Campus de São Carlos

**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS À PROTEÇÃO
DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Autor: Ênio Carlos Segatto

Orientador: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS À PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

ÊNIO CARLOS SEGATTO

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury

São Carlos

1999

Class.	TESE-EESC
Cott.	5232
Tamto	0146/99

S/S 1048606

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S454r Segatto, Ênio Carlos
Redes neurais artificiais aplicadas à proteção
diferencial de transformadores de potência / Ênio
Carlos Segatto. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Denis Vinicius Coury.

1. Proteção de transformadores de potência.
2. Detecção de Inrush. 3. Redes neurais artificiais.
- I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ÊNIO CARLOS SEGATTO**

Dissertação defendida e aprovada em 04-08-1999
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **DENIS VINICIUS COURY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Doutora **MARIA CRISTINA DIAS TAVARES**
(Pesquisadora – FAPESP)

Prof. Doutor **ELCIO SATO**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Prof. Doutora **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora da Área de Engenharia Elétrica

Prof. Assoc. **RENATO VAIRO BELHOT**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC
em exercício

Aos meus pais, Ennio e Zuleika, minha
avó Albertina, minha irmã Ana Zuleika,
meu tio João e minha noiva Ana Cláudia,
pelo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Professor André, pelas valiosas contribuições, apoio, e pela simplicidade e atenção concedida.

Aos amigos e colegas da pós-graduação: Donato, Paulo, Mário, Renan, Patrícia, Marquinhos, Cristina, Renata, Arturo, Andrei, Régis, Pedro, Brito, Hamilton e Márcia, dentre outros, pela amizade e auxílio valiosos.

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

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

Ao amigo André Gheralde, pelo estímulo e apoio.

À minha noiva Ana Cláudia, pelo seu amor, dedicação e presença.

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

À minha avó Albertina, por seu amor e pelas sempre valiosas orações.

Aos meus pais, Ennio e Zuleika, pelo amor, paciência, incentivo, apoio e esforço, sempre.

À Deus, pela minha vida e família.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	III
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
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 CAUSAS DO SURGIMENTO DE CORRENTES DIFERENCIAIS INDESEJADAS	7
1.5 CORRENTES DE MAGNETIZAÇÃO	10
2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	15
3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	24
3.1 HISTÓRICO	25
3.2 FUNCIONAMENTO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL	26
3.3 REDE NEURAL ARTIFICIAL MULTICAMADAS E O MÉTODO DE TREINAMENTO <i>BACKPROPAGATION</i>	29
4 ALGORITMOS APLICADOS À PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES.....	31
4.1 A EVOLUÇÃO DOS RELÉS.....	32
4.2 ARQUITETURA DO RELÉ	34
4.3 ALGORITMO CONVENCIONAL DO RELÉ DIFERENCIAL DIGITAL.....	36
4.4 ALGORITMO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL PROPOSTA COM O AUXÍLIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	39
5 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	42
5.1 HISTÓRICO DO PROGRAMA ATP	43
5.2 SISTEMA ELÉTRICO ESTUDADO.....	44
5.3 O MODELO DO TRANSFORMADOR	45
5.4 CÁLCULOS PARA A CONSTRUÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS DO ATP	47
5.5 FORMATO DOS ARQUIVOS DE DADOS	53

