sinal de falta interna distorcido pela saturação

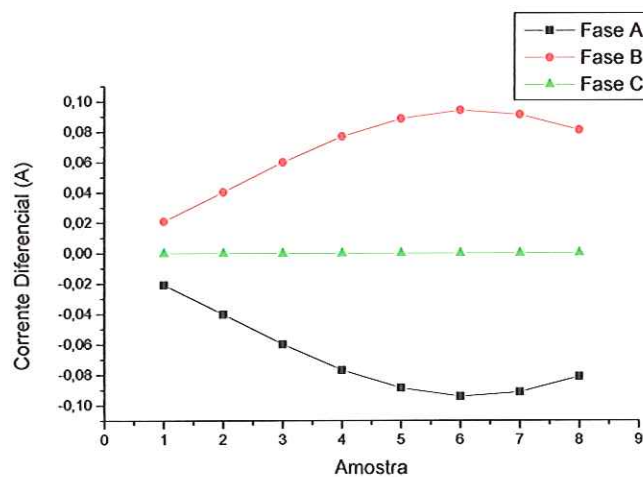


FIGURA 61 – Sinal de falta interna com TC ideal

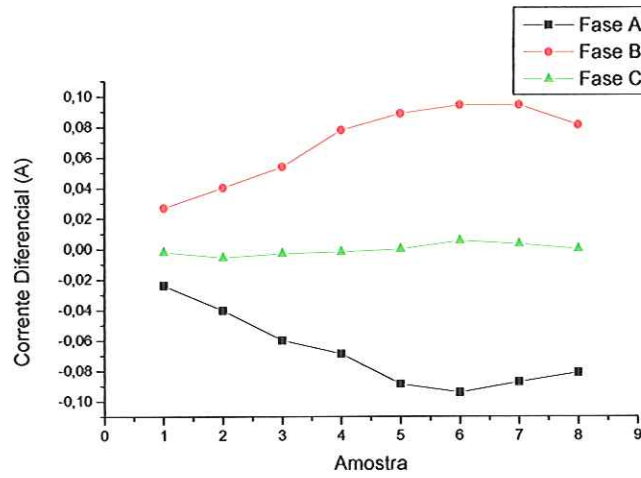


FIGURA 62 – Sinal de falta interna reconstruído pela RNA

As próximas ilustrações (FIGURA 63, FIGURA 64 e FIGURA 65) mostram situações análogas às anteriores, porém para um novo caso de energização do transformador.

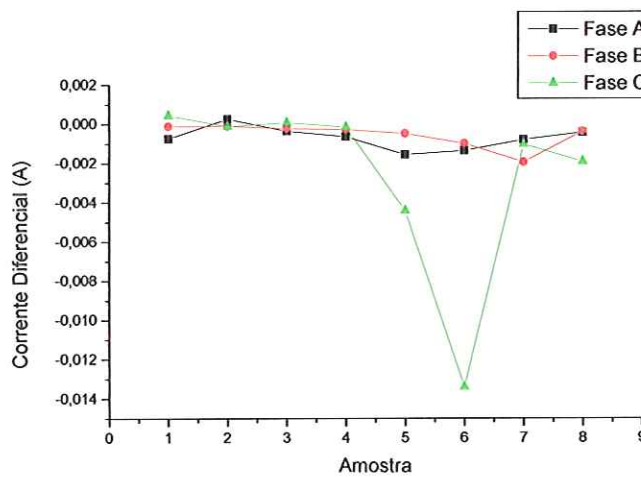


FIGURA 63 – Sinal de energização distorcido por saturação

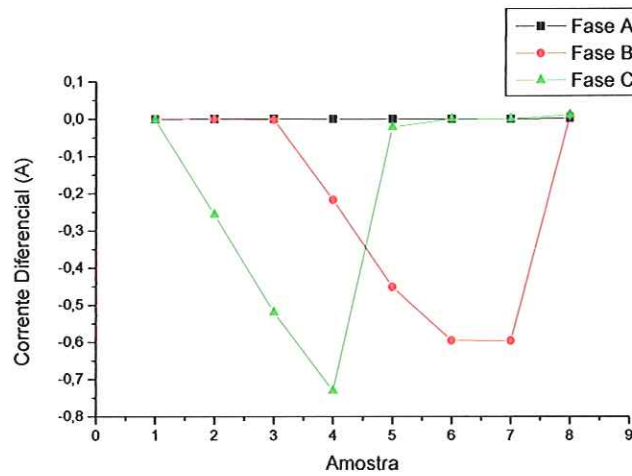


FIGURA 64 – Sinal de energização com TC ideal

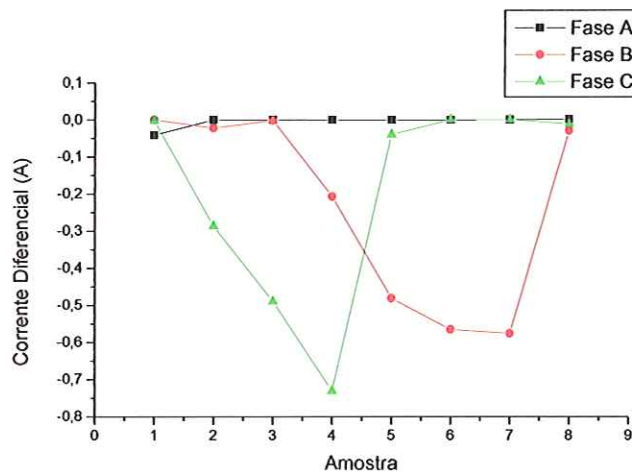


FIGURA 65 – Sinal de energização reconstruído pela RNA

6.3.3 Testes Efetuados com os Sinais Reconstruídos

Os sinais obtidos através da reconstrução realizada pela RNA Recorrente descrita no item anterior foram submetidos a novos testes de reconhecimento de padrões a fim de verificar-se a eficiência e precisão do método desenvolvido.

Para a realização destes testes utilizaram-se as melhores redes neurais dos tipos MLP e RBF obtidas nos itens 6.2.4 e 6.2.5 deste trabalho e que atingiram índices de acerto de 99,18% e 97,57% respectivamente, naquela fase do trabalho.

O banco de dados em questão envolveu, portanto, um conjunto de testes contendo 2595 vetores, considerando-se a janela de dados móveis de 3 movimentos. Para os 1587 primeiros padrões de teste, a resposta esperada da rede neural foi o valor 0 (zero), pois este intervalo conteve dados de situações que não devem causar o acionamento do relé de proteção do transformador de potência. No intervalo seguinte, ou seja, da amostra 1588 até a 2595, a resposta esperada foi o valor 1 (um), devido ao fato deste intervalo abrigar os dados de casos que devem provocar a operação do relé diferencial do transformador.

A RNA do tipo RBF, que fora treinada com 5112 padrões, obteve um índice de acerto de 98,27 %, valor este que corresponde a um total de 2550 respostas corretas, como pode ser observado na FIGURA 66.

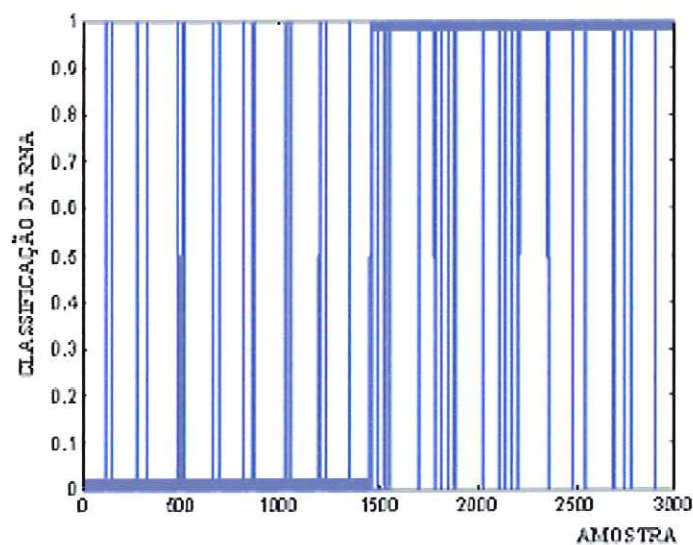


FIGURA 66 - Classificação da rede RBF para 2595 casos de testes

A RNA do tipo MLP, que fora treinada também com 5112 padrões, obteve um índice de acerto de 100%, valor esse que corresponde ao total de 2595 respostas corretas, como pode ser observado na FIGURA 67.

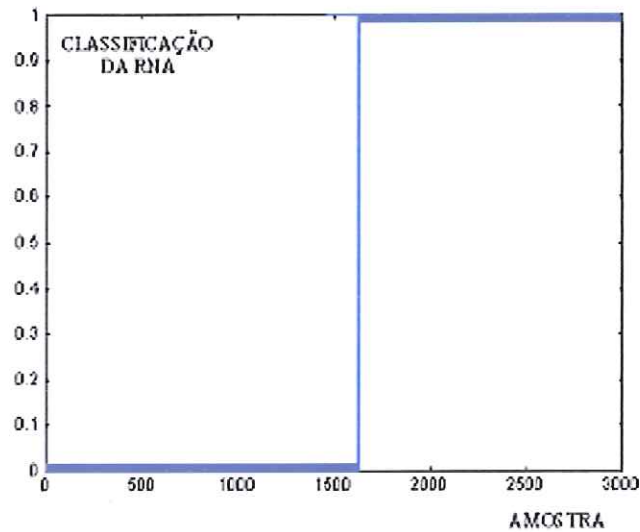


FIGURA 67 - Classificação da rede MLP para 2595 casos de testes

* Pode-se concluir, através dos estudos realizados neste item, que as redes neurais dos tipos RBF e MLP responderam de maneira mais precisa na medida em que elas foram testadas com dados reconstruídos pelas estruturas neurais recorrentes.

As redes neurais testadas apresentaram índices de acerto de 98,27% e 100%, para as arquiteturas do tipo RBF e MLP, respectivamente, ao passo que os índices de precisão dessas redes quando testadas diretamente com dados que contém saturação foi de 97,57% e 99,18%, respectivamente, como apresentado nos itens 6.2.4 e 6.2.5.

Apesar do emprego da correção de sinais através de redes neurais como parte de um algoritmo alternativo de proteção requerer a aplicação de duas estruturas de inteligência artificial, é importante considerar que esses novos algoritmos apresentam um índice de precisão significativamente maior, além do fato de que esta é uma etapa de suma importância no que diz respeito à medição e oscilografia do sistema.

7 ESTUDO COMPARATIVO DAS ABORDAGENS PROPOSTAS

Neste capítulo será efetuado o estudo comparativo das abordagens estudadas, através da análise das ferramentas implementadas e das respostas fornecidas pelos algoritmos propostos para a proteção diferencial digital de transformadores de potência utilizando ferramentas inteligentes.

X A análise comparativa será realizada com base na precisão fornecida pelos algoritmos, seus tempos de resposta e suas aplicabilidades.

As metodologias a serem comparadas serão:

- Algoritmo de proteção diferencial de transformadores com a utilização de RNAs operando com dados saturados;
- Algoritmo de proteção diferencial de transformadores com a inclusão do módulo adicional de reconstrução de sinais;
- Algoritmo convencional completo de proteção diferencial percentual de transformadores de potência, utilizando a Transformada de Fourier.

O algoritmo convencional de proteção diferencial de transformadores foi implementado neste capítulo e constitui importante etapa na avaliação global das metodologias propostas.

O banco de dados empregado nos testes de desempenho dos algoritmos citados foi elaborado conforme os casos simulados no capítulo 4. Entretanto, a obtenção dos dados foi realizada com o emprego de um sistema elétrico adicional que utilizou um transformador de potência de 6,25 MVA, além do banco de dados já existente, relativo ao transformador de 25 MVA. O objetivo deste procedimento é avaliar também os algoritmos estudados com dados gerados por um sistema elétrico de potência de configuração diferente daquele utilizado até então. Tal iniciativa visou submeter as metodologias estudadas a situações de mudanças no sistema elétrico, condições essas que podem facilmente ocorrer em aplicações reais.

Através desta análise, importantes subsídios serão fornecidos na tentativa de uma avaliação completa e real das ferramentas inteligentes propostas.

7.1 Algoritmo com a Utilização de RNAs com Dados Saturados

Nesta etapa, o algoritmo testado foi aquele proposto com a utilização de Redes Neurais Artificiais treinadas com um banco de dados que envolveu sinais contendo o efeito da saturação dos TCs.

A metodologia proposta, esquematizada na FIGURA 44, constante no item 5.4 deste trabalho, foi testada com a inserção da melhor rede neural tipo MLP obtida no capítulo 6, pelo fato dessa estrutura ter alcançado o maior índice de precisão naquele estudo, se comparada à rede RBF também avaliada.

Através deste algoritmo, os sinais que possuíam significativo conteúdo de dados saturados foram também inseridos no módulo de reconhecimento de padrões realizado pela rede neural previamente treinada com esse tipo de sinal.

O banco de dados utilizado, conforme já exposto, foi gerado a partir dos sistemas elétricos simulados com o emprego do transformador de 25 MVA e do transformador alternativo de 6,25 MVA. O conjunto de parâmetros simulados envolveu a seguinte proporção de casos para cada um dos transformadores:

- Energização do transformador (108 casos);
- Faltas internas ao transformador (432 casos);
- Faltas externas ao transformador (162 casos);
- Faltas ocorrendo entre o transformador e o TC secundário (81 casos);
- Energização do transformador com a presença de falta interna (72 casos);
- Sobre-excitação do transformador (45 casos);
- Energização de bancos de capacitores (15 casos);
- Rejeição de cargas (54 casos);
- Remoção de faltas externas ao transformador (324 casos);
- Regime permanente (5 casos).

Portanto, o conjunto total de simulações envolveu 2595 casos, ou seja, 7785 vetores de entrada para o algoritmo, considerando-se uma janela de dados móveis de

três movimentos. Para efeito de testes, o arquivo utilizado consistiu de 2595 vetores, representando 1/3 dos dados gerados para cada situação.

Tal banco de dados foi praticamente idêntico, em termos de combinações de parâmetros, àquele construído para a aplicação do módulo de correção de sinais saturados, estudado no capítulo anterior, no qual 50% dos dados contêm distorções devido à saturação ocorrida nos transformadores de corrente.

As tabelas seguintes ilustram os resultados obtidos por estes algoritmos. A TABELA 26 indica os resultados fornecidos para os testes realizados com dados oriundos do transformador de 25 MVA, enquanto que a TABELA 27 mostra a precisão obtida pelo mesmo algoritmo, porém para o banco de dados relativo ao transformador de 6,25 MVA.

TABELA 26 – Desempenho do algoritmo utilizando reconhecimento de padrões contendo dados saturados para o transformador de 25 MVA

| ALGORITMO 1 - TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 208 | 8 |
| Faltas Internas | 864 | 855 | 9 |
| Faltas Externas | 324 | 321 | 3 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 160 | 2 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 143 | 1 |
| Sobre-excitação | 90 | 89 | 1 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 30 | 0 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 105 | 3 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 640 | 8 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 2560 | 35 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 98,65 | 1,35 |

TABELA 27 – Desempenho do algoritmo utilizando reconhecimento de padrões contendo dados saturados para o transformador de 6,25 MVA

| ALGORITMO 1 - TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|---|-------------------|--------------|-------------|
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 206 | 10 |
| Faltas Internas | 864 | 850 | 14 |
| Faltas Externas | 324 | 318 | 6 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 158 | 4 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 141 | 3 |
| Sobre-excitação | 90 | 88 | 2 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 29 | 1 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 103 | 5 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 636 | 12 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 2538 | 57 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 97,80 | 2,20 |

As tabelas evidenciam os desempenhos dos algoritmos em questão. Nelas pode-se observar a precisão obtida pelas ferramentas desenvolvidas.

A primeira coluna mostra os tipos de situações simuladas. Na segunda coluna notam-se os valores correspondentes ao número total de padrões utilizados nos testes efetuados. Tais padrões envolvem dados com e sem a presença de saturação. Observam-se, na terceira e quarta colunas, a quantidade de acertos alcançada e os erros fornecidos pelo algoritmo para cada caso envolvido.

A metodologia analisada nesta etapa atingiu elevada precisão, na qual a percentagem total de respostas corretas foi de 97,80% para o transformador de 6,25 MVA. Isto representa um total de 2538 respostas corretas do algoritmo no que diz respeito à decisão de envio de sinais de operação ou bloqueio do relé diferencial, lembrando que o algoritmo deve fornecer a informação favorável ao sinal de acionamento apenas nos casos de faltas internas ao transformador e de energização com a presença de faltas internas. Nos demais casos, a resposta correta a ser fornecida pelo algoritmo é o sinal de bloqueio. No caso do transformador de 25 MVA, o algoritmo mostrou-se ainda mais preciso, atingindo um total de 98,65% de respostas corretas, o que equivale a 2560 acertos, por tratar-se dos dados utilizados nos treinamentos e testes das RNAs correspondentes.

Apesar de a ferramenta ter sido testada também com dados gerados por um sistema elétrico de configuração diferente daquele utilizado para obter os dados de

treinamento para a RNA em questão, pode-se concluir que o desempenho dos algoritmos mostrou-se elevado, fato este refletido pelos altos índices de acertos, o que atesta a versatilidade do método implementado.