6 A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM APLICAÇÃO DE RNAs.....	65
6.1 INTRODUÇÃO	66
6.2 DISCRIMINAÇÃO ENTRE FALTA INTERNA E CORRENTE DE <i>INRUSH</i> , UTILIZANDO RECONHECIMENTO DE PADRÕES	66
6.2.1 O SOFTWARE SNNS – <i>STUTTGARD NEURAL NETWORK SIMULATOR</i>	66
6.2.2 A FORMAÇÃO DOS CONJUNTOS DE PADRÕES.....	68
6.2.3 ARQUITETURA 12+3+1.....	70
6.2.4 ARQUITETURA 12+4+1	73
6.2.5 ARQUITETURA 12+5+1.....	75
6.2.6 ARQUITETURA 12+2+1.....	77
6.2.7 RESPOSTAS OBTIDAS PELA RNA	79
6.3 ESQUEMA COMPLETO DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES	89
7 CONCLUSÕES	101
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Proteção diferencial percentual do transformador	4
FIGURA 02 - Diagrama de conexões do transformador e TCs	6
FIGURA 03 - Característica de atuação da proteção diferencial	7
FIGURA 04 - Comparação entre as amplitudes das correntes de <i>inrush</i> e nominal ..	12
FIGURA 05 - Representação de um neurônio humano	25
FIGURA 06 - Modelo de neurônio binário	26
FIGURA 07 - Modelo atual da célula de uma rede neural artificial	27
FIGURA 08 - Funções de transferência do neurônio	27
FIGURA 09 - Rede neural completa com três camadas	29
FIGURA 10 - Fluxograma funcional do relé	34
FIGURA 11 - Lógica de processamento do relé digital convencional.....	37
FIGURA 12 - Algoritmo da proteção diferencial com a inclusão da RNA	40
FIGURA 13 - Sistema elétrico utilizado no ATP	45
FIGURA 14 - Modelo de transformador utilizado no ATP	46
FIGURA 15 - Detalhe das conexões dos enrolamentos	46
FIGURA 16 - Divisão do enrolamento do transformador em 10, 50 e 90%.....	52
FIGURA 17 - Arquivo de dados do ATP para a situação de energização	55
FIGURA 18 - Arquivo de dados do ATP para a situação de falta interna em 50% do enrolamento	57
FIGURA 19 - Condição de energização com tensão=110,0 kV e fechamento em 6 ms na fase A, 6 ms na fase B e 6 ms na fase C	58
FIGURA 20 - Condição de energização com tensão=110,0 kV e fechamento em 11 ms na fase A, 7 ms na fase B e 6 ms na fase C.....	58
FIGURA 21 - Condição de falta interna em 10% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms	59
FIGURA 22 - Condição de falta interna em 50% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms	59
FIGURA 23 - Condição de falta interna em 70% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms	60
FIGURA 24 - Condição de falta externa monofásica, tensão=112,7 kV e carga=10MVA em 10 ms	60
FIGURA 25 - 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.....	61
FIGURA 26 - Condição de remoção de falta externa monofásica, tensão=112,7 kV, carga=10 MVA, ocorrida em 10 ms e removida em 50 ms.....	61
FIGURA 27 - 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.....	62
FIGURA 28 - 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.....	62
FIGURA 29 - Representação das entradas e saídas utilizadas nas redes neurais para a finalidade proposta.....	69

FIGURA 30 – Topologia 12+3+1 utilizada	71
FIGURA 31 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+3+1	72
FIGURA 32 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+3+1	72
FIGURA 33 – Topologia 12+4+1 utilizada	73
FIGURA 34 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+4+1	74
FIGURA 35 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+4+1	74
FIGURA 36 – Topologia 12+5+1 utilizada	75
FIGURA 37 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+5+1	76
FIGURA 38 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+5+1	76
FIGURA 39 – Topologia 12+2+1 utilizada	77
FIGURA 40 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+2+1	78
FIGURA 41 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+2+1	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Conteúdo harmônico das correntes de energização	13
TABELA 02 - Dados de tensão e corrente para a rotina SATURATION	49
TABELA 03 - Divisão do enrolamento primário em 10, 50 e 90% na aplicação de faltas internas	52
TABELA 04 - Combinação de dados para os casos de energização.....	63
TABELA 05 - Combinação de dados para os casos de falta interna	64
TABELA 06 - Respostas da RNA para energização do transformador	80
TABELA 07 - Respostas da RNA para energização do transformador	81
TABELA 08 - Respostas de RNA para energização do transformador	82
TABELA 09 - Respostas da RNA para energização do transformador	83
TABELA 10 - Respostas da RNA para faltas internas em 10% do enrolamento do transformador.....	84
TABELA 11 - Respostas da RNA para faltas internas em 30% do enrolamento do transformador.....	85
TABELA 12 - Respostas da RNA para faltas internas em 50% do enrolamento do transformador.....	86
TABELA 13 - Respostas da RNA para faltas internas em 70% do enrolamento do transformador.....	87
TABELA 14 - Resposta da RNA para faltas internas em 90% do enrolamento do transformador.....	88
TABELA 15 - Funcionamento do relé para faltas internas em 10% do enrolamento do transformador (carga de 8 MVA)	91
TABELA 16 - Funcionamento do relé para faltas internas em 10% do enrolamento do transformador (carga de 12 MVA)	91
TABELA 17 - Funcionamento do relé para faltas internas em 50% do enrolamento do transformador (carga de 8 MVA)	92
TABELA 18 - Funcionamento do relé para faltas internas em 50% do enrolamento do transformador (carga de 12 MVA)	92
TABELA 19 - Funcionamento do relé para faltas internas em 90% do enrolamento do transformador (carga de 8 MVA)	93
TABELA 20 - Funcionamento do relé para faltas internas em 90% do enrolamento do transformador (carga de 12 MVA)	93
TABELA 21 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 114,0 kV)	94
TABELA 22 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 115,5 kV)	95
TABELA 23 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 116,5 kV)	96
TABELA 24 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 118,0 kV)	97
TABELA 25 - Funcionamento do relé para falta externa monofásica.....	99
TABELA 26 - Funcionamento do relé para falta externa trifásica	99
TABELA 27 - Funcionamento do relé para remoção de falta externa monofásica .	100
TABELA 28 - Funcionamento do relé para remoção de falta externa trifásica.....	100
TABELA 29 - Funcionamento do relé para rejeição de carga	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	- Analógico/Digital
ATP	- <i>Alternative Transient Program</i>
BPA	- <i>Bonneville Power Administration</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>
RNA	- Rede Neural Artificial
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 sigmoidal 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 $t=0$
ω	- 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
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
$L_{SECUNDARIO}$	- 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. (1999). *Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência*. São Carlos, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta uma aplicação de redes neurais artificiais (RNAs) na proteção diferencial de transformadores de potência, como um método para distinguir formas de onda que podem confundir a operação do relé.

Vários fatores como, por exemplo, as situações de energização do transformador, podem causar uma má operação do dispositivo de proteção. Com o objetivo de melhoramento na proteção diferencial digital de transformadores de potência, desenvolveu-se um sistema completo de proteção, incluindo um dispositivo com base em RNAs, em substituição à filtragem harmônica dos sinais, existentes no algoritmo convencional.

Com a referida adição de RNAs em 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.

ABSTRACT

SEGATTO, E.C. (1999). *Artificial Neural Networks Applied to the Differential Protection of Power Transformers*. São Carlos, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents an application of artificial neural networks (ANNs) in differential protection of transformers as an alternative method to distinguish among wave forms which can cause malfunction to the relay. One of the several factors that can cause malfunction is the inrush current present when the transformer is energized.

In order to improve the differential protection of the power transformers, the authors added a neural network routine to the conventional differential protection algorithm, in substitution to the filtering of the harmonic signals found on the traditional algorithm. By making this option, the authors obtained a more effective and precise solution, compared to the conventional methods.

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 do sistema a ser protegida 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 então filtradas, convertidas para modo digital e sendo dessa forma tratadas até o final do processo.

Este capítulo apresenta uma breve descrição sobre a proteção diferencial digital e o relé diferencial percentual. Aborda ainda o esquema de conexões dos 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, onde o dispositivo de proteção compara as correntes que entram e saem do equipamento ou sistema protegido. Durante a operação normal do transformador, as formas de onda de corrente no primário e secundário do mesmo são então monitoradas. Para a aquisição das correntes do transformador, utiliza-se transformadores de corrente (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, a menos da 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 desbalanceamento destes sinais e a diferença entre as correntes primária e secundária torna-se significativa, acionando o relé e desativando o 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 barramentos.

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, sobreexcitação do mesmo (tensão a níveis muito superiores a nominal) e nos casos de energização, manobra que provoca as correntes de *inrush*, que são transitórias mas de elevadíssima 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 e é importante lembrar que nesse período houve o surgimento de vários esquemas dentro dessa filosofia. Um exemplo disso é o relé diferencial percentual [1]. Neste tipo de relé, foi introduzido o conceito de bobina de retenção. Esta configuração é

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

aplicada para a proteção de transformadores de potências superiores a 2,5 MVA.

Esse mecanismo faz com que o 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, a seguir:

FIGURA 1 - Proteção diferencial percentual do transformador

As bobinas de retenção são as indicadas pelos números 1 e 2 na figura mostrada. Para uma situação sem falta, temos que a corrente I_1 é igual a corrente I_2 para o sistema monofásico citado. O valor da corrente na bobina 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 sobrecarga, onde $I_1 = I_2$, 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 então 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 então 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 são equipamentos fundamentais no esquema de proteção diferencial de transformadores de potência. Há uma forte preocupação no projeto e ajuste 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 uma 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 então os TCs conectados em triângulo-estrela. Isso pode ser ilustrado na FIGURA 2, que segue, 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 aqui colocar mais uma vantagem dos mesmos em relação aos relés eletrônicos convencionais. Estes dispositivos possuem uma compensação interna do 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 pode ser ilustrada na FIGURA 3 a seguir [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 (inclinações) são definidas por fatores como relação de transformação, erros dos TCs e mudanças nos *taps* do transformador.

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

1.4 Causas do 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 desigual dos TCs devido às faltas externas;
- Remoção de faltas próximas ao transformador;
- Sobreexcitação do transformador;
- Rejeição de carga;
- Ajuste incorreto das relações de transformação dos TCs;
- Mudança de *tap* do transformador e erros próprios dos TCs.

A seguir, são comentados alguns tipos de manobras mencionadas e 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 numa situação de falta interna ao transformador.

Corrente de magnetização (inrush)

Este tipo de transitório surge durante a energização do transformador devido à magnetização e à saturação do seu núcleo. Sua magnitude é definida pela inclinação da característica de magnetização na região saturada. Em transformadores de potência elevada, altas correntes de *inrush* podem ser atingidas [4][5].