7.2 Algoritmo envolvendo a Reconstrução de Sinais

Nesta seção será detalhado o algoritmo proposto com a utilização adicional de Redes Neurais Artificiais para a reconstrução de sinais saturados, que foi testado utilizando-se o mesmo banco de dados descrito no item 7.1. O conjunto de dados empregado, portanto, conteve novamente o efeito da saturação dos transformadores de corrente.

A metodologia proposta ilustrada anteriormente na FIGURA 45, constante no item 5.4 deste trabalho, foi testada com a inserção da melhor rede neural recorrente de Elman obtida no capítulo 6, com a função de reconstruir os dados que porventura contenham o efeito de saturação.

Após esta etapa, o algoritmo utilizou a melhor arquitetura neural do tipo MLP obtida também no capítulo 6, com o intuito de realizar o reconhecimento de padrões. Esta rede neural tem a função de fornecer as respostas relativas aos sinais de acionamento ou bloqueio do relé de proteção diferencial.

Através deste algoritmo, os sinais utilizados, que possuem significativo conteúdo de dados saturados, são inicialmente inseridos no módulo de correção de saturação. Após a correção dos sinais efetuada pela rede neural recorrente, o algoritmo verifica a existência de correntes diferenciais significativas. Caso essa hipótese se confirme, a próxima etapa será o reconhecimento de padrões que fornecerá a resposta relativa ao envio do sinal de acionamento ou bloqueio do relé diferencial de proteção do transformador. Esta última etapa do algoritmo é realizada pela melhor estrutura neural do tipo MLP obtida no capítulo 6 do trabalho e inclusa também no algoritmo do item 7.1 anterior.

É importante lembrar que os bancos de dados utilizados para os testes, conforme já exposto, foram gerados a partir dos sistemas elétricos simulados com o emprego do transformador de 25 MVA e também do transformador alternativo de

6,25 MVA. O conjunto de parâmetros simulados envolveu a proporção de casos anteriormente descrita no item 7.1.

Portanto, o conjunto total de simulações para cada um dos transformadores envolveu 2595 casos, ou seja, 7785 vetores de entrada para o algoritmo, considerando-se uma janela de dados móveis de três movimentos. Para efeito de testes, o arquivo utilizado se constituiu de 2595 vetores, representando 1/3 dos dados gerados para cada situação.

Tal banco de dados é idêntico, em termos de combinações de parâmetros, àquele construído no item anterior, no qual 50% dos dados contêm distorções devido à saturação ocorrida nos transformadores de corrente.

As tabelas mostradas a seguir indicam, portanto, os resultados obtidos pelos algoritmos que utilizaram os dois módulos de Redes Neurais Artificiais. Na TABELA 28 são mostrados os resultados do algoritmo testado com o banco de dados do transformador de 25 MVA. Na TABELA 29, observa-se a precisão do algoritmo testado com dados provenientes do transformador de 6,25 MVA.

TABELA 28 – Desempenho do algoritmo utilizando reconstrução de sinais saturados e reconhecimento de padrões para o transformador de 25 MVA

| ALGORITMO 2 - TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 216 | 0 |
| Faltas Internas | 864 | 863 | 1 |
| Faltas Externas | 324 | 324 | 0 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 162 | 0 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 143 | 1 |
| Sobre-excitação | 90 | 90 | 0 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 30 | 0 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 108 | 0 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 648 | 0 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 2593 | 2 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 99,92 | 0,08 |

TABELA 29– Desempenho do algoritmo utilizando reconstrução de sinais saturados e reconhecimento de padrões para o transformador de 6,25 MVA

| ALGORITMO 2 - TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|---|-------------------|--------------|-------------|
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 213 | 3 |
| Faltas Internas | 864 | 859 | 5 |
| Faltas Externas | 324 | 322 | 2 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 161 | 1 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 143 | 1 |
| Sobre-excitação | 90 | 90 | 0 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 30 | 0 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 106 | 2 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 644 | 4 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 2577 | 18 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 99,31 | 0,69 |

Nas tabelas expostas pode-se notar a precisão da ferramenta desenvolvida. A primeira coluna mostra os tipos de situações simuladas. Na segunda coluna, notam-se os valores correspondentes ao número total de padrões utilizados nos testes. Tais padrões envolvem dados com e sem a presença de saturação. Na terceira e quarta colunas observa-se a quantidade de acertos e de erros do algoritmo para cada caso avaliado.

A metodologia analisada nessa etapa atingiu elevada precisão, na qual a percentagem total de respostas corretas foi de 99,31% para o transformador de 6,25 MVA. Isto representa um total de 2577 respostas corretas do algoritmo, no que diz respeito à decisão de envio de sinais de operação ou bloqueio do relé diferencial. Para o transformador de 25 MVA, o nível de precisão do algoritmo foi ainda maior, atingindo um índice de acertos de 99,92%, que corresponde a 2593 respostas corretas.

Pode-se notar que, de maneira análoga ao algoritmo testado no item 7.1, apesar de a ferramenta ter sido testada também com dados gerados por um sistema elétrico de configuração diferente daquele utilizado para obter os dados de treinamento das RNAs em questão, o desempenho do algoritmo mostrou-se muito elevado para ambos os transformadores, como pode ser observado pela alta precisão alcançada.

Ressalta-se que este algoritmo supera, em termos de precisão, àquele estudado no item 7.1, no qual utilizou-se apenas uma estrutura neural tipo MLP a fim de

realizar o reconhecimento de padrões necessário para a tomada de decisão por parte do algoritmo.

Conclui-se, portanto, que a ferramenta de inteligência artificial que envolveu o módulo adicional de reconstrução de sinais alcançou maior precisão também quando foi testada com dados gerados por um segundo sistema elétrico, o que vem atestar o alto desempenho e versatilidade atingidos por essa ferramenta.

7.3 Algoritmo Convencional Completo de Proteção Diferencial Percentual de Transformadores de Potência

O aspecto mais importante nesta etapa é fornecer condições de comparação entre os algoritmos propostos e tradicionais. O algoritmo tradicional de proteção diferencial de transformadores de potência foi implementado com o objetivo de comparar as respostas dos algoritmos com relação a parâmetros como precisão, aplicabilidade e tempos de resposta.

A plataforma utilizada para tal empreendimento foi o programa MATLAB [67], por conter importantes rotinas de aplicação de filtragem baseada na Transformada Discreta de Fourier (DFT), ferramenta básica de distinção harmônica utilizada nos algoritmos atuais.

Para tal fim, implementou-se o algoritmo baseado na filtragem harmônica por DFT, no qual os dados de entrada constituem-se das correntes diferenciais e passantes que percorrem o sistema envolvido. Após esta etapa, o algoritmo verifica a ocorrência de corrente diferencial significativa para sensibilizar o relé. Caso não haja a incidência de um sinal desse tipo, o programa retorna para o passo anterior analisando o próximo sinal de entrada. Caso a corrente analisada se encontre em uma região de atuação do relé, o algoritmo segue para a próxima etapa, verificando as possíveis condições de magnetização ou de sobre-excitação do equipamento. Se tais condições se confirmarem, o algoritmo retorna ao passo inicial. Não ocorrendo tais fenômenos, a lógica do sistema determina a ocorrência de falta interna.

A análise de ocorrência de corrente diferencial capaz de sensibilizar o dispositivo de proteção é feita com base na curva característica do relé, ilustrada na FIGURA 3 do capítulo 1.

Como citado anteriormente, o ajuste de inclinação da curva característica do relé depende de muitos fatores que têm influência no sistema. A fim de cobrir uma faixa adequada de inclinações possíveis e evitar possíveis erros de ajuste da curva, o algoritmo foi testado levando em consideração as inclinações de 25 e 40%. Variou-se também durante os testes, o conteúdo da componente de segunda harmônica em relação à fundamental para os critérios de restrição em 20 e 50%, pois essa relação muda de acordo com o tipo e a potência do sistema e com as alterações às quais o mesmo fica submetido.

➤ Conforme [68], geralmente um alto conteúdo (por volta de 50 a 70%) de componente de segunda harmônica em relação à componente fundamental é encontrado nos primeiros ciclos dos transformadores tradicionais durante as operações de energização do equipamento.

Porém, em equipamentos mais modernos, conteúdos mais baixos podem estar presentes, variando, por exemplo, de 7 a 10%. Entretanto, usualmente considera-se que esses valores são maiores que 16% durante o processo de energização do transformador [69].

A empresa *General Electric* (GE), conforme [68], informa que o valor utilizado no ajuste dos seus relés corresponde a 20%. Valores acima deste nível são empregados para classificar o sinal como sendo de energização.

O banco de dados utilizado na realização dos testes no algoritmo em questão foi idêntico àquele empregado na fase de testes dos algoritmos dos itens 7.1 e 7.2 anteriores. Desta forma, os casos testados envolveram 50% de sinais com a presença de saturação dos dispositivos transformadores de corrente.

É importante novamente lembrar que o banco de dados utilizado foi elaborado a partir dos sistemas elétricos simulados com os transformadores de 25 e 6,25 MVA. O conjunto de parâmetros simulados envolveu a proporção de casos anteriormente descrita no item 7.1.

Portanto, o conjunto total de simulações para cada transformador resultou em 2595 casos, ou seja, 7785 vetores de entrada para o algoritmo, considerando-se uma

janela de dados móveis de três movimentos. Para efeito de testes, o arquivo utilizado consistiu de 2595 vetores, representando 1/3 dos dados gerados para cada situação.

A seguir são apresentados os resultados dos testes efetuados com o algoritmo convencional de proteção diferencial do transformador. A TABELA 30 mostra o desempenho do algoritmo em questão, para uma inclinação da curva característica do relé de 25% e uma variação do conteúdo de 2º harmônico em relação ao conteúdo da componente fundamental de 20% para a lógica de restrição do algoritmo, considerando-se o banco de dados do transformador de 25 MVA.

Na TABELA 31, é mostrado o desempenho do mesmo algoritmo, porém com os testes realizados com dados oriundos do transformador de 6,25 MVA.

TABELA 30 – Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 25% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 20\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 137 | 79 |
| Faltas Internas | 864 | 693 | 171 |
| Faltas Externas | 324 | 228 | 96 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 105 | 57 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 93 | 51 |
| Sobre-excitação | 90 | 65 | 25 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 23 | 7 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 72 | 36 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 489 | 159 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1914 | 681 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 73,76 | 26,24 |

TABELA 31 – Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 25% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 20\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 132 | 84 |
| Faltas Internas | 864 | 672 | 192 |
| Faltas Externas | 324 | 222 | 102 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 102 | 60 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 91 | 53 |
| Sobre-excitação | 90 | 65 | 25 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 22 | 8 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 70 | 38 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 473 | 175 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1858 | 737 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 71,60 | 28,40 |

Observa-se pelos resultados apresentados que o algoritmo diferencial tradicional utilizando a filtragem harmônica de Fourier sob essas condições apresentou resultados insatisfatórios em várias situações consideradas.

Segundo a TABELA 30, que mostra os resultados para o transformador de 25 MVA, o índice de acertos do algoritmo foi de apenas 73,76%, ou seja, o número de respostas corretas totalizou 1914 situações e o número de erros fornecidos pelo algoritmo foi de 681 padrões. Tais números podem ser traduzidos na inabilidade do algoritmo convencional em responder a dados que possuem alto índice de saturação. Para o transformador de 6,25 MVA, os resultados do algoritmo mostraram-se ainda menos precisos, com um índice de acertos de 71,60%, o que representa 1858 respostas corretas e 737 erros, como pode ser observado na TABELA 31.

As próximas tabelas mostram, de forma análoga, também para ambos os transformadores, o desempenho do mesmo algoritmo de proteção para combinações diferentes de valores relativos à inclinação da curva característica do relé e da relação entre os conteúdos de componentes de 2º harmônico e fundamental.

Na TABELA 32, observam-se as respostas fornecidas pelo algoritmo com 25% de inclinação característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para a lógica de restrição do relé, com dados do

transformador de 25 MVA. A TABELA 33 ilustra a precisão deste algoritmo para o transformador de 6,25 MVA.

TABELA 32 – Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 25% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 50\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 129 | 87 |
| Faltas Internas | 864 | 661 | 203 |
| Faltas Externas | 324 | 217 | 107 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 100 | 62 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 90 | 54 |
| Sobre-excitação | 90 | 62 | 28 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 21 | 9 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 67 | 41 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 467 | 181 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1823 | 772 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 70,25 | 29,75 |

TABELA 33 – Desempenho do algoritmo convencional com 25% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 25% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 50\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 114 | 102 |
| Faltas Internas | 864 | 610 | 254 |
| Faltas Externas | 324 | 216 | 108 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 104 | 58 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 95 | 49 |
| Sobre-excitação | 90 | 64 | 26 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 26 | 4 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 70 | 38 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 474 | 174 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1782 | 813 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 68,67 | 31,33 |

Pode-se concluir, pelas tabelas mostradas, que o desempenho dos algoritmos para os parâmetros citados continuou muito pobre, tendo um índice de acertos ainda

menor que o anterior. Nos testes relativos ao transformador de 6,25 MVA o índice de acertos obtido foi de 68,67%, o que corresponde a 1782 respostas corretas.

Nas próximas tabelas são mostrados os números de acertos e erros dos algoritmos convencionais para o mesmo conjunto de testes e ambos os transformadores, porém, variando-se a inclinação da curva característica de operação do relé diferencial para 40% e mantendo-se a proporção de conteúdo entre as componentes de 2º harmônico e fundamental em 20% para a análise de restrição do algoritmo. Na TABELA 34 é mostrado o desempenho do algoritmo testado com dados provenientes de transformador de 25 MVA, enquanto que a TABELA 35 mostra o índice de precisão obtido pelos testes realizados no transformador de 6,25 MVA.

TABELA 34 – Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 40% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 20\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 133 | 83 |
| Faltas Internas | 864 | 679 | 185 |
| Faltas Externas | 324 | 225 | 99 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 104 | 58 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 93 | 51 |
| Sobre-excitação | 90 | 64 | 26 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 22 | 8 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 70 | 38 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 483 | 165 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1882 | 713 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 72,52 | 27,48 |

TABELA 35 – Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 20% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 40% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 20\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 135 | 81 |
| Faltas Internas | 864 | 620 | 244 |
| Faltas Externas | 324 | 228 | 96 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 112 | 50 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 80 | 64 |
| Sobre-excitação | 90 | 71 | 19 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 26 | 4 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 77 | 31 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 480 | 168 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1838 | 757 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 70,83 | 29,17 |

A TABELA 34 mostra que o índice de acertos para o algoritmo testado com dados gerados pelo transformador de 25 MVA, para a curva característica com inclinação de 40% e a relação entre o conteúdo das harmônicas de restrição em 20%, foi de 72,52%, ou seja, obteve-se o número de 1882 respostas corretas. Por outro lado, a TABELA 35 mostra que o número de decisões corretas tomadas pelo algoritmo que envolveu o transformador de 6,25 MVA foi de 1838, ou seja, a ferramenta convencional obteve um índice de acertos de 70,83% dos sinais testados para esse caso. Desta forma, observa-se novamente um desempenho desfavorável do algoritmo de proteção convencional do transformador.

Concluindo a fase de testes dos algoritmos convencionais, as próximas tabelas indicam os resultados obtidos através do ajuste da inclinação da curva característica em 40%, com a relação entre o conteúdo das harmônicas de restrição em 50%. A TABELA 36 mostra os resultados obtidos pelo algoritmo que realizou os testes do transformador de 25 MVA, atingindo uma precisão de 73,37%, correspondente a 1904 respostas corretas. Na TABELA 37, apresenta-se o desempenho do sistema que envolveu o transformador de 6,25 MVA, onde o índice de precisão atingiu 71,14%, ou seja, 1846 decisões corretas fornecidas pelo programa.

TABELA 36 – Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 40% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 50\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 135 | 81 |
| Faltas Internas | 864 | 686 | 178 |
| Faltas Externas | 324 | 228 | 96 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 106 | 56 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 94 | 50 |
| Sobre-excitação | 90 | 64 | 26 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 22 | 8 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 71 | 37 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 489 | 159 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1904 | 691 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 73,37 | 26,63 |

TABELA 37 – Desempenho do algoritmo convencional com 40% de inclinação da curva característica e 50% de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental para o transformador de 6,25 MVA

| ALGORITMO CONVENCIONAL - TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|--|-------------------|--------------|--------------|
| CURVA CARACTERÍSTICA COM INCLINAÇÃO DE 40% | | | |
| CONTEÚDO PARA RESTRIÇÃO DE 2º HARMÔNICO $I_2 / I_1 = 50\%$ | | | |
| CASOS TESTADOS | NÚMERO DE PADRÕES | ACERTOS | ERROS |
| Energização | 216 | 144 | 72 |
| Faltas Internas | 864 | 616 | 248 |
| Faltas Externas | 324 | 224 | 100 |
| Faltas entre Transformador e TC | 162 | 118 | 44 |
| Energização com Falta Interna | 144 | 84 | 60 |
| Sobre-excitação | 90 | 75 | 15 |
| Energização de Bancos de Capacitores | 30 | 26 | 4 |
| Rejeição de Cargas | 108 | 72 | 36 |
| Remoção de Faltas Externas | 648 | 478 | 170 |
| Regime Permanente | 9 | 9 | 0 |
| TOTAL | 2595 | 1846 | 749 |
| TOTAL (%) | 100,00 | 71,14 | 28,86 |

De maneira semelhante ao exposto nas seis tabelas anteriores, os índices de acertos dos algoritmos convencionais, mostrados na TABELA 36 e TABELA 37, apresentaram resultados insatisfatórios em relação àqueles obtidos pelos algoritmos auxiliados por ferramentas inteligentes. Nota-se que o algoritmo do transformador de 25 MVA forneceu 1904 decisões corretas, valor este que equivale a uma precisão de 73,37% para o algoritmo de proteção. O desempenho da ferramenta para o

transformador de 6,25 MVA foi de 1846 respostas corretas, valor que equivale a 71,14% de precisão.