Durante a energização, o transformador encontra-se em vazio, isto é, seu lado secundário está desconectado do restante do circuito. Assim, a corrente deste lado é nula, enquanto que a corrente primária é elevada devido à energização (*inrush*). Isto faz com que o relé possa ser sensibilizado, causando uma operação incorreta, como será detalhado no próximo item 1.5.

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 [5].

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 *inrush* obtidas durante a energização do transformador [5][6].

Sobreexcitação do transformador

A condição de sobreexcitação 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][7].

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, e assim há um aumento na tolerância do dispositivo de proteção como mencionado.

1.5 Correntes de Magnetização

Como citado anteriormente, a corrente de *inrush* 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 desbalanceamento que a característica diferencial não consegue distinguir de uma falta interna.

O valor do pico da corrente de *inrush* depende fundamentalmente do ponto do ciclo da tensão, onde ocorre a energização, 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 [8] 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 *inrush*, 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:

$$v_1 = V_{1m} \cdot \sin(\omega t + \beta) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

onde:

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

β = ângulo que define este valor de tensão

Integrando-se a equação (2):

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

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 consequentemente 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 *inrush*, 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 - Comparação entre as amplitudes das correntes de *inrush* e nominal

Um dos métodos utilizados para fazer a distinção entre as correntes de *inrush* e de falta está também 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 *inrush*, alcançando valores acima de 16% da componente de frequência fundamental [9][10]. 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 *inrush* [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 [3], fornecida pela INEPAR, mostrando o conteúdo harmônico das correntes de energização. 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
2 ^a	60	30,4	33,1	78
3 ^a	9,4	9,6	18,2	31
4 ^a	5,4	1,6	6,5	18
5 ^a		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 $\frac{1}{4}$ de ciclo) para a obtenção da resposta, condição 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.

Este trabalho apresenta uma proposta de melhoramento para a proteção digital diferencial de transformadores de potência, usando redes neurais artificiais para a diferenciação entre as situações de energização e de falta interna 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 RNAs, em substituição ao método de filtragem harmônica existente, para a discriminação das correntes citadas com bastante eficiência e em um tempo satisfatório, se comparado aos métodos convencionais

mencionados. As redes neurais artificiais (RNAs), 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 mas também em muitos outros setores.

No segundo capítulo, é mostrada uma revisão bibliográfica, onde comenta-se 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.

No capítulo 4, são apresentados o algoritmo de proteção diferencial com a lógica convencional do relé, bem como, o algoritmo proposto.

A simulação computacional do transformador de potência e a geração dos arquivos de dados são mostradas no capítulo 5. Dentro do conteúdo relativo às simulações, estão um histórico do programa ATP - *Alternative Transient Program* -, o sistema elétrico estudado, o modelo de transformador simulado, cálculos e arquivos de dados.

O sexto capítulo envolve a aplicação de redes neurais artificiais dentro dos objetivos propostos anteriormente e a obtenção dos resultados. São apresentados os modelos das melhores configurações de redes neurais conseguidas e tabelas, atestando a eficiência do método implementado.

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

2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Um grande número de publicações em revistas especializadas, anais de conferências e teses indicam 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 para certas funções auxiliares, fornecendo assim maior rapidez, confiabilidade e precisão ao conjunto.

São comentados a seguir alguns destes trabalhos de maior destaque, seguindo a linha de estudo referida.

Com relação ao melhoramento da proteção diferencial de transformadores de potência, destaca-se inicialmente o trabalho de VERMA e BASHA [4] no qual foi utilizado um relé diferencial com restrição de corrente de energização (*inrush*), baseado em microprocessador. Neste estudo, a operação incorreta do relé nos casos de correntes de *inrush*, sobreexcitação 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 *inrush* no transformador. O autor realiza 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 *trip*².

RAHMAN e JEYASURYA [11] propuseram uma revisão atualizada dos algoritmos de proteção digital de transformador. O trabalho apresenta um estudo

² Envio de sinal de atuação da proteção ao disjuntor correspondente.

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 *inrush* 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 *trip* 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 [12] 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 *inrush* e faltas internas são distinguidas pela relação de magnitudes das correntes diferenciais em relação às componentes fundamental e de 2º harmônico. Estas componentes são muito 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, o filtro de Kalman teve um desempenho muito adequado para a restrição da corrente de *inrush* e mostrou-se muito rápido para faltas internas (menos de meio ciclo). De forma geral, o filtro em estudo apresentou bons resultados se comparado aos outros algoritmos, podendo ser estendido para a condição de sobreexcitação, 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. [13] 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 *inrush*, 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-se operação atrasada do relé e podendo-se 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.

No trabalho de LING e BASAK [7], 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. Então 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 *inrush* para qualquer combinação de parâmetros de energização. Foi possível também reduzir a amplitude da referida corrente para 62,5% , podendo o novo algoritmo substituir adequadamente o circuito do filtro de 2º harmônico empregado no relé diferencial convencional.

HIZAGI e BASAK [14] 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 contra situações de energização e de falta. É analisada a ação de restrição de 2º harmônico por filtragem digital para a distinção entre correntes de *inrush* e de

faltas internas, levando em consideração que o componente de 2º harmônico deve alcançar sua maior amplitude nos primeiros 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 [15], 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 a velocidade e precisão. O desempenho do sistema apresentado foi superior ao dos relés estáticos existentes.

Uma nova técnica para detecção da corrente de *inrush* em transformadores, foi proposta por BO et al. [16], através da detecção de componentes de alta frequência no sinal transitório de *inrush*. 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. Então, uma comparação entre o nível do sinal de restrição e um patamar predefinido determina se existe corrente de *inrush* 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 [17] 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 operaria se I_{op} excedesse um mínimo patamar. A grandeza I_{op} percentual torna-se importante se o relé encontrar-se 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 consequentes danos aos equipamentos.

WISZNIEWSKI e KASZTENNY [18] 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 *trip*. A teoria Fuzzy tem, entre outras, as seguintes vantagens na proteção digital do transformador: para casos simples, o algoritmo de decisão é reduzido para esquema de lógica booleana. O nível em que o *trip* deve ser iniciado, 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. 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. [19] 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 transientes são usados em uma rede neural que determina a fonte e a natureza dos transientes de forma precisa.

PEREZ et al. [20] estudam o treinamento de uma estrutura de redes neurais artificiais na discriminação das correntes de *inrush* das 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 *inrush* 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. [21] 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 onde o alto valor de 2º harmônico atrasaria o *trip* 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 uma 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.

Cabe citar PIHLER et al. [9], que consideram a operação melhorada da proteção de transformadores usando redes neurais. Neste trabalho, a rede foi aplicada para detecção de correntes de *inrush*, 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.

KOLLA [10] elaborou uma aplicação de redes neurais artificiais na identificação entre condições de *inrush* 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. Estão em andamento trabalhos com o objetivo de testar o esquema proposto, utilizando sinais em tempo real de um transformador em operação.

São importantes NAGPAL et al. [22], que desenvolveram um novo método de utilização de uma rede neural artificial *feedforward* com algoritmo *backpropagation* na identificação de correntes *inrush*. 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.

Ainda, BERTRAND et al. [23] 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 *inrush*) 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, 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.

Em relação ao programa ATP - *Alternative Transient Program* - temos o trabalho de KASZTENNY et al. [24], onde um modelo para o cálculo de transitórios eletromagnéticos possibilita 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. [25] publicaram uma discussão sobre aplicações e testes dos relés diferenciais sob condições de saturação usando o ATP.

Ainda, CHAUDHARY et al. [26] 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. [27] realizaram um estudo sobre o modelamento de um transformador de potência trifásico para a aplicação em esquemas de proteção digital. Neste 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. Essa inspiração é baseada no fato de que o cérebro humano possui as características de robustez e tolerância a 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 5 ilustra um neurônio humano, conforme [28].

FIGURA 5 - 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) desenvolveram um modelo de neurônio binário com limiar ρ unitário [28]. 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 6 seguinte mostra o neurônio em questão, também conforme [20]:

FIGURA 6 - 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 força da sinapse conectando o neurônio j ao neurônio i .

O valor ρ_i é o valor limiar específico da célula 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

O funcionamento da rede neural artificial consiste de um conjunto de módulos (células) conectados e com uma regra de propagação, como mostrado na FIGURA 7, a seguir.

FIGURA 7 - Modelo atual da célula de uma rede neural artificial

Cada neurônio recebe suas entradas com os pesos associados, vindas de outros neurônios ou de estímulo externo. A função de ativação é usualmente uma somatória que age nas entradas da rede. Os *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 são uma função sigmoide ou uma função degrau (*Hard Limiter*), segundo [20], como mostra a FIGURA 8.

FIGURA 8 - Funções de transferência do neurônio

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

A rede chamada *feedforward* tem a propagação do sinal para a frente, entre neurônios de camadas diferentes onde toda entrada é recebida pela camada adjacente, com exceção da primeira camada onde os sinais de entrada são as próprias entradas da rede. Os sinais resultantes propagam-se para a frente, uma camada por vez, até a última camada (saída) [29]. 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 e são 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, onde 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 [29].

3.3 Rede Neural Artificial Multicamadas e o método de treinamento *Backpropagation*

Uma rede neural completa é mostrada na FIGURA 9.

FIGURA 9 - Rede neural completa com três camadas

A figura mostra a estrutura de uma RNA de 3 camadas [9], 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:

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

F_i = função de transferência sigmoideal 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). A RNA utilizada neste trabalho usou o método de treinamento chamado *backpropagation* do erro que realiza a busca por um erro aceitável. O erro *backpropagation* [29] 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 zero. A estrutura de processamento paralelo de informação permite a inclusão de conhecimento hábil no processo, a detecção e a classificação de sinais [29].