Portanto, os testes efetuados segundo o procedimento tradicional de análise harmônica do sinal na proteção diferencial demonstram haver grande imprecisão de respostas nos testes que envolvem sinais com deformidades decorrentes da saturação e/ou sinais com conteúdo harmônico atípico, variando conforme a percentagem harmônica considerada.

7.4 Comparação entre as Abordagens Propostas

A comparação entre as metodologias estudadas neste trabalho foi realizada neste item com o intuito de fornecer condições de análise global dos algoritmos propostos e convencionais de proteção de transformadores de potência, permitindo assim um estudo comparativo sobre os aspectos mais relevantes das ferramentas em questão.

A análise comparativa dos algoritmos testados permite ainda tirar importantes conclusões sobre as vantagens e desvantagens de cada método.

Para tanto, elaborou-se uma síntese das principais características de cada ferramenta. Desta forma, são comparados os níveis de precisão e os tempos de resposta de cada um dos seguintes algoritmos, em ambos os transformadores estudados:

1 – Algoritmo convencional de proteção diferencial do transformador utilizando filtragem harmônica de Fourier;

2 – Algoritmo com a utilização direta das melhores RNAs tipo MLP treinadas com a inclusão de dados saturados;

3 – Algoritmo envolvendo a reconstrução de sinais saturados aliado ao reconhecimento de padrões.

Na TABELA 38 e TABELA 39, os desempenhos dos melhores algoritmos obtidos no trabalho foram destacados, para ambos os transformadores.

TABELA 38 – Comparação entre os algoritmos de proteção propostos e convencional para o transformador de 25 MVA

| TRANSFORMADOR DE 25 MVA | | | |
|-------------------------|--------------|-------------------------------|------------------------|
| ALGORITMO | PRECISÃO (%) | VELOCIDADE | |
| | | Amostras por Ciclo Utilizadas | Tempo de Resposta (ms) |
| 1 | 73,76 | 16 | 16,67 |
| 2 | 98,65 | 4 | 4,17 |
| 3 | 99,92 | 8 | 8,33 |

TABELA 39 – Comparação entre os algoritmos de proteção propostos e convencional para o transformador de 6,25 MVA

| TRANSFORMADOR DE 6,25 MVA | | | |
|---------------------------|--------------|-------------------------------|------------------------|
| ALGORITMO | PRECISÃO (%) | VELOCIDADE | |
| | | Amostras por Ciclo Utilizadas | Tempo de Resposta (ms) |
| 1 | 71,60 | 16 | 16,67 |
| 2 | 97,80 | 4 | 4,17 |
| 3 | 99,31 | 8 | 8,33 |

As tabelas mostradas traduzem o desempenho dos algoritmos de proteção propostos e mostra a comparação entre estes e os algoritmos convencionais, baseados na decomposição harmônica dos sinais pelo uso da Transformada de Fourier.

Pode-se afirmar, inicialmente, que as duas abordagens propostas envolvendo a aplicação de ferramentas inteligentes aos algoritmos de proteção apresentaram desempenhos muito superiores se comparadas aos algoritmos convencionais. Tal superioridade se mostrou em relação à precisão alcançada e à velocidade de resposta dos mesmos. Nota-se que, enquanto nas aplicações convencionais o índice de precisão permaneceu em 71,60%, nas metodologias que fazem uso das RNAs este índice passou para, no mínimo, 97,80% para os testes efetuados nos algoritmos do transformador de 6,25 MVA. Para o transformador de 25 MVA, a maior precisão alcançada pelos algoritmos convencionais foi de 73,76%, enquanto que, para os algoritmos auxiliados por ferramentas inteligentes, o índice mínimo de acertos foi de 98,65%. Além disso, a resposta dos algoritmos baseados em redes neurais é

significativamente mais rápida, pois a abordagem convencional de Fourier necessita de, pelo menos, um ciclo de dados (16 amostras, neste caso), para responder a um sinal de entrada, considerando-se uma frequência amostral de 1kHz.

Com relação aos métodos que utilizam redes neurais como ferramentas de análise e decisão, os melhores algoritmos obtidos apresentaram resultados que necessitam de maior discussão. As estruturas que realizaram o emprego direto das melhores RNAs tipo MLP treinadas com a inclusão de dados saturados (algoritmo 2, nas tabelas anteriores) apresentaram índices de acertos um pouco menores (97,80% para o transformador de 6,25 MVA e 98,65% para o transformador de 25 MVA) que os do algoritmo 3, que são as metodologias que utilizaram o módulo de reconstrução de sinais (99,31% para o transformador de 6,25 MVA e 99,92% para o transformador de 25 MVA). Por outro lado, os algoritmos que não fizeram uso da reconstrução dos sinais forneceram menores tempos de resposta (1/4 de ciclo, 4 amostras por ciclo ou 4,17 ms) se comparadas aos últimos algoritmos (1/2 ciclo, 8 amostras por ciclo ou 8,33 ms).

Portanto, a decisão sobre qual das duas metodologias constitui a melhor alternativa ao método convencional é extremamente criteriosa. O método que forneceu a resposta em menor tempo representa uma poderosa ferramenta em termos de proteção elétrica. Por sua vez, o algoritmo 3 atingiu um índice de precisão ainda maior, embora necessite de um tempo de análise maior (8 amostras por ciclo). Este algoritmo, além de desempenhar as funções de proteção de transformadores de potência, possui a versatilidade de aplicações em funções de oscilografia do sistema, pelo fato de realizar a reconstrução de sinais saturados de correntes diferenciais.

É importante ressaltar que, independentemente da escolha a ser feita em função da aplicabilidade dos algoritmos propostos discutidos, estes mantêm grande vantagem sobre as metodologias convencionais relativas a esse tipo de proteção, no que diz respeito à precisão e ao tempo de resposta necessários aos algoritmos.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implantação de um sistema completo de proteção diferencial de transformadores de potência aplicando-se as técnicas de Redes Neurais Artificiais. Os métodos propostos tratam o esquema de proteção diferencial como um problema de reconhecimento e reconstrução de padrões, representando uma solução alternativa aos algoritmos convencionais.

✂ Através de observações e publicações na área, destaca-se a especial atenção necessária à detecção da corrente de magnetização (*inrush*) e outros fenômenos em qualquer sistema de proteção de transformadores de potência.

✂ As eventuais falhas na proteção digital ocorrem, principalmente, devido à inabilidade dos algoritmos atuais em diferenciar precisamente situações de falta de situações de magnetização ou outros casos com conteúdos harmônicos atípicos.

✂ Na etapa de geração de dados, utilizou-se o programa ATP – *Alternative Transients Program* – no qual os sinais de correntes diferenciais e correntes passantes foram obtidos para as diversas situações envolvidas. O *software* referido permite simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas de quaisquer configurações.

✂ Em relação aos programas SNNS – *Stuttgart Neural Network Simulator* – e MATLAB, obtiveram-se resultados muito promissores, com elevado grau de precisão e eficiência. O alto potencial dos simuladores utilizados e suas amigáveis interfaces gráficas constituíram-se fatores decisivos em suas aplicações. O simulador ✂ SNNS fornece facilidades de operação com os arquivos de dados e resultados, bem como na construção, ajuste e aprendizagem de redes neurais, contando com ampla gama de opções em algoritmos. O programa permite ainda o acompanhamento dos erros de aprendizagem através de sua saída gráfica. Por sua vez, o programa ✂ MATLAB permite a simulação de ferramentas computacionais de forma eficiente e rápida, contando ainda com vasta gama de opções de sub-rotinas especializadas.

O trabalho abordou dois tipos propostos de algoritmos de proteção de transformadores de potência utilizando ferramentas inteligentes e realizou a análise comparativa entre eles. O algoritmo convencional de proteção diferencial foi também implementado a fim de melhor avaliar as metodologias desenvolvidas.

✂ O primeiro algoritmo proposto envolveu a utilização de redes neurais dos tipos RBF e MLP, com o intuito de realizar o reconhecimento de padrões usando um

banco de dados que inclui situações em que tenha ocorrido a saturação dos transformadores de corrente. As aplicações mais eficientes para esse tipo de algoritmo obtiveram índices de acertos de 98,65% e 97,80% para os transformadores de 25 MVA e 6,25 MVA, respectivamente, usando-se uma estrutura neural do tipo MLP e necessitando de um tempo de resposta de 4,17 ms, ou seja, $\frac{1}{4}$ de ciclo de dados.

✕ O segundo algoritmo proposto realizou o reconhecimento de padrões com o emprego de um segundo módulo de RNAs, utilizado na reconstrução dos sinais saturados. Tal metodologia utilizou a mesma rede neural do tipo MLP anterior na distinção de padrões, porém, fez uso ainda de uma rede neural recorrente na tarefa de reconstrução dos padrões distorcidos. Nesta aplicação, o índice de respostas corretas fornecido foi de 99,92% e 99,31% para os transformadores de 25 MVA e 6,25 MVA respectivamente, valores esses superiores ao algoritmo anterior, embora a resposta seja fornecida após a computação de $\frac{1}{2}$ ciclo de dados, ou seja, 8,33 ms. Esta ferramenta disponibiliza ainda um possível recurso para a função de oscilografia do sistema, já que realiza a perfeita reconstrução das correntes diferenciais de entrada que estejam afetadas pelo fenômeno de saturação dos TCs.

O algoritmo convencional de proteção diferencial foi avaliado através de testes realizados com o mesmo banco de dados utilizado nos testes dos algoritmos anteriores, para ambos os transformadores. Variaram-se, ainda, os valores de inclinação da curva característica do relé diferencial e as percentagens de conteúdo de 2º harmônico em relação à componente fundamental, para a lógica de restrição convencional. Com isso, cobriu-se uma vasta gama de testes para esta ferramenta. Entretanto, o desempenho desse algoritmo mostrou-se insatisfatório, apresentando índices gerais de acertos de apenas 73,76% e 71,60% para os transformadores de 25 MVA e 6,25 MVA, respectivamente, considerando-se o mesmo nível de saturação presente nos sinais de entrada nas implementações baseadas em redes neurais. Além disso, é preciso considerar que a metodologia baseada na decomposição harmônica de Fourier necessita de, no mínimo, um ciclo de dados a fim de fornecer a resposta a um sinal de entrada, tempo este muito superior ao obtido pelos algoritmos anteriores.

Importantes constatações foram realizadas com ênfase na eficiência dos algoritmos propostos, considerando os aspectos mais relevantes para suas aplicabilidades, como precisão, velocidade e estrutura das ferramentas.

Destaca-se que os resultados encorajadores, conseguidos pela implementação dos algoritmos baseados em inteligência artificial, foram gerados pelos testes realizados com dados advindos, inclusive, de um sistema elétrico diferente daquele empregado no treinamento das Redes Neurais Artificiais, atestando, desta forma, a flexibilidade dos métodos propostos.

A contribuição do trabalho em relação ao estado da arte dos métodos utilizados e estudados até o momento tem como base os seguintes aspectos:

- O tratamento da distorção causada pela saturação dos TCs foi implementado através de Redes Neurais Artificiais Recorrentes, as quais se constituem ferramentas de simples topologia e de alto grau de precisão em relação às já estudadas;
- A reconstrução dos sinais distorcidos foi realizada diretamente sobre as correntes diferenciais que percorrem o relé, ao contrário dos métodos presentes na literatura, nos quais a correção é feita a partir das correntes secundárias do TC;
- O banco de dados empregado no trabalho representou todas as situações de significativa importância no contexto da proteção diferencial de transformadores de potência. Tal conjunto de dados conteve alto conteúdo de saturação e um transformador alternativo foi utilizado na geração de dados de testes;
- Realizou-se a análise comparativa completa entre as metodologias propostas e o algoritmo convencional de proteção, considerando-se a abordagem dos diversos parâmetros que devem envolver esse tipo de estudo.

Uma proposta de continuidade do trabalho será ainda viabilizada quando os dados gerados através de simulações computacionais forem substituídos por valores reais, obtidos através de ensaios em campo de transformadores de potência, e a partir do momento em que a elaboração de um protótipo do relé diferencial digital for iniciada.

Conclui-se, através dos resultados obtidos, que a aplicação das ferramentas Redes Neurais Artificiais constitui uma nova e importante etapa na análise da proteção diferencial de transformadores de potência.

9 PUBLICAÇÕES

O trabalho realizado gerou importantes publicações e debates em fóruns nacionais e internacionais, como apresentado a seguir:

9.1 Publicações em Congressos e Conferências

1 - XX Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (1999), São Paulo – SP – Brasil.

Título: “Um Novo Método Utilizando Redes Neurais Artificiais na Proteção Diferencial de Transformadores de Potência”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury, Maria C. Tavares, Paulo E. G. Campos.

2 - XIII Congresso Brasileiro de Automática (2000), Florianópolis – SC – Brasil.

Título: “Alto Desempenho na Proteção Diferencial de Transformadores de Potência com a Utilização de Redes Neurais Artificiais”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury, Maria C. Tavares, Paulo E. G. Campos.

3 - IASTED International Conference on Modelling and Simulation (2000), Pittsburgh – Pennsylvania – USA.

Título: “Discrimination between Inrush Currents and Internal Faults in Power Transformers using Artificial Neural Networks”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury.

4 - IEEE International Conference on Power System Technology – POWERCON (2000), Perth – Austrália.

Título: “A Transformer Differential Relay Utilizing Neural Networks”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury, Maria C. Tavares, Paulo E. G. Campos.

5 - IEEE / PES T&D 2002 Latin America Congress (2002), São Paulo – SP – Brasil.

Título: “An ANN-Based Routine for Power Transformer Protection”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury, Maria C. Tavares, Paulo E. G. Campos.

6 - IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications – AIA (2002), Málaga – Espanha.

Título: “Power Transformer Protection using ANN-Based Routines”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury, Maria C. Tavares.

7 - IEEE / PES General Meeting (2003), Toronto – Canadá.

Título: “An Alternative Approach Using Pattern Recognition for Power Transformer Protection”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury.

8 - XV Congresso Brasileiro de Automática (2004), Gramado – RS – Brasil.

Título: “Uma Técnica de Compensação Baseada em Redes Neurais Recorrentes para a Saturação de Transformadores de Corrente”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury.

9 - XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE (2005), Curitiba – PR – Brasil.

Título: “Correção da Saturação de TCs Através de Redes Neurais Artificiais Recorrentes”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury.

10 - IEEE / PES General Meeting (2005), San Francisco – USA.

Título: “A Power Transformer Protection with Recurrent ANN Saturation Correction”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury.

9.2 Publicações em Revistas

1 - Revista Controle e Automação – Sociedade Brasileira de Automática (2003), Vol.14, n.03, setembro.

Título: “Alto Desempenho na Proteção Diferencial de Transformadores de Potência com a Utilização de Redes Neurais Artificiais”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury, Maria C. Tavares, Paulo E. G. Campos.

2 - European Transactions on Electrical Power – ETEP (2005), Vol. 15 (no prelo).

Título: “An Alternative Approach Using Artificial Neural Networks for Power Transformer Protection”.

Autores: Ênio C. Segatto, Denis V. Coury.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] Coury, D.V. (1997). *Curso de Proteção Digital em Sistemas Elétricos*. EESC – USP. São Carlos. SP. Brasil.
- [2] Kolla, S.R. ; Gedeon, D.V. (1995). *Microprocessor-based Protection Scheme for Power Transformers*. Proceedings of the 1995 22nd IEEE Combined Electrical/Electronic Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference and Exhibition. p.195-198.
- [3] Piovesan, L.S. (1997). *Avaliação de Algoritmos para Proteção Diferencial de Transformadores*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1997.
- [4] Stigant, S.A. ; Franklin, A.C. (1973). *The J&P Transformer Book*. USA: Halsted Press.
- [5] Pihler, J. ; Grear, B. ; Dolinar, D. (1997). *Improved Operation of Power Transformer Protection Using Artificial Neural Network*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.12, n.3, p.1128-1136.
- [6] Kolla, S.R. (1995). *Digital Protection of Power Transformers Using Artificial Neural Networks*. Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Instrumentation and Control, p.141-150.
- [7] Horowitz, S. H. ; Phadke, A. G. (1995). *Power System Relaying*. England: Research Studies Press Ltd., 2nd ed.
- [8] Verma, H.K. ; Basha, A.M. (1986). A Microprocessor-based Inrush Restrained Differential Relay for Transformer Protection. *Journal of Microcomputer Applications*, p.313-318.