A característica principal da RNA então 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.

4 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.

4.1 A Evolução dos Relés

A necessidade de aprimoramento na utilização de dispositivos de proteção em sistemas elétricos de potência é evidente.

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

Com o desenvolvimento cada vez mais rápido da tecnologia, estes equipamentos tornaram-se cada vez mais precisos e confiáveis, proporcionando ainda maior rapidez na operação da proteção. Foi no início dos anos 60, quando aconteceu a explosão da tecnologia eletrônica, que surgiu um novo conceito relacionado a esse tipo de aplicação [3]. Tivemos assim, a criação dos dispositivos transistorizados. Este conceito trouxe então significativos avanços para a área de proteção de transformadores, além de muitos outros setores. Estes avanços ocorreram obviamente no sentido do fornecimento de uma maior precisão na operação envolvida. Mas também conseguiu-se 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, tivemos forte pesquisa com o objetivo de tornar cada vez mais próximos os requisitos de menor custo e maior desempenho.

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

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 tais como [1]:

Rotinas de auto-checagem

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

Registro de eventos

O relé possui um gravador de sinais registrando os eventos de forma sequencial, 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, pode-se citar outros importantes benefícios obtidos através do emprego do relé digital, tais como:

Redução de custo

Atualmente, o relé microprocessado possui um preço equivalente ao dos relés convencionais (eletromecânicos), enquanto que no estágio anterior, o relé computadorizado tinha o custo de dez a vinte vezes 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.

4.2 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 então um sinal para o eventual desligamento do equipamento, através de algum tipo de chave apropriada. A FIGURA 10 ilustra resumidamente o diagrama funcional do relé digital [1].

FIGURA 10 - Fluxograma funcional do relé

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

Estes sinais de tensão e corrente provenientes dos TPs e TCs são então reduzidos para níveis computacionais ($\sim 10V$) adequados aos circuitos do relé nos Módulos de *Interface*. Nesta fase de entradas analógicas, também é realizada a isolamento galvânica, proteção elétrica contra surtos, e o acondicionamento. Ali também são transformados os sinais de corrente, para sinais de tensão, e estes sinais são então submetidos a um filtro analógico passa-baixa *anti-aliasing* para controlar o valor 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 *trip* 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.

No Gravador de Sinais com *Buffer*, são registrados sinais de situações pré e pós-falta.

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 sequência 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, juntamente com os indicadores e mostradores, 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 breve, 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 ela se torne menos sensível e eficiente.

4.3 Algoritmo Convencional do Relé Diferencial Digital

A lógica de processamento do relé convencional, incluindo a proteção diferencial com restrição harmônica e a proteção de faltas a terra de alta impedância é exibida na FIGURA 11 a seguir, segundo [3].

FIGURA 11 - Lógica de processamento do relé digital convencional

Após o cálculo das correntes passantes e diferenciais, o algoritmo do relé faz a verificação de um eventual *trip* instantâneo. Caso haja essa confirmação, o relé envia diretamente um sinal de comando para a abertura do disjuntor. Caso contrário, é calculada a composição harmônica dos sinais para a verificação da restrição de 2º harmônico. Se o nível harmônico encontrado for suficiente para representar uma situação de energização (*inrush*), o relé verifica a condição de falta para terra. Se não

ficar caracterizado o caso de *inrush*, o processo passa então a considerar a possibilidade de uma falta interna ao sistema.

É feita a seguir a constatação de uma possível sobreexcitação no transformador pelo teste de conteúdo de 5º harmônico. Ocorrendo a sobreexcitação, o relé seleciona o valor limite CO' na sua curva de ajuste. Caso contrário, é mantido o limite CO (ver FIGURA 3) e em ambos os casos, é sempre verificada a proteção de falta para a terra, muitas vezes feita por um relé independente.

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 forma³:

$$i_{DA} = i_A - (i_a - i_c) \frac{1}{K} \quad (9)$$

$$i_{DB} = i_B - (i_b - i_a) \frac{1}{K} \quad (10)$$

$$i_{DC} = i_C - (i_c - i_b) \frac{1}{K} \quad (11)$$

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

O valor K refere-se à relação dos números de espiras N1 e N2 dos lados primário e secundário do transformador, respectivamente. Portanto,

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

³As correntes incluídas nas equações (9), (10) e (11) são fasores.

Geralmente, um *trip* instantâneo é efetuado 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 respectivamente das correntes diferenciais e C_2 é o conteúdo máximo estipulado de 2º harmônico em relação à fundamental, sendo C_2 aproximadamente 12% [20].

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

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 sobreexcitação é constatada e o relé faz a mudança no valor de *pick-up* da curva para CO' e checa sua declividade (operação ou bloqueio).

4.4 Algoritmo da Proteção Diferencial Proposta com o Auxílio de Redes Neurais Artificiais

O algoritmo da FIGURA 12 ilustra o princípio lógico proposto para o relé diferencial, considerando o envolvimento da ferramenta baseada em redes neurais artificiais em substituição ao procedimento de extração de componentes harmônicos tradicional.

FIGURA 12 - Algoritmo da proteção diferencial com a inclusão da RNA

No algoritmo mostrado, após a chegada dos sinais ao processador, são calculadas as correntes passantes e diferenciais.

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 valor limite ajustado para a

curva de restrição percentual do relé. Se a presença de correntes diferenciais não for acusada pelo dispositivo, o algoritmo volta ao passo inicial.

Caso contrário, o algoritmo realiza a verificação da condição de *inrush* através da rede neural artificial. Se confirmada a condição, é feita a avaliação de falta para terra. Se esta estiver presente, 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 corrente diferencial de falta para terra, o processamento volta à sua etapa inicial, não enviando qualquer sinal para abertura de disjuntores.

Se o *inrush* não for detectado, o relé interpreta o sinal como sendo o de uma falta interna e faz o acréscimo na contagem de sinais de falta e verifica o valor do contador de faltas do mesmo modo já citado. Da mesma maneira, se o contador de faltas não atingiu o valor limite preestabelecido, o algoritmo retorna ao passo inicial. Uma vez atingido este limite, o sinal de *trip* é enviado aos disjuntores.

Analogamente à detecção de correntes de *inrush*, as situações de sobreexcitação também podem ser detectadas através das redes neurais artificiais e incorporadas ao algoritmo proposto, porém esta implementação não foi objeto de estudo neste trabalho, permanecendo como sugestão para trabalhos futuros.

De forma geral, as vantagens em substituir-se o reconhecimento das correntes de energização com filtragem do sinal por detecção baseada em redes neurais são evidentes, 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 .

5 A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Este capítulo traz um pequeno histórico sobre o programa ATP – *Alternative Transient Program* – 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.

5.1 Histórico do Programa ATP

O presente estudo sobre proteção diferencial digital dos transformadores de potência contou com o emprego do software ATP – *Alternative Transient 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 Transient Program* - foi desenvolvido a partir da década de 60 por Herman W. Dommel, para a *Bonneville Power Administration* (BPA) [5].

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 do mundo todo. 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 instalou-se o *Leuven EMTP Center* (LEC). Esta nova versão é denominada ATP – *Alternative Transient Program*, que representa a continuação das versões precedentes do programa [5].

As simulações executadas representam 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.

Baseadas nestas simulações, as formas de onda das correntes diferenciais serão comparadas e decisões sobre a atuação da proteção diferencial serão tomadas.

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 [5].

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.

5.2 Sistema Elétrico Estudado

A FIGURA 13 a seguir, mostra o desenho representativo do sistema elétrico envolvido, com os nomes dos nós utilizados nos arquivos de dados do EMTP-ATP [30]. Ao longo do estudo algumas modificações foram necessárias, incluindo o emprego de algumas chaves, resultando no sistema ilustrado [5].

FIGURA 13 - Sistema elétrico utilizado no ATP

O sistema elétrico consiste de uma fonte equivalente de 138 kV e potência de 30 MVA, conectado a um transformador de 25 MVA e 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 13 mostrada) com uma carga de 10 MVA.

As resistências entre CH1 e TPR1 e entre TSEC e NT1 possuem valores baixos ($0,001 \, \Omega$) e poderão dar lugar a transformadores de corrente, em um futuro complemento do estudo de relés diferenciais de proteção do transformador, pois os efeitos da saturação destes dispositivos (TCs) não foram considerados neste estudo.

O valor da impedância da carga (entre o nó CHG e a terra) é de $19,044 \, \Omega$ e o fator de potência é 0,92 indutivo.

As demais chaves são operadas durante o estudo para a simulação de faltas e condições de energização do transformador.

5.3 O Modelo do Transformador

A FIGURA 14 e a FIGURA 15 seguintes apresentam o modelo de transformador empregado e o detalhe das conexões dos enrolamentos [5].

FIGURA 14 - Modelo de transformador utilizado no ATP

FIGURA 15 - Detalhe das conexões dos enrolamentos

5.4 Cálculos para a Construção dos Arquivos de Dados do ATP

São apresentados a seguir os cálculos realizados na construção dos arquivos de dados para o sistema elétrico em questão.

Fonte Equivalente

Os dados para a fonte equivalente são expostos abaixo.

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

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

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

Indutância de sequência 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 estão listados abaixo.

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

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

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

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

Dados referentes a carga

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

$$S = 10 \text{ MVA}$$

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

$$\text{Fator de potência} = 0,92 \text{ indutivo}$$

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

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad (12)$$

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.