- [9] Coury, D.V. ; Campos, P.E.G. ; Tavares, M.C. (1998). *Utilização do ATP-EMTP para Estudo da Proteção Diferencial dos Transformadores de Potência*. XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, MG, Brasil, set.
- [10] Sidhu, T.S. ; Sachdev, M.S. (1992). *On-line Identification of Magnetizing Inrush and Internal Faults in Three-Phase Transformers*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.7, p.1885-1891.
- [11] Ling, P.C.Y. ; Basak, A. (1989). *A New Detection Scheme for Realisation of Magnetising Inrush Current in Transformers*. Fourth International Conference on Developments in Power System Protection, p.239-243.
- [12] Rahman, M.A. ; Jeyasurya, B. (1988). *A State-of-the-art Review of Transformer Protection Algorithms*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.3, n.2, p.534-544.
- [13] Murty, Y.V.V.S. ; Smolinski, W.J. (1988). *Design and Implementation of a Digital Differential Relay for a 3-Phase Power Transformer Based on Kalman Filtering Theory*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.3, n.2, p.525-533.
- [14] Liu, P. et al. (1992). *Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults*, IEEE Transactions on Power Delivery, v.7, n.4, p.1912-1919.
- [15] Hijazi, M.E.A. ; Basak, A. (1993). *Analysis of Integral Method for Fault Detection in Transformers*. IEEE Transactions on Magnetics, v.29, n.6, p.3213-3215.
- [16] Grcar, B. ; Dolinar, D. (1994). *Integrated Digital Power Transformer Protection*. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, v.141, n.4, p.323-328.

- [17] Bo, Z.Q. et al. (1997). *A New Technique to Detect Transformer Magnetizing Inrush*. Universities Power Engineering Conference, v.1, p.129-132.
- [18] Criss, J. ; Lawhead, L. (1996). *Using Transformer Differential Relay Iop Characteristics to Measure Near-trip Conditions*. Proceedings of the 1996 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, p.103-108.
- [19] Wiszniewski, A. ; Kasztenny, B. (1995). *A Multi-criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.10, n.4, p.1786-1792.
- [20] Mao, P.L. et al. (1998). *Identification of Electromagnetic Transients in Power Transformer System Using Artificial Neural Network*. Proceedings of the 1998 International Conference on Power System Technology, v.2, p.880-884.
- [21] Perez, L.G. et al. (1994). *Training an Artificial Neural Network to Discriminate Between Magnetizing Inrush and Internal Faults*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.9, n.1, p.434-441.
- [22] Bastard, P. ; Meunier, M. ; Régál, H. (1995). *Neural Network-based Algorithm for Power Transformer Differential Relays*. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, v.142, n.4, p.386-392.
- [23] Nagpal, M. et al. (1995). *Using a Neural Network for Transformer Protection*. Proceedings of the 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery, Part 2, p.674-679.
- [24] Bertrand, P. ; Martin, E. ; Guillot, M. (1997). *Neural Networks: A Mature Technique for Protection Relays*. IEE 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Part 1, v.1, p.22/1-22/5.

- [25] Sidhu, T.S. ; Gill, H.S. ; Sachdev, M.S. (1999). *A Power Transformer Protection Technique with Stability During Current Transformer Saturation and Ratio-mismatch Conditions*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.14, n.3, p.798-804.
- [26] Zocholl, S.E. (1998). *Transformer Protection – An Analysis of Field Cases*. 25th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, USA.
- [27] Mao, P.L. ; Aggarwal, R.K. (2001). *A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformers using Combined Wavelet Transform and Neural Network*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.16, n.4, p.654-660.
- [28] Yu, D.C. et al. (1999). *Neural Network for Current Transformer Saturation Correction*. Proceedings of IEEE Power Engineering Society – Transmission and Distribution Conference, v.1, p. 441-446.
- [29] Cummins, J.C. ; Yu, D.C. ; Kojovic, L.A. (2000). *Simplified Artificial Neural Network Structure with the Current Transformer Saturation Detector provides a Good Estimate of Primary Currents*. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, v.3, p.1373-1378.
- [30] Yu, D.C. et al. (2001). *Correction of Current Transformer Distorted Secondary Currents Due to Saturation Using Artificial Neural Networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.16, n.2, p.189-194.
- [31] Kang, Y.C. et al. (1996). *Development in Hardware Implementation of a Compensating Algorithm for the Secondary Current of Current Transformers*. IEE Proceedings in Electric Power Applications, v.143, n.1, p. 41-49.

- [32] Kang, Y.C. et al. (1997). *Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.12, n.1, p. 116-124.
- [33] Jamali, S. ; Radji, K.M. (1997). *A Digital Compensating Technique for the Saturation of Protective Current Transformers*. Proceedings of Thirty Second Universities Power Engineering Conference (UPEC'97), v.1, p. 10-12.
- [34] Bozoki, B. ; Calhoun, C.M. (1990). *Gapped Core Transformer Characteristics and Performance*. IEEE Power System Relaying Committee, IEEE Transactions PWRD, v.5, n.4, p.1732-1740.
- [35] Masson, L. (1979). *Circuit for the Dynamic Control of Magnetic Flux in Current Transformers*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.98, n.6, p.1990-1995.
- [36] Wright, A. (1968). *Current Transformers, their Transient and Steady State Performance*. London: Chapman & Hall, p. 77.
- [37] Chen, K.W ; Glad, S.T. (1991). *Estimation of the Primary Current in a Saturated Transformer*. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, p.116-124.
- [38] Kezunovic, M. et al. (1993). *Experimental Evaluation of EMTP-based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study*. 93 WM 041-4 PWRD, IEEE/PES Winter Meeting, New York.
- [39] Barnett, C.W. et al. (1993). *Relay Performance Considerations with Low Ratio CTs and High Fault Currents*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.8, n.3, p.884-887.

- [40] Glinkowski, M.T. ; Esztergalyos, J. (1996). *Transient Modelling of Electromechanical Relays*. Part 1: Armature Type Overcurrent Relay. IEEE Transactions on Power Delivery, v.11, n.2.
- [41] Conrad, T. ; Schlabbach, J. ; Speh, R. (1984). *Verfahren zur Korrektur der verzerrten Sekundarströme von Stromwandlern*. Electrotechnische Zeitschrift Archiv, v.6, n.2, p.77-79.
- [42] Kasztenny, B, et al. (1995). *A Power Transformer Model for Investigation of Protection Schemes*. International Conference on Power Systems Transients, p.136-141.
- [43] Stringer, N.T. et al. (1995). *Real-Time Transient and Performance of Transformer Differential Relays*. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, v.2, p.1142-1150.
- [44] Chaudhary, A.K.S. ; Tam, K.S. ; Phadke, A.G. (1994). *Protection System Representation in the Electromagnetic Transients Program*. IEEE Transactions on Power Delivery, v.9, n.2, p.700-711.
- [45] Coury, D.V. ; Campos, P.E.G. ; Tavares, M.C. (1998). *Modelling a Power Transformer for Investigation of Digital Protection Schemes*. The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece.
- [46] Tecido Nervoso. (1998). Disponível em:
<http://members.fortunecity.com/rl/tecido.htm>
- [47] Hertz, J. ; Krogh, A. ; Palmer, R.G. (1991). *Introduction to the Theory of Neural Computation*. USA: Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley Publishing Company, v.1.

- [48] Braga, A.P. ; Carvalho, A.C.P.L.F. ; Ludermir, T.B. (2000). *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 262 p.
- [49] Bishop, C. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. England: Oxford University Press, 504p.
- [50] Haykin, S. (1994). *Neural Networks – A Comprehensive Foundation*. New York: Prentice-Hall, 842p.
- [51] Elman, J.L. (1990). Finding Structure in Time. *Cognitive Science*, v.14, p.179-211.
- [52] Lang, K.J. ; Hinton, J.E. (1988). *The Development of the Time-Delay Neural Networks Architecture for Speech Recognition*. Carnegie Mellon University. Technical Report CMU-CS-88-152.
- [53] Waibel, A. (1989). Modular Construction of Time-Delay Neural Networks for Speech Recognition. *Neural Computation*, v.1, p.39-46.
- [54] Waibel, A. et al. (1989). Phoneme Recognition using Time-Delay Neural Networks. *IEEE ASSP Magazine*, v.37, p.328-339.
- [55] Wan, E.A. (1990). *Temporal Backpropagation for FIR Neural Networks*. Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Networks.
- [56] Wan, E.A. (1990b). *Temporal Backpropagation: An Efficient Algorithm for Finite Impulse Response Neural Networks*. Proc. of the 1990 Connectionist Models Summer School.
- [57] Werbos, P. (1974). *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences*. Tese (PhD), Harvard University.

- [58] Werbos, P. (1990). Backpropagation Through Time: What it Does and to Do it. Proc. of IEEE, v.78, p.1550-1560.
- [59] Williams, R.J. ; Peng, J. (1989). *Reinforcement Learning Algorithms as Function Optimizers*. Proc. IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks, v.2, p.89-95, Washington.
- [60] Williams, R.J. ; Zipser, D. (1989). A Learning Algorithm for Continually Running Fully Recurrent Neural Networks. *Neural Computation*, v.1, p.270-280.
- [61] Fahlman, S.E. (1991). *The Recurrent Cascade-Correlation Architecture*. Carnegie-Mellon University. Technical Report CMU-CS-91-100.
- [62] Jordan M.I. (1986). *Attractor Dynamics and Parallelism in a Connectionist Sequential Machine*. Proc. of the Eighth Annual Conf. of the Cognitive Science Society, p.531-546.
- [63] Giles, C. et al. (1992). Learning and Extracting Finite State Automata with Second-Order Recurrent Neural Networks. *Neural Computation*, v.4, n.3, p.393-405.
- [64] Pineda, F.J. (1987). Generalization of Back-Propagation to Recurrent Neural Networks. *Physical Review Letters*, v.59, p.2229-2232.
- [65] *Alternative Transients Program Rule Book*. (1987). Leuven EMTP Center (LEC).
- [66] *SNNS User Manual*. (1995). Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems (IPVR), University of Stuttgart.
- [67] *MATLAB User's Guide*. (1997). The Math Works Inc., Makron Books.

- [68] *Magnetizing Inrush Inhibit Operating Principles*. (2002). GE Power Management, Technical Note nº. GET-8429. Disponível em:
<http://pm.geindustrial.com/FAQ/Documents/745/GET-8429.pdf>
- [69] Segatto, Ê.C. (1999). *Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Arquivo completo de dados de entrada do programa ATP para um caso de energização do transformador.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C
C ARQUIVO BASE DO SISTEMA COM TRANSFORMADOR
C
2.00E-05.1000000
      1      1      1      1      1
TACS HYBRID
$DISABLE

Simulação de energização do transformador com TCs

$ENABLE
C Fontes
C <nome>                                <--T start<-- T stop
91CHAP                                  -1.          1.
91CHBP                                  -1.          1.
91CHCP                                  -1.          1.
91CHAS                                  -1.          1.
91CHBS                                  -1.          1.
91CHCS                                  -1.          1.
C Correntes diferenciais
98IDIFA =(CHAP-((CHAS - CHCS) / (SQRT (3.))))
98IDIFB =(CHBP-((CHBS - CHAS) / (SQRT (3.))))
98IDIFC =(CHCP-((CHCS - CHBS) / (SQRT (3.))))
33IDIFA IDIFB IDIFC
BLANK
C Rede elétrica
$VINTAGE, 1
  CH1A NO1A      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CH1B NO1B      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  CH1C NO1C      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C RESISTÊNCIAS AUXILIARES (GRUPO2)
C NO2A TPRA      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C NO2B TPRB      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C NO2C TPRC      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C
C TSECA NO3A      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C TSECB NO3B      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C TSECC NO3C      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C
  NO4A NT1A      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  NO4B NT1B      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  NO4C NT1C      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C Capacitâncias para balanço do sistema
  TPRA          5.000000000E-05 0
  TPRB          5.000000000E-05 0
  TPRC          5.000000000E-05 0
C Dados referentes à carga
  CHGA          17.520E+00 19.79811000E+00 0.000000000E+00 0
  CHGB          17.520E+00 19.79811000E+00 0.000000000E+00 0
  CHGC          17.520E+00 19.79811000E+00 0.000000000E+00 0
C Ligação do ponto neutro NEUT do transformador
  NEUT NNI      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  NNI          1.
$VINTAGE, 0
C dados referentes ao equivalente de geração, em valores de sequência
51FONTA G1A      7.5962 115.4500000 0
52FONTB G1B      7.1003 53.9900000 0
53FONTC G1C
C dados referentes à linha de transmissão com parâmetros concentrados
    
```

```

51CH2A LTNA          0.7186 11.45000+00          0
52CH2B LTNB          .31010 2.41000E+00          0
53CH2C LTNC
$VINTAGE, 1
C TC do lado primário do transformador principal
  TRANSFORMER          4.2E-36.0E-2TC1A
C <++++++> Cards punched by support routine on 04-Mar-01 01.01.12 <++++++>
C SATURATION
C 60.0      1.00E-035.00E-06          0
C 0.6000000000E-03          16.00
C 1.6000000000E-03          61.00
C 3.0000000000E-03          146.00
C 4.0000000000E-03          204.00
C 6.2000000000E-03          253.00
C 10.0000000000E-03         272.00
C 20.0000000000E-03         283.00
C 40.0000000000E-03         290.00
C 100.0000000000E-03        299.00
C 200.0000000000E-03        306.00
C 1000.0000000000E-03       319.00
C 2000.0000000000E-03       323.00
C
  9999
  4.24264069E-03  6.00210877E-02
  1.07873642E-02  2.28830397E-01
  2.01140252E-02  5.47692426E-01
  2.75940636E-02  7.65268869E-01
  5.12761747E-02  9.49083450E-01
  1.07894161E-01  1.02035849E+00
  2.69933174E-01  1.06162299E+00
  6.04456480E-01  1.08788222E+00
  1.49507208E+00  1.12164408E+00
  3.04682714E+00  1.14790330E+00
  1.50921202E+01  1.19667044E+00
  3.59800523E+01  1.21167571E+00
  9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1TCAP          0.85 .1 200.
2NO2A TPRA          .0001 .1 5.
C FASE B DO TC PRIMÁRIO
  TRANSFORMER TC1A          TC1B
1TCBP
2NO2B TPRB
C FASE C DO TC PRIMÁRIO
  TRANSFORMER TC1A          TC1C
1TCCP
2NO2C TPRC
C IMPEDÂNCIA NO SECUNDÁRIO DO TC do lado PRIMÁRIO do transformador principal
  TCAP CHAP          50.00
  TCBP CHBP          50.00
  TCCP CHCP          50.00
C TC DO SECUNDÁRIO DO TRAFÓ PRINCIPAL
  TRANSFORMER          4.2E-36.0E-2TC2A
C <++++++> Cards punched by support routine on 04-Mar-01 01.01.12 <++++++>
C SATURATION
C 60.0      1.00E-035.00E-06          0
C 0.6000000000E-03          16.00
C 1.6000000000E-03          61.00
C 3.0000000000E-03          146.00
C 4.0000000000E-03          204.00
C 6.2000000000E-03          253.00
C 10.0000000000E-03         272.00
C 20.0000000000E-03         283.00
C 40.0000000000E-03         290.00
C 100.0000000000E-03        299.00
C 200.0000000000E-03        306.00
C 1000.0000000000E-03       319.00
C 2000.0000000000E-03       323.00
C
  9999
  4.24264069E-03  6.00210877E-02
  1.07873642E-02  2.28830397E-01
  2.01140252E-02  5.47692426E-01
  2.75940636E-02  7.65268869E-01
  5.12761747E-02  9.49083450E-01

```

| | | | |
|--|-------------------------------|--------|---|
| 1.07894161E-01 | 1.02035849E+00 | | |
| 2.69933174E-01 | 1.06162299E+00 | | |
| 6.04456480E-01 | 1.08788222E+00 | | |
| 1.49507208E+00 | 1.12164408E+00 | | |
| 3.04682714E+00 | 1.14790330E+00 | | |
| 1.50921202E+01 | 1.19667044E+00 | | |
| 3.59800523E+01 | 1.21167571E+00 | | |
| 9999 | | | |
| C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 | | | |
| 1TCAS | 0.85 .1 | 2000. | |
| 2TSECA NO3A | .1 .1 | 5. | |
| C FASE B DO TC SECUNDÁRIO | | | |
| TRANSFORMER TC2A | | TC2B | |
| 1TCBS | | | |
| 2TSECB NO3B | | | |
| C FASE C DO TC SECUNDÁRIO | | | |
| TRANSFORMER TC2A | | TC2C | |
| 1TCCS | | | |
| 2TSECC NO3C | | | |
| C IMPEDÂNCIA NO SECUNDÁRIO DO TC do lado secundário do transformador principal | | | |
| TCAS CHAS | 50.00 | | 0 |
| TCBS CHBS | 50.00 | | 0 |
| TCCS CHCS | 50.00 | | 0 |
| C Dados referentes ao transformador PRINCIPAL | | | |
| C Primeiro transformador | | | |
| TRANSFORMER | 3.019326.899T1 | 63000. | |
| C <+++++> Cards punched by support routine on 14-Mar-01 11.54.14 <+++++> | | | |
| C SATURATION | | | |
| C 60.0 7.9674338.333333 | | 0 | |
| C 0.717000000E-03 | 0.90 | | |
| C 1.45062000000-03 | 1.00 | | |
| C 7.978600000E-03 | 1.10 | | |
| C 41.112900000E-03 | 1.15 | | |
| C 113.77700000E-03 | 1.18 | | |
| C 9999 | | | |
| 1.06055811E+00 | 2.68995372E+01 | | |
| 3.28814356E+00 | 2.98883747E+01 | | |
| 2.08489263E+01 | 3.28772122E+01 | | |
| 1.29055289E+02 | 3.43716309E+01 | | |
| 3.80764491E+02 | 3.52682821E+01 | | |
| 9999 | | | |
| C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 | | | |
| 1TSECA NEUT | .0175 1.514 7.967 | | |
| 2TPRA TPRB | 1.746 151.4 138.0 | | 0 |
| C Segundo transformador | | | |
| TRANSFORMER T1 | | T2 | |
| 1TSECB NEUT | | | |
| 2TPRB TPRC | | | |
| C Terceiro transformador | | | |
| TRANSFORMER T1 | | T3 | |
| 1TSECC NEUT | | | |
| 2TPRC TPRA | | | |
| C Final da descrição do transformador | | | |
| BLANK card terminating network | | | |
| C Dados referentes às chaves do sistema elétrico | | | |
| G1A CH1A | 5.00E-03 1.000E+02 0.000E+00 | | 1 |
| G1B CH1B | 7.00E-03 1.000E+02 0.000E+00 | | 1 |
| G1C CH1C | 9.00E-03 1.000E+02 0.000E+00 | | 1 |
| C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 | | | |
| NT1A CH2A | +1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 1 |
| NT1B CH2B | +1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 1 |
| NT1C CH2C | +1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 1 |
| LTNA CHGA | -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| LTNB CHGB | -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| LTNC CHGC | -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| C Chaves referentes à ligação dos tapes do transformador à terra | | | |
| C N10A | 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| C N50A | 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| C N90A | 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| C Chaves para simular falta externa | | | |
| C CH2A | 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| C CH2B | 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |
| C CH2C | 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 | | 0 |


```

C CHAVES DE MEDIÇÃO PARA TRANSFERIR SINAL À TACS
C TC do primário do transformador principal
  CHAP          MEASURING          1
  CHBP          MEASURING          1
  CHCP          MEASURING          1
C TC do secundário do transformador principal
  CHAS          MEASURING          1
  CHBS          MEASURING          1
  CHCS          MEASURING          1
BLANK card terminating switches
C Dados referentes ao gerador
14FONTA 0 112.7E+03 6.000E+01 0.000E+00      0      -1.000E+00 1.000E+02
14FONTB 0 112.7E+03 6.000E+01 -1.200E+02     0      -1.000E+00 1.000E+02
14FONTC 0 112.7E+03 6.000E+01 1.200E+02     0      -1.000E+00 1.000E+02
BLANK card terminating sources
  CH1A CH1B CH1C NT1A NT1B NT1C
BLANK card terminating outputs
BLANK card terminating plots
BEGIN NEW DATA CASE

```

APÊNDICE B

A seguir são mostrados alguns dos resultados obtidos com a simulação do sistema de potência envolvendo o transformador de 25 MVA no programa ATP.

A FIGURA 68 e a FIGURA 69 trazem situações de faltas internas entre as espiras das fases A e B do transformador. Na FIGURA 68 há 30% dos enrolamentos envolvidos, enquanto que na FIGURA 69 a percentagem de envolvimento é de 70%. Na FIGURA 70 observa-se um caso de falta externa monofásica, que acontece em 10 ms, sob tensão de 112,7 kV e carga de 10 MVA. A FIGURA 71 traz uma situação de falta externa trifásica, ocorrida em 25 ms, sob tensão de 112,7 kV. Neste caso, observa-se a presença de correntes diferenciais devidas ao fenômeno de saturação dos TCs. A FIGURA 72 trata de uma situação de remoção de falta externa monofásica, com tensão de 112,7 kV e carga de 10 MVA, onde a falta ocorre em 10 ms e é removida em 50 ms. A FIGURA 73 ilustra um caso de remoção de falta externa trifásica, de parâmetros idênticos aos da FIGURA 72, mas com as fases A, B e C sofrendo a falta em 10, 12 e 14 ms, respectivamente, e a mesma sendo removida em 50 ms para as três fases. Neste caso há novamente a presença do fenômeno de saturação dos TCs. A FIGURA 74 mostra uma curva relativa a uma situação de rejeição de carga de 10 MVA, com tensão de 112,7 kV (valor de pico fase-neutro). Para esta situação, a carga foi retirada nos instantes 10, 12 e 10 ms das fases A, B e C, respectivamente. A FIGURA 75 ilustra uma situação de falta ocorrendo entre o transformador e o TC secundário. Neste caso a tensão é 112,7 kV e a falta acontece em 10 ms para as três fases. Na FIGURA 76 é apresentado um caso de sobre-excitação no transformador onde se observam as tensões primárias às quais o transformador fica submetido para um caso de sobre-excitação em 128 kV. Cabe ressaltar que a tensão aplicada nos arquivos corresponde ao valor eficaz RMS, sendo que o mesmo equivale a um nível de tensão de 156,74 kV entre fases, lembrando ainda que o valor nominal de tensão primária do transformador utilizado é de 138 kV entre fases. A FIGURA 77 mostra as formas de onda das tensões secundárias para o caso de sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz. As correntes diferenciais para esse caso de sobre-excitação são mostradas na FIGURA 78 seguinte. As próximas figuras 79, 80 e 81 ilustram as mesmas situações descritas anteriormente, porém associadas a

um nível de tensão de sobre-excitação de 120 kV, valor eficaz correspondente a 146,94 kV entre fases. A FIGURA 82, a FIGURA 83 e a FIGURA 84 seguintes mostram as correntes primárias, secundárias e diferenciais da simulação de um caso de energização de um banco de capacitores de 20,0 μF cada um no lado primário do transformador em 40, 50 e 70 ms para as fases A, B e C respectivamente.

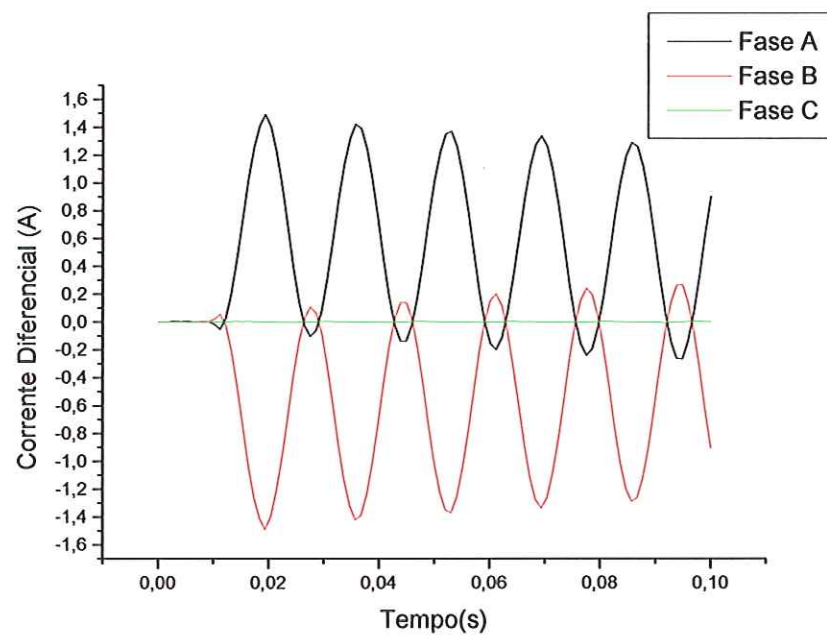


FIGURA 68 - Condição de falta interna entre espiras em 30% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

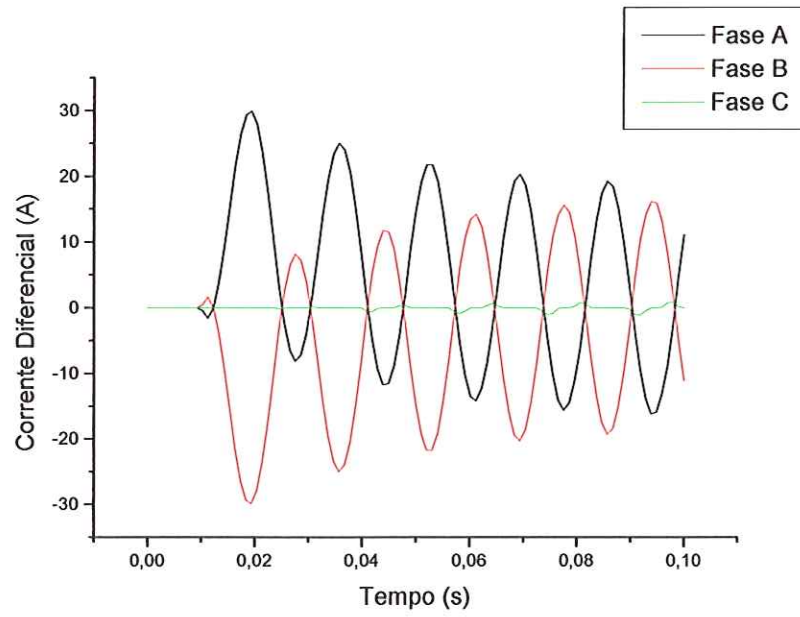


FIGURA 69 - Condição de falta interna entre espiras em 70% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

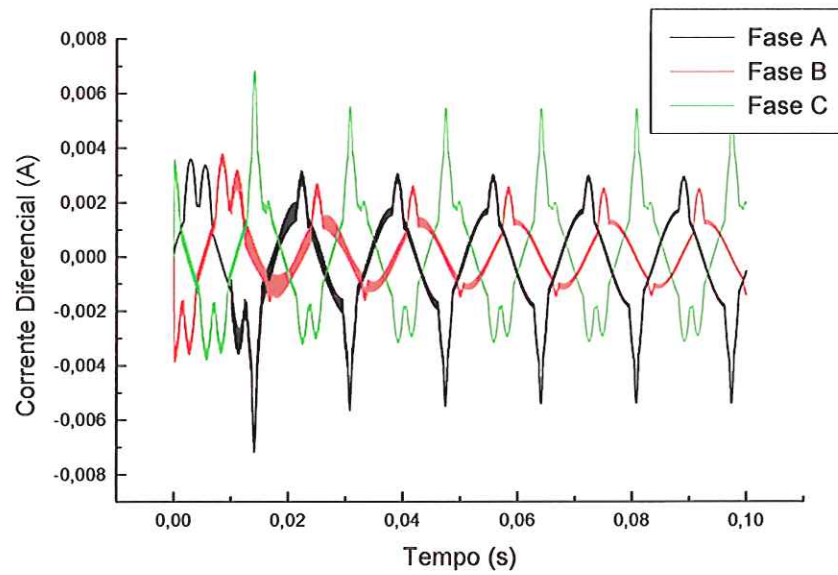


FIGURA 70 - Condição de falta externa monofásica, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

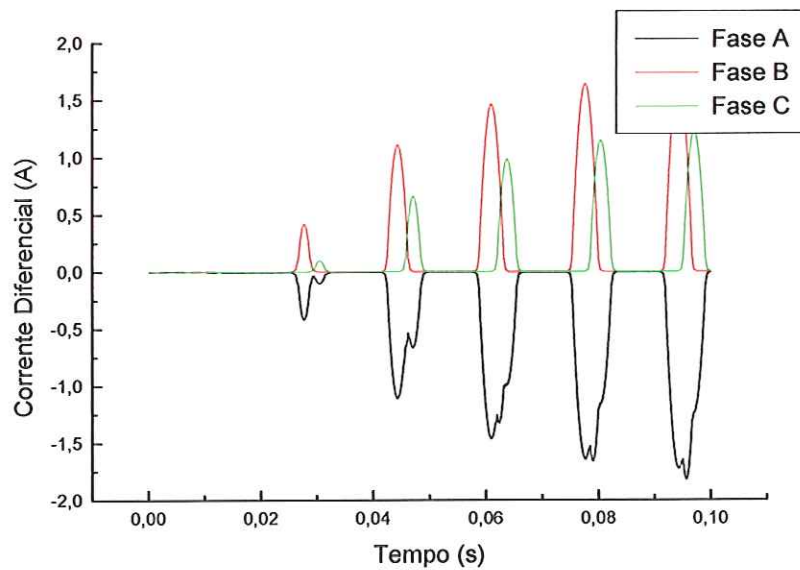


FIGURA 71 - Condição de falha externa trifásica, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms na fase A, 12 ms na fase B e 14 ms na fase C

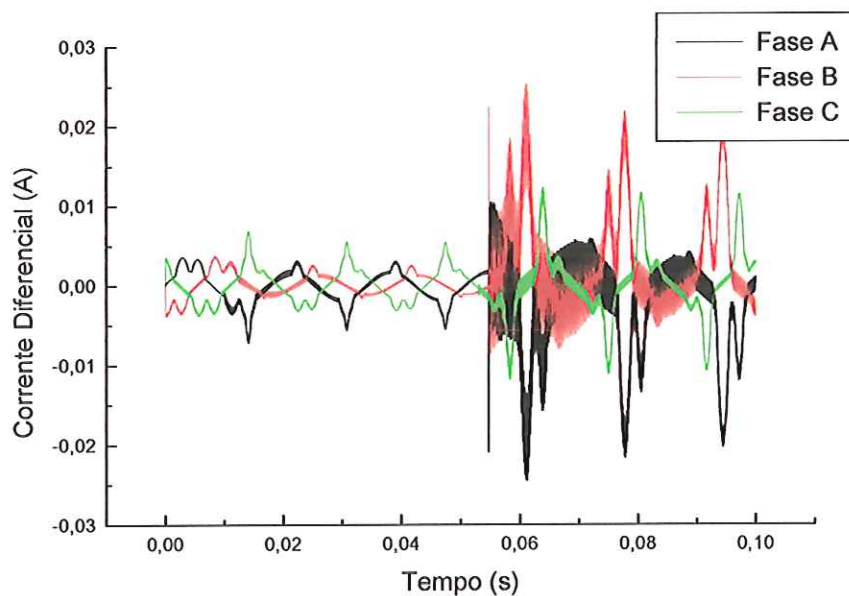


FIGURA 72 - Condição de remoção de falha externa monofásica, tensão=112,7 kV, carga=10 MVA, ocorrida em 10 ms e removida em 50 ms

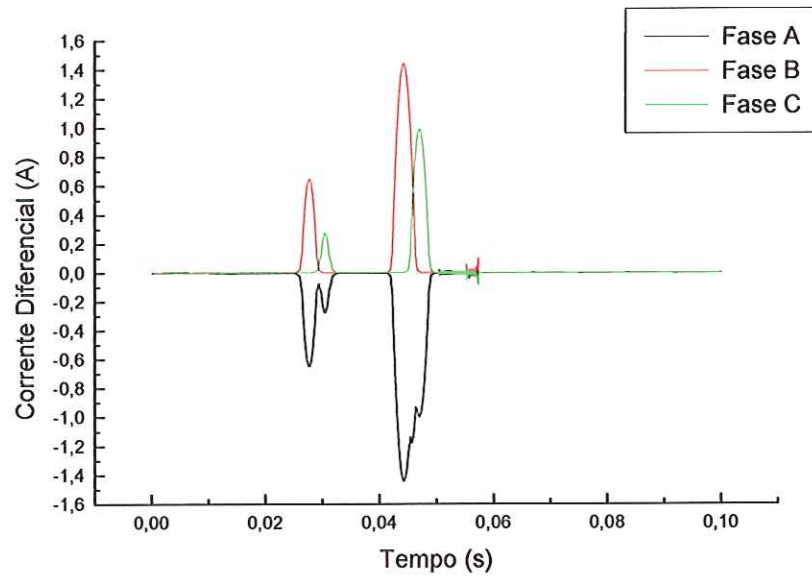


FIGURA 73 - Condição de remoção de falta externa trifásica, tensão=112,7 kV, carga=10 MVA, ocorrida em 10 ms na fase A, 12 ms na fase B e 14 ms na fase C e removida em 50 ms na fase A, 50 ms na fase B e 50 ms na fase C

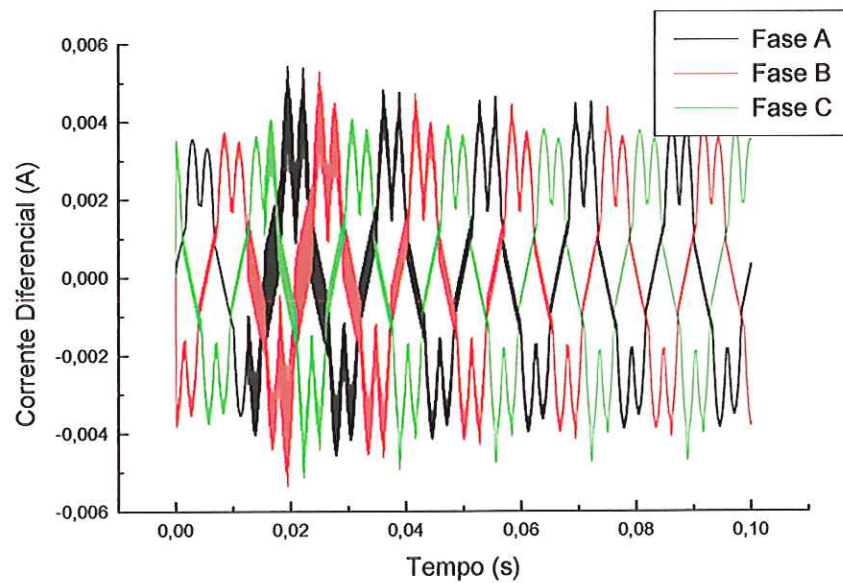


FIGURA 74 - Condição de rejeição de carga, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms na fase A, 12 ms na fase B e 10 ms na fase C

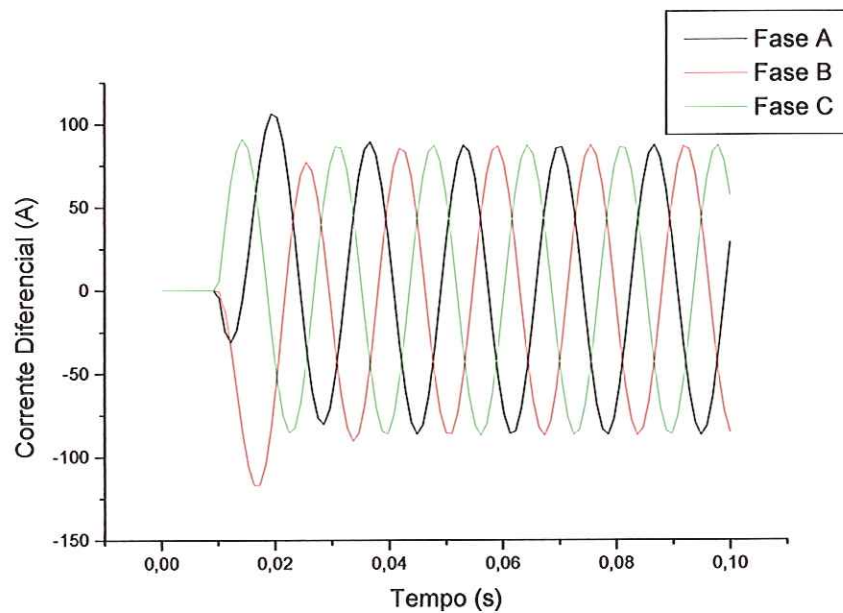


FIGURA 75 - Condição de falta entre transformador e TC secundário, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms nas fases A, B e C

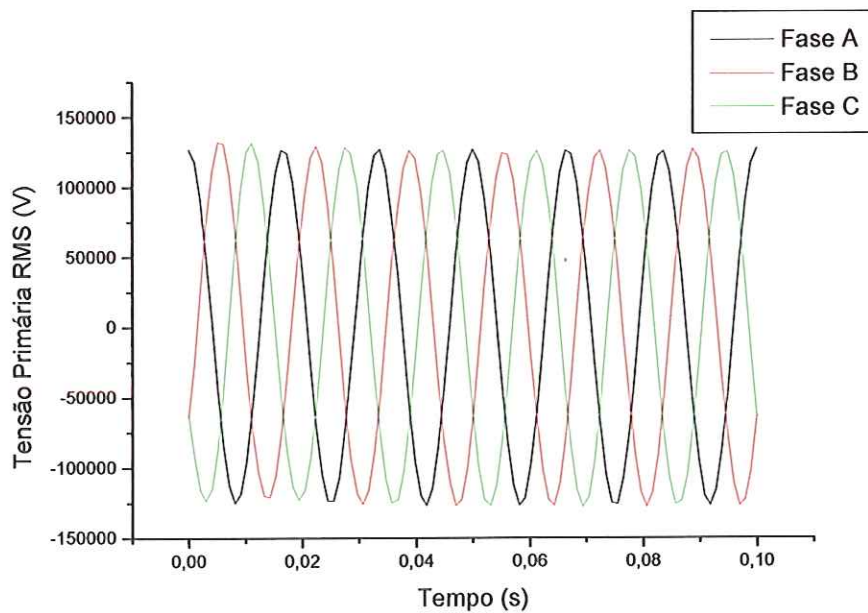


FIGURA 76 – Tensões primárias para sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz

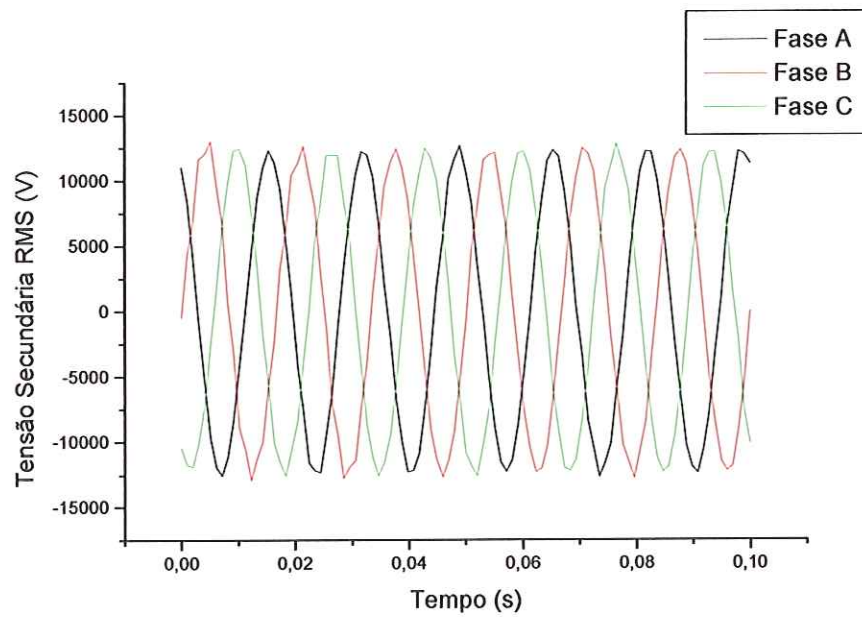


FIGURA 77 – Tensões secundárias para sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz

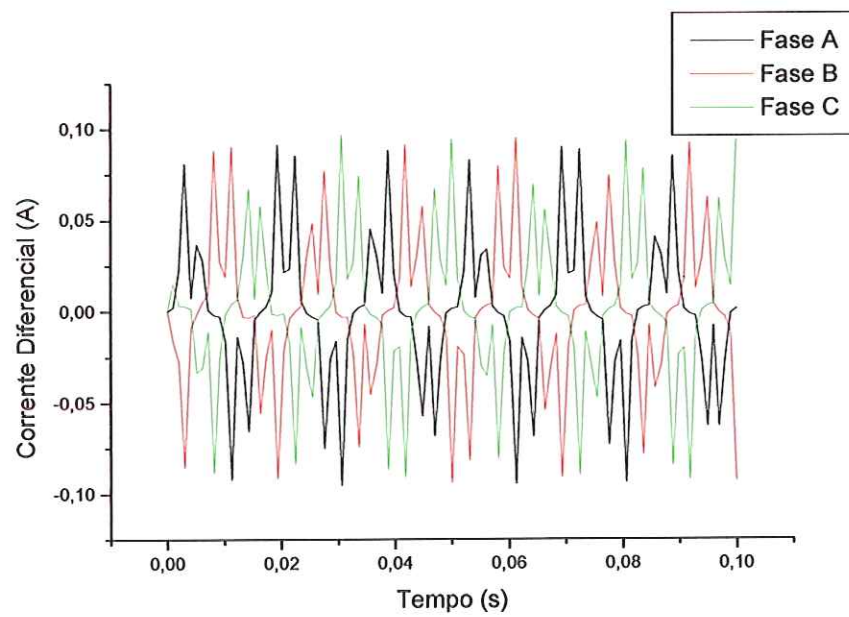


FIGURA 78 – Correntes diferenciais para sobre-excitação em 128 kV, valor eficaz

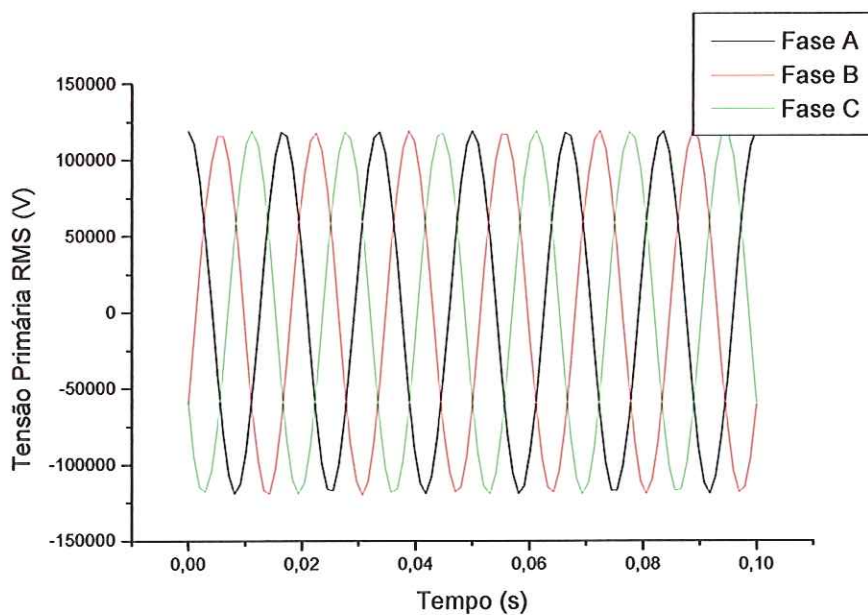


FIGURA 79 – Tensões primárias para sobre-excitação em 120 kV, valor eficaz

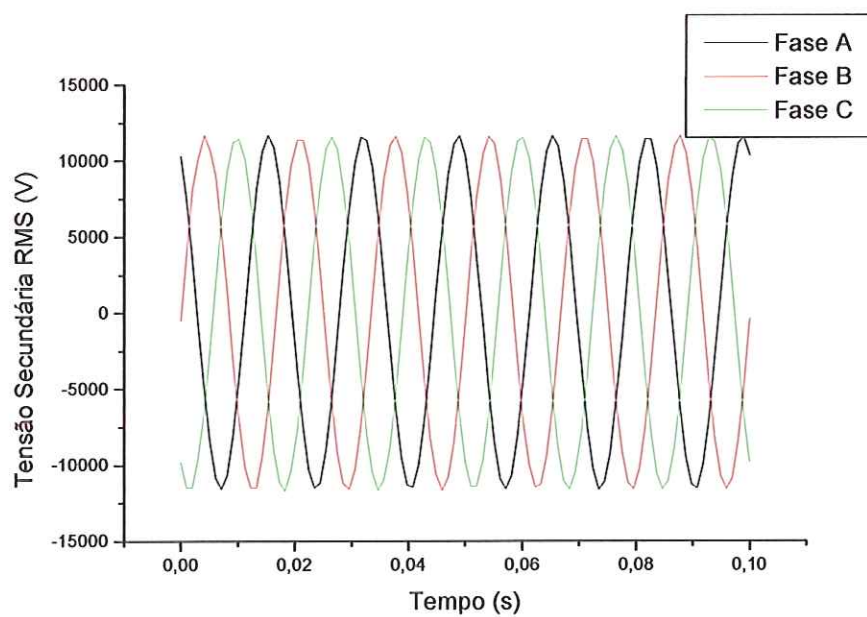


FIGURA 80 – Tensões secundárias para sobre-excitação em 120 kV, valor eficaz

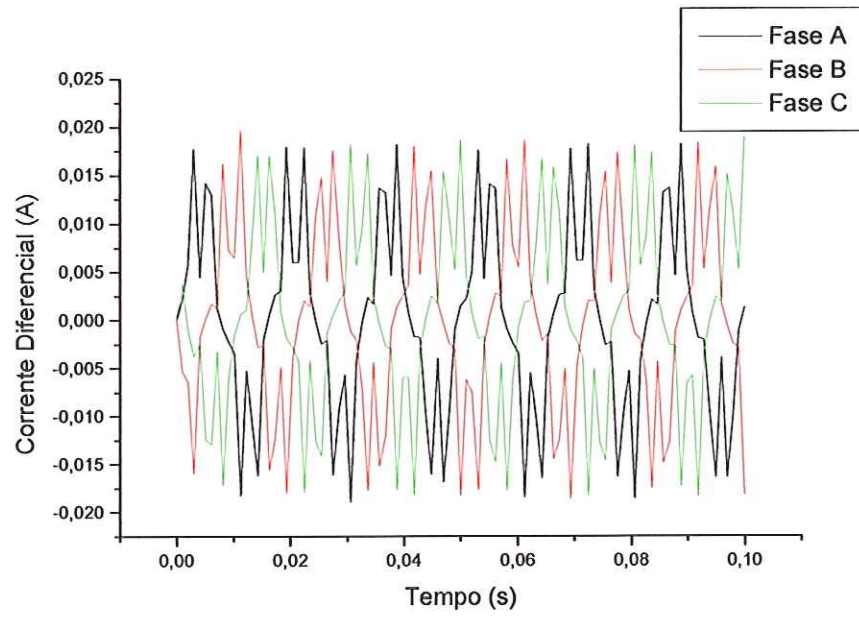


FIGURA 81 – Correntes diferenciais para sobre-excitação em 120 kV, valor eficaz

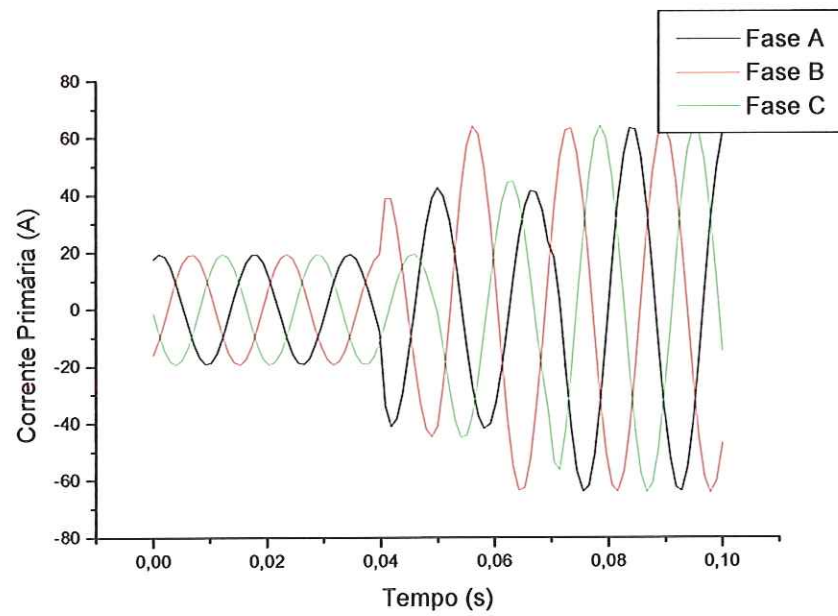


FIGURA 82 – Correntes primárias de energização de capacitor no lado primário

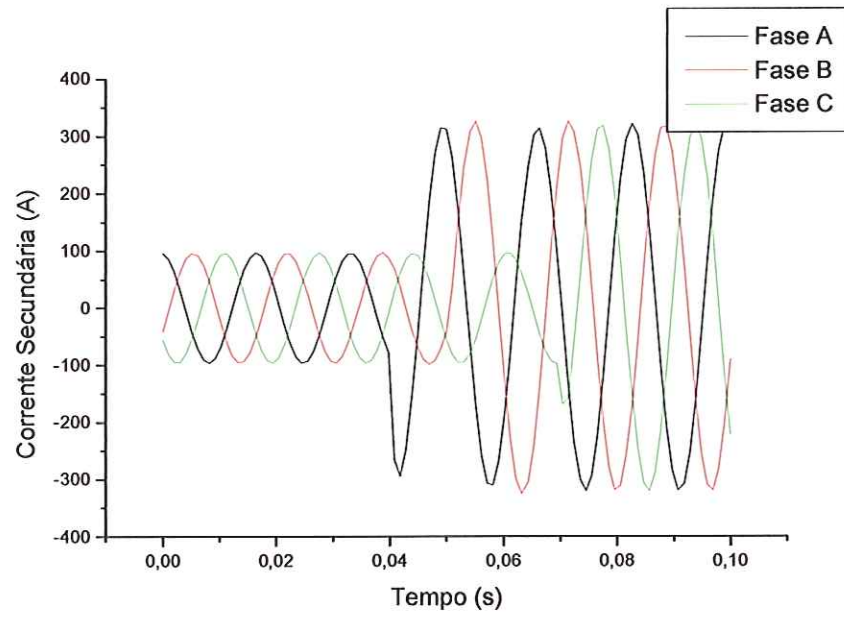


FIGURA 83 – Correntes secundárias de energização de capacitor no lado primário

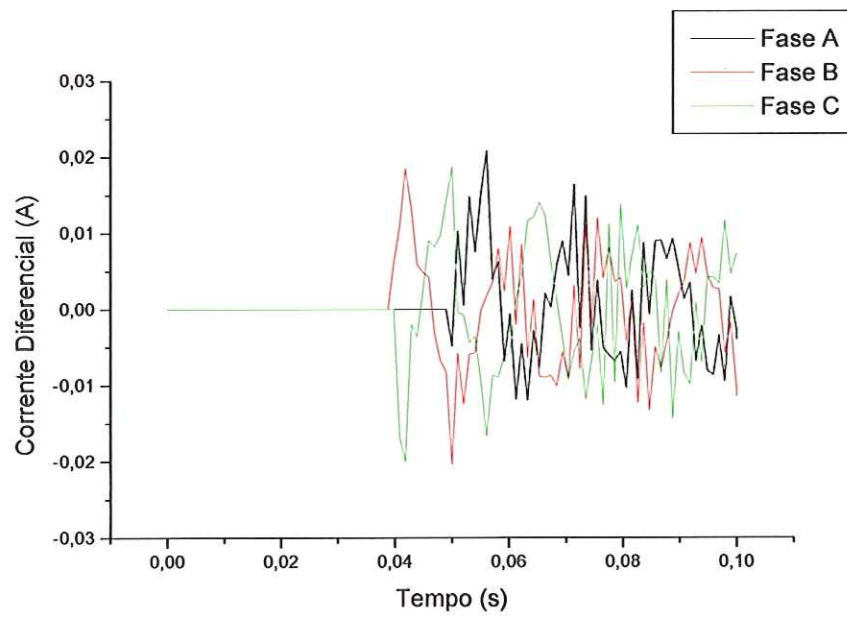


FIGURA 84 – Correntes diferenciais de energização de capacitor no lado primário

APÊNDICE C

A seguir são mostrados os cálculos efetuados para a construção dos arquivos de dados de entrada do programa ATP para o transformador de 6,25 MVA.

- Equivalente de Geração (valores fornecidos pela CPFL):

$$R_0 = 8,0097 \Omega$$

$$R_+ = 5,005 \Omega$$

$$L_0 = 33,362 \text{ mH}$$

$$L_+ = 15,328 \text{ mH}$$

- Linha de Transmissão (valores fornecidos pela CPFL):

$$R_0 = 0,7186 \Omega$$

$$R_+ = 0,3101 \Omega$$

$$L_0 = 11,45 \text{ mH}$$

$$L_+ = 2,41 \text{ mH}$$

- Carga:

$$S = 5 \text{ MVA (considerando 80\% da potência do transformador)}$$

$$V = 13,8 \text{ kV}$$

$$fp = 0,92 \text{ indutivo}$$

$$Z = V^2 / S = 114,264 \Omega$$

$$R = Z \cos\theta = 114,264 \times 0,92 = 105,123 \Omega$$

$$X = Z \sin\theta = 114,264 \times \sin(23,07) = 44,775 \Omega$$

$$L = X / \omega = 44,775 / 376,99 = 0,11877\text{H} = 118,77 \text{ mH}$$

- Valores de Corrente e Fluxo para a Curva de Saturação do Transformador:

Potência Base:

$$S_{\text{BASE}} = S_{\text{TRAFO}} / 3 = 6,25/3 = 2,0833 \text{ MVA}$$

Tensão Base:

$$V_{\text{BASE}} = 13,8 / \sqrt{3} = 7,968 \text{ kV}$$

Corrente Base:

$$I_{BASE} = S_{BASE} / V_{BASE} = 0,26146 \text{ kA}$$

A TABELA 40 seguinte traz os valores de Tensão e Corrente para a Rotina SATURATION:

TABELA 40 - Valores de tensão e corrente para a rotina SATURATION

| Tensão (pu) | Corrente (pu) |
|-------------|---------------|
| 0,9 | 0,0027 |
| 1,0 | 0,0053 |
| 1,1 | 0,0124 |

Os seguintes valores mostrados na TABELA 41 foram obtidos após a execução da rotina SATURATION do programa ATP com a finalidade de obtenção da curva de saturação do transformador.

TABELA 41 - Valores de corrente e fluxo obtidos através da rotina SATURATION

| Corrente (A) | Fluxo (V.s) |
|--------------|---------------|
| 0,9984332489 | 26,8995372292 |
| 2,9761154899 | 29,8883746991 |
| 7,2749000526 | 32,8772121690 |

Após esse procedimento foi necessário calcular o ponto empírico de “Quebra de Joelho” da curva de saturação, como descrito a seguir.

A corrente de magnetização I_o do transformador é definida pela relação entre uma tensão de 1,3 pu e uma impedância de saturação de 0,2 pu (CPFL):

Cálculo de I_o :

$$S_{BASE} = 6,25 \text{ MVA}$$

$$Z_{BASE} = 30,4704 \Omega$$

$$V_{BASE} = 13,8 \text{ kV}$$

$$I_{BASE} = 261,4811 \text{ A}$$

$$V_j = 1,3 \times 13,8 = 17,94 \text{ kV}$$

$$X_s = 0,2 \text{ pu}$$

$$I_o = V_j / (Z_{BASE} \times X_s) = 2943,84 \text{ A}$$

$$I_o(\text{pu}) = I_o / I_{\text{BASE}} = 2943,84/261,4811 = 11,2583 \text{ pu}$$

Portanto, a TABELA 42 mostrada a seguir, informa os valores de tensão e corrente em pu, já com o ponto extra de “quebra de joelho” da curva inserido.

TABELA 42 - Ponto de “quebra de joelho” da curva de saturação

| Tensão (pu) | Corrente (A) | Corrente (pu) |
|-------------|----------------|----------------|
| 0,9 | 0,9984 | 0,00270 |
| 1,0 | 2,9762 | 0,00530 |
| 1,1 | 7,2749 | 0,01240 |
| 1,3 | 2943,84 | 11,2583 |

Os valores finais de corrente e fluxo calculados pela rotina SATURATION são ilustrados na TABELA 43 que segue.

TABELA 43 - Valores finais de corrente e fluxo da curva de saturação

| Corrente (A) | Fluxo (V.s) |
|---------------------|----------------------|
| 0,9984332489 | 26,8995372292 |
| 2,9761154899 | 29,8883746991 |
| 7,2749000526 | 32,8772121690 |
| 6762,5989573 | 38,8548871089 |

- Transformador:

$$Z_{\text{BASE PRIM}} = V_{\text{BASE}}^2 / S_{\text{BASE}} = 69000^2 / 6,25 \cdot 10^6 = 761,76 \Omega$$

$$Z_{\text{BASE SEC}} = V_{\text{BASE}}^2 / S_{\text{BASE}} = 13800^2 / 6,25 \cdot 10^6 = 30,4704 \Omega$$

As reatâncias dos lados primário e secundário em pu possuem o valor de 0,0746 e a relação X/R = 11,303 conforme os dados fornecidos pela CPFL.

Portanto:

$$X_{\text{PRIM}} = 761,76 \times 0,0746 = 56,8273 \Omega$$

$$X_{\text{SEC}} = 30,4704 \times 0,0746 = 2,2731 \Omega$$

- Transformadores de Corrente (TCs):

A TABELA 44 seguinte ilustra os parâmetros dos TCs do lado de alta tensão, também fornecidos pela Companhia Paulista de Força e Luz.

Relação de transformação: 600/5

$$S_{BASE} = 6,25 \cdot 10^6 / 3 = 2,0833 \text{ MVA}$$

$$V_{BASE} = (69 \cdot 10^3 / \sqrt{3}) \times (5/600) = 332 \text{ V}$$

$$I_{BASE} = S_{BASE} / V_{BASE} = 2,0833 \cdot 10^6 / 332 = 6,275 \text{ kA}$$

TABELA 44 - Valores de corrente e tensão dos TCs do lado de baixa tensão

| Corrente (A) | Tensão (V) |
|--------------|------------|
| 0,05 | 50 |
| 0,10 | 140 |
| 0,20 | 240 |
| 0,40 | 290 |
| 0,60 | 320 |
| 0,80 | 350 |
| 1,00 | 370 |
| 2,00 | 470 |
| 4,00 | 490 |
| 6,00 | 500 |
| 8,00 | 510 |
| 10,00 | 515 |

Os valores de tensão e corrente em pu são calculados e mostrados na próxima TABELA 45.

TABELA 45 - Valores de tensão e corrente em pu para os TCs

| Corrente (A) | Corrente (pu) | Tensão (V) | Tensão (pu) |
|--------------|---------------|------------|-------------|
| 0,05 | 7,968E-06 | 50 | 0,15 |
| 0,10 | 1,594E-05 | 140 | 0,42 |
| 0,20 | 3,187E-05 | 240 | 0,72 |
| 0,40 | 6,375E-05 | 290 | 0,87 |
| 0,60 | 9,562E-05 | 320 | 0,96 |
| 0,80 | 1,275E-04 | 350 | 1,05 |
| 1,00 | 1,594E-04 | 370 | 1,12 |
| 2,00 | 3,187E-04 | 470 | 1,42 |
| 4,00 | 6,375E-04 | 490 | 1,48 |
| 6,00 | 9,562E-04 | 500 | 1,51 |
| 8,00 | 1,275E-03 | 510 | 1,54 |
| 10,0 | 1,594E-03 | 515 | 1,55 |

De posse desses dados, calculou-se os pontos da curva de saturação dos TCs através da rotina SATURATION do ATP. Os valores resultantes são mostrados na TABELA 46.

TABELA 46 - Curva de saturação dos TCs obtida pela rotina SATURATION

| Corrente (A) | Fluxo (V.s) |
|---------------|--------------|
| 0,0707106668 | 0,1868156356 |
| 0,1316948380 | 0,5230837797 |
| 0,3000462497 | 0,8967150509 |
| 0,7483403495 | 1,0835306865 |
| 1,1457987425 | 1,1956200679 |
| 1,4399061889 | 1,3077094492 |
| 1,8526412826 | 1,3948900792 |
| 3,4642140622 | 1,7685213504 |
| 10,8141533989 | 1,8432476046 |
| 16,7651465864 | 1,8806107317 |
| 20,6368538843 | 1,9179738589 |
| 32,0532429422 | 1,9304282346 |

A TABELA 46 mostrada pode ser representada pela curva de saturação ilustrada na FIGURA 85 seguinte.

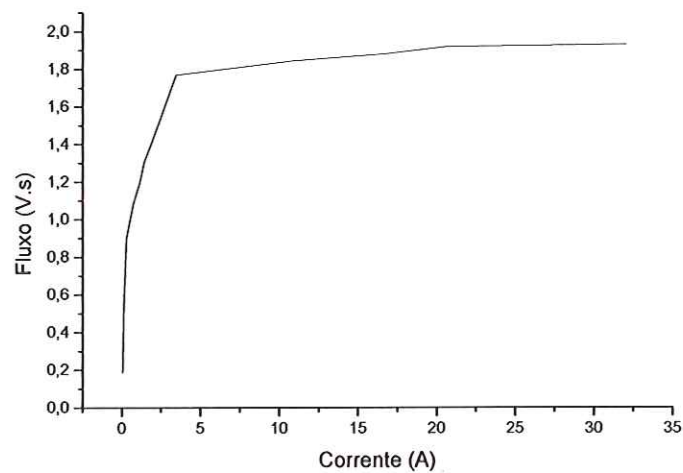


FIGURA 85 - Curva de saturação dos TCs

APÊNDICE D

Os resultados obtidos com a simulação do sistema de potência no programa ATP referentes ao transformador de 6,5 MVA modelado, são ilustrados a seguir.

A FIGURA 86 ilustra um caso de energização do transformador no qual se percebe o efeito da saturação dos TCs nas formas de onda das correntes diferenciais simuladas.

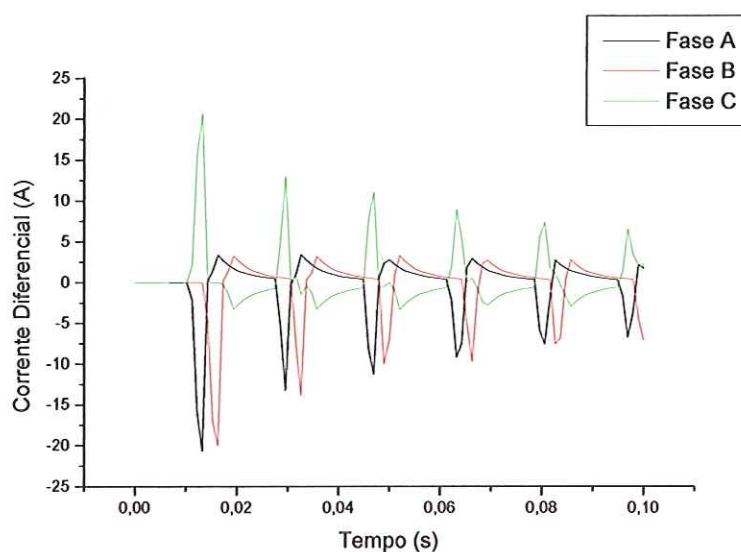


FIGURA 86 - Caso de energização do transformador de 6,25 MVA

A FIGURA 87 representa as correntes diferenciais de uma simulação de energização do transformador em 5, 7 e 9 ms para as fases A, B e C, respectivamente, na presença de uma falta interna em 10% das espiras da fase A.

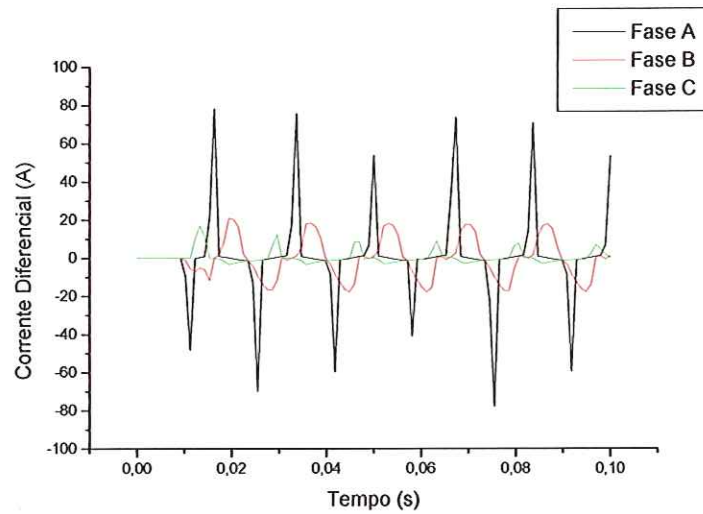


FIGURA 87 – Correntes diferenciais de energização do transformador com presença de falha interna em 10% do enrolamento da fase A

A FIGURA 88 representa as correntes diferenciais de uma simulação de energização do transformador em 5, 7 e 9 ms para as fases A, B e C, respectivamente, na presença de uma falha interna em 90% das espiras da fase A.

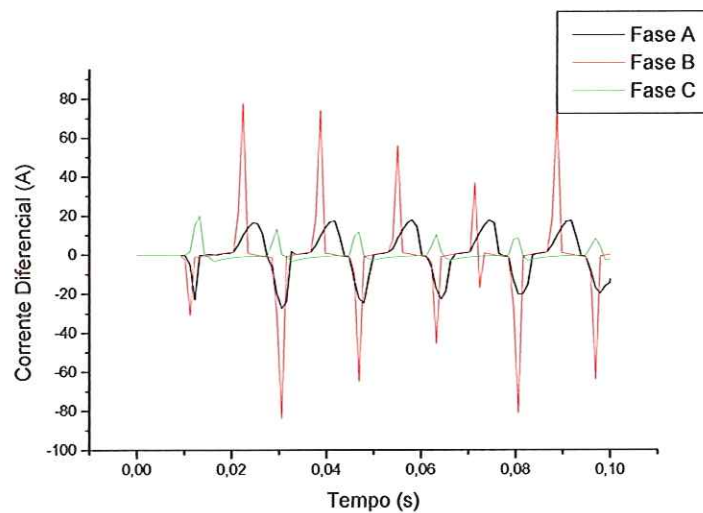


FIGURA 88 – Correntes diferenciais de energização do transformador com presença de falha interna em 90% do enrolamento da fase A

É ilustrada, na FIGURA 89, a situação de uma falta interna entre espiras em 10% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10 ms, onde se observam as correntes diferenciais do sistema.

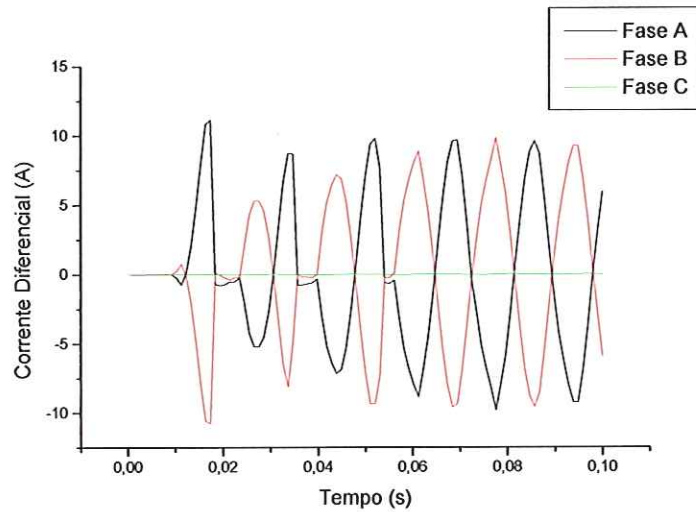


FIGURA 89 – Correntes diferenciais de falta interna entre espiras em 10% do enrolamento da fase A

Na FIGURA 90 são ilustradas as correntes diferenciais de uma situação de falta interna entre espiras em 70% do enrolamento da fase A, ocorrida em 10 ms.

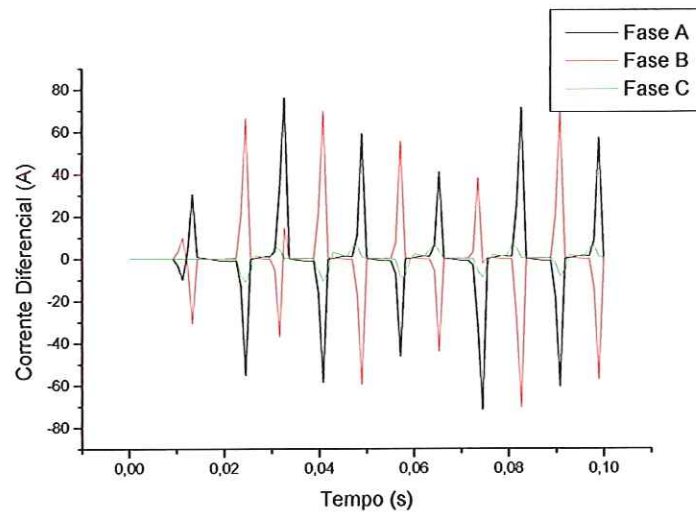


FIGURA 90 – Correntes diferenciais de falta interna entre espiras em 70% do enrolamento da fase A

A situação descrita pela FIGURA 91 ilustra as correntes diferenciais de um caso de falta monofásica ocorrida em 10 ms na fase A entre o transformador e o TC secundário.

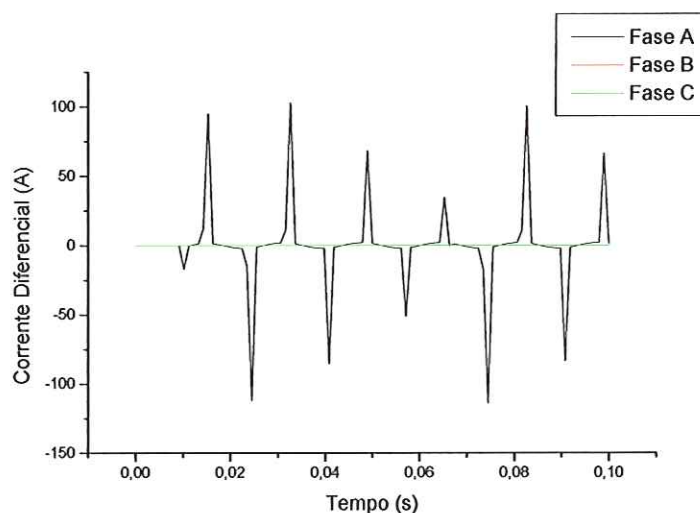


FIGURA 91 – Correntes diferenciais de falta monofásica entre o transformador e o TC secundário

A FIGURA 92 mostra as correntes diferenciais de um caso de falta trifásica ocorrida em 10 ms entre o transformador e o TC secundário. Nota-se a presença da saturação dos dispositivos TCs através dos elevados valores de corrente alcançados.

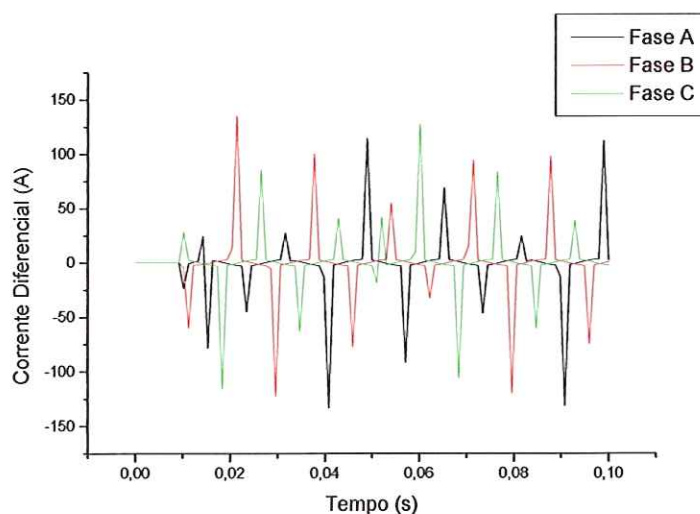


FIGURA 92 – Correntes diferenciais de falta trifásica entre o transformador e o TC secundário

As formas de onda ilustradas na FIGURA 93 representam as correntes diferenciais de um caso de falta externa monofásica ocorrida em 12 ms na fase A.

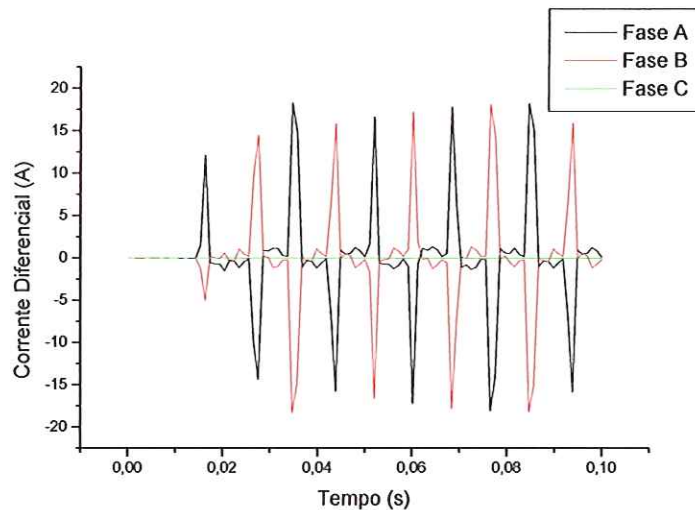


FIGURA 93 – Correntes diferenciais de falta externa monofásica

A FIGURA 94 representa as correntes diferenciais de um caso de falta externa trifásica ocorrida em 12, 13 e 14 ms para as fases A, B e C, respectivamente. Nota-se a elevada amplitude das correntes devido à saturação dos TCs.

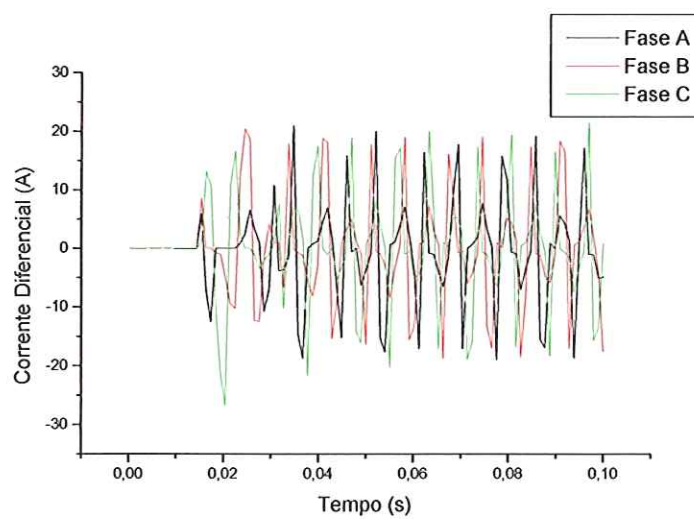


FIGURA 94 – Correntes diferenciais de falta externa trifásica

A FIGURA 95 mostra as correntes diferenciais de um caso de falta interna ao transformador, envolvendo 10% do enrolamento da fase A para a terra, ocorrida em 10 ms.

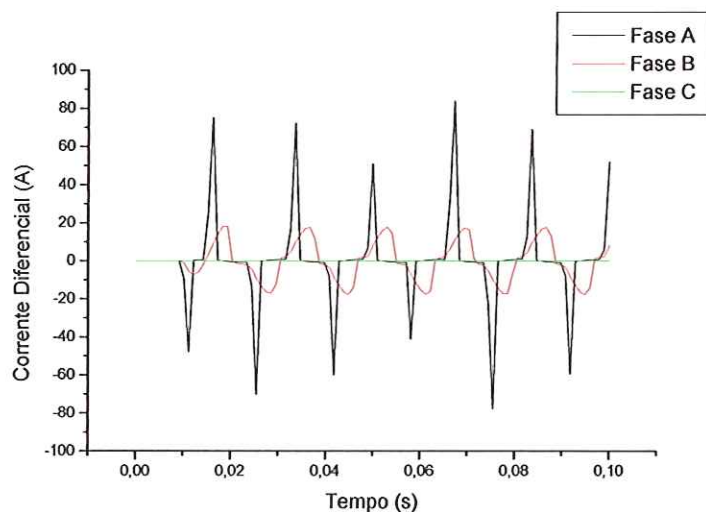


FIGURA 95 – Correntes diferenciais de falta interna em 10% da fase A para a terra

A FIGURA 96 ilustra as correntes diferenciais de um caso de falta interna ao transformador, envolvendo 50% do enrolamento da fase A para a terra, ocorrida em 10 ms.

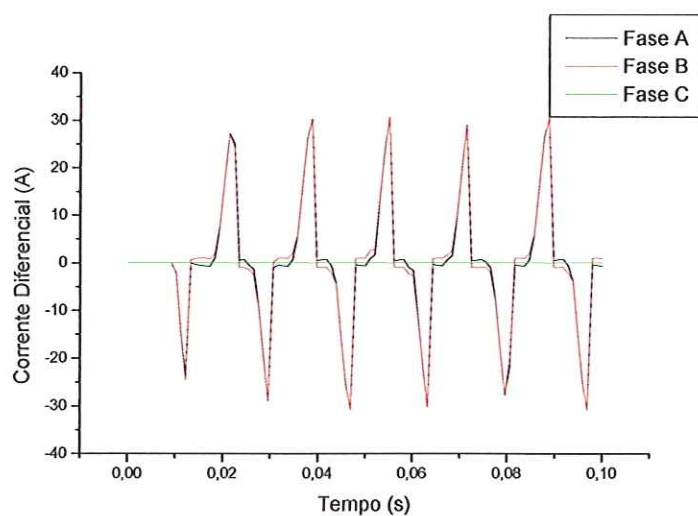


FIGURA 96 – Correntes diferenciais de falta interna em 50% da fase A para a terra

A situação mostrada pela FIGURA 97 representa as correntes diferenciais de um caso de falta interna ao transformador, envolvendo 90% do enrolamento da fase A para a terra, ocorrida em 10 ms.

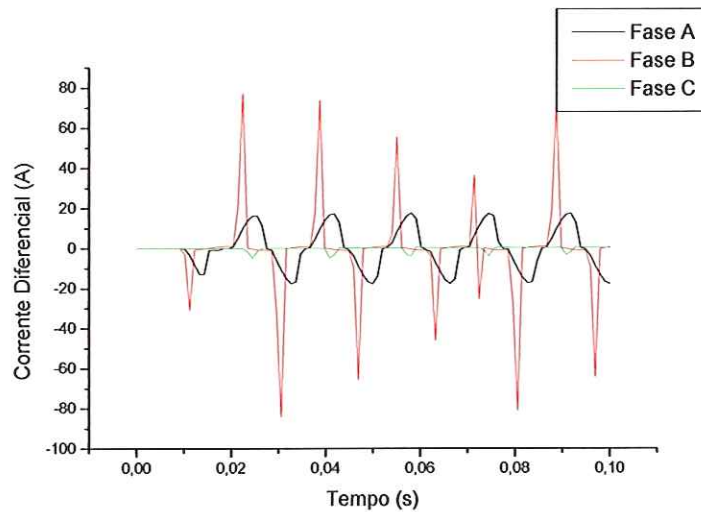


FIGURA 97 – Correntes diferenciais de falta interna em 90% da fase A para a terra

A FIGURA 98, a FIGURA 99 e a FIGURA 100 mostradas a seguir ilustram as correntes primária, secundária e diferencial para o caso de rejeição de uma carga de 5 MVA, em 10, 12 e 11 ms para as fases A, B e C, respectivamente.

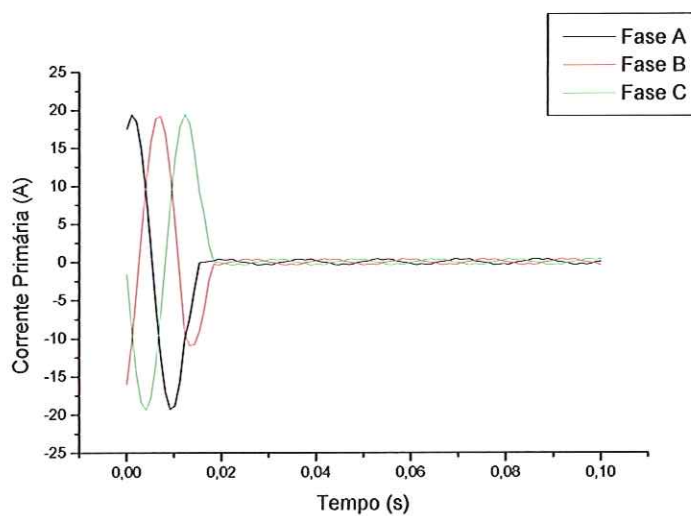


FIGURA 98 – Correntes primárias para caso de rejeição de carga

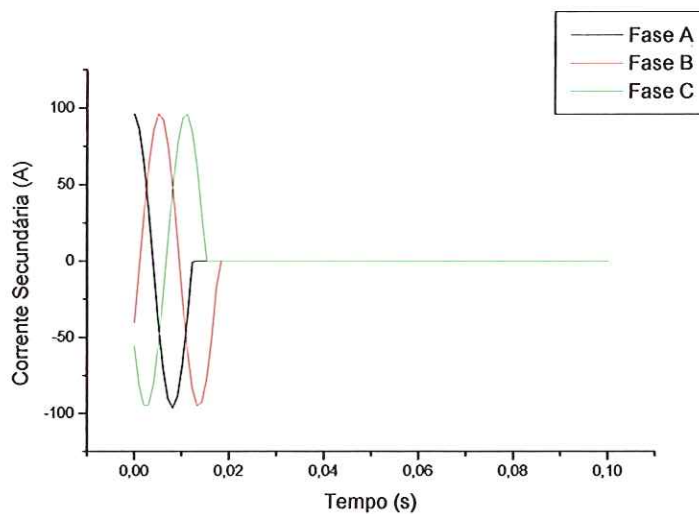


FIGURA 99 – Correntes secundárias para caso de rejeição de carga

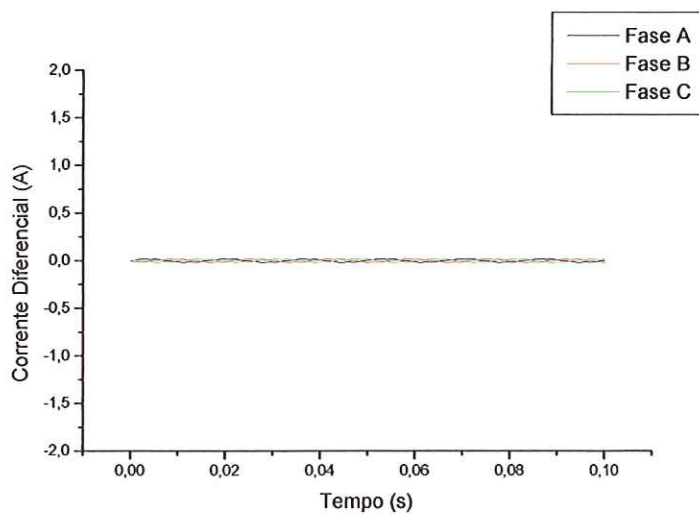


FIGURA 100 – Correntes diferenciais para caso de rejeição de carga

A FIGURA 101 representa as correntes diferenciais para um caso de remoção de falta externa monofásica ocorrida em 10 ms na fase A e removida em 50 ms.

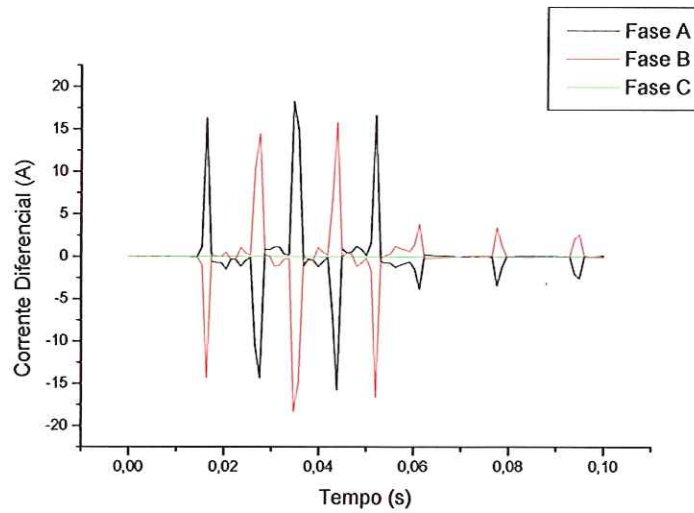


FIGURA 101 – Correntes diferenciais para caso de remoção de falta externa monofásica

Na FIGURA 102 são representadas as correntes diferenciais para um caso de remoção de falta externa trifásica ocorrida em 10 ms para as fases A, B e C e removida em 50 ms.

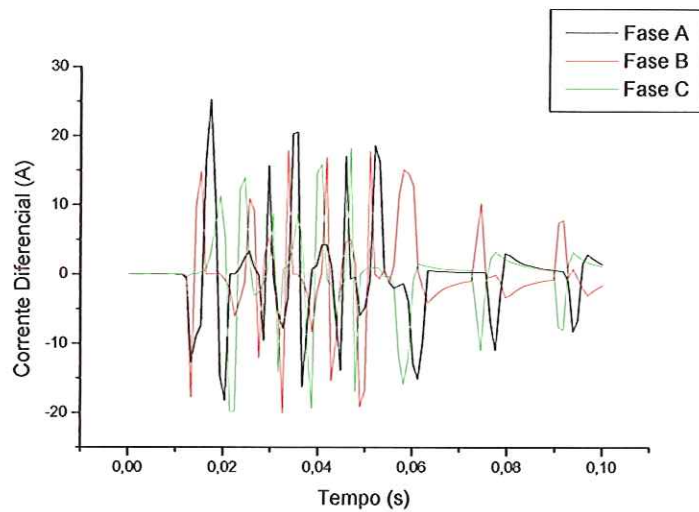


FIGURA 102 – Correntes diferenciais para caso de remoção de falta externa trifásica

APÊNDICE E

A seguir é apresentada a metodologia utilizada no cálculo do Desvio-Padrão aplicado aos conjuntos de dados testados no trabalho.

O cálculo do Desvio-Padrão de um conjunto de dados foi realizado utilizando-se a seguinte expressão:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 f}{N}} \quad (24)$$

Onde:

X_i = Valores do conjunto de dados

\bar{X} = Valor médio ou de referência

f = Freqüência de cada valor

N = Número total de dados

Quanto menor for o valor do Desvio-Padrão S , mais próximo da média ou do valor estipulado os dados se encontram.