Portanto, os valores constituintes do arquivo de dados serão:

$$R = 17,520 \Omega \text{ e } L = 19,789 \text{ mH}$$

Dados para a rotina SATURATION

No arquivo principal de dados, é necessária a curva de saturação do transformador, obtida através da rotina SATURATION [30].

Originalmente, é empregada uma tabela com dados de tensão e corrente medidos no transformador. Esses dados são inseridos em um arquivo especialmente construído para gerar valores de corrente e fluxo, através de uma rotina intrínseca do ATP, chamada SATURATION.

Esses dados 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:

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

Tensão-base:

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

Corrente-base:

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

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 Ampère pelo valor da corrente-base (I_{BASE}). Esses valores são representados na TABELA 2 abaixo:

TABELA 2 - 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	$113,777 \times 10^{-03}$

Com estes dados, os campos da rotina SATURATION são preenchidos e sua saída é inserida no arquivo principal de dados da simulação.

Parâmetros para o transformador

Para o transformador, 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 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:

$$X'_{PRIMARIO} = 761,76 \times 0,04495 = 34,24112 \Omega$$

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

É fornecida a relação entre as reatâncias e resistências no primário e secundário do transformador:

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

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

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

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

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

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

Os dados obtidos são alocados no arquivo principal de dados, dando sequência 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 à terra. A FIGURA 16 e a TABELA 3 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 16 - Divisão do enrolamento do transformador em 10, 50 e 90%

TABELA 3 - Divisão do enrolamento primário em 10, 50 e 90% na aplicação de faltas internas

Nó	Percentagem 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 uma falta em N10A resultará em um defeito localizado em 10% do enrolamento. Analogamente, a aplicação de falta em N40A resultará em defeito localizado em 50% do enrolamento e, para falta em N90A, a percentagem do enrolamento envolvido é de 90%.

5.5 Formato dos Arquivos de Dados

Como exposto anteriormente, os arquivos de dados do ATP necessitam obedecer a um formato rigidamente estabelecido. Assim, os valores calculados no item 5.4 são inseridos em campos precisamente definidos dentro do arquivo de dados.

Cada linha do arquivo é também chamada de registro de dados. Os registros possuem campos específicos e com posições determinadas pelas colunas que ocupam.

A seguir, serão mostradas as posições dos dados, dentro dos arquivos para duas situações estudadas, ou seja, para o transformador em condição de energização (FIGURA 17) e sob falta interna em 50% do enrolamento primário (FIGURA 18).

```

BEGIN NEW DATA CASE
C
C ESTE ARQUIVO DE DADOS FOI ELABORADO COM O CÁLCULO DAS CORRENTES DIFERENCIAIS
C
C ARQUIVO BASE DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM TRANSFORMADOR
C
C ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR - Caso 1 - Fase A: 6ms; Fase B: 6ms; Fase C: 6ms
C SECUNDÁRIO EM ABERTO
2.00E-05.0340000
      1      50      1      1      1      1
TACS HYBRID
$DISABLE
Simulação com valores reamostrados para 1kHz
Enio Carlos Segatto - 08/1998
$ENABLE
C Fontes
C <nome>                                <--T start<-- T stop
91G1A                                   -1.          1.
91G1B                                   -1.          1.
91G1C                                   -1.          1.
91NT1A                                  -1.          1.
91NT1B                                  -1.          1.
91NT1C                                  -1.          1.
C
C OPERAÇÕES PARA CÁLCULO DE CORRENTES DIFERENCIAIS
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
98CDIFA =(G1A-((NT1A - NT1C) / (SQRT (3.) * 10)))/60
98CDIFB =(G1B-((NT1B - NT1A) / (SQRT (3.) * 10)))/60
98CDIFC =(G1C-((NT1C - NT1B) / (SQRT (3.) * 10)))/60

```



```

C SAÍDA DA TACS
33CDIFA CDIFB CDIFC
C
C FIM DA ROTINA TACS
BLANK card ending all TACS data
C rede elétrica
$VINTAGE, 1
CH1A TPRA 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH1B TPRB 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH1C TPRC 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
TSECA NT1A 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
TSECB NT1B 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
TSECC NT1C 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C Capacitâncias para balanceamento do sistema
TPRA 5.000000000E-05 0
TPRB 5.000000000E-05 0
TPRC 5.000000000E-05 0
C dados referentes à carga
CHGA .175E+02 .19789000E+02 0.000000000E+00 0
CHGB .175E+02 .19789000E+02 0.000000000E+00 0
CHGC .175E+02 .19789000E+02 0.000000000E+00 0
C ligação do ponto NEUT do transformador
NEUT NN1 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
NN1 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 53.99000000 0
53FONTC G1C
C dados referentes a 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 dados referentes ao transformador
C primeiro transformador
TRANSFORMER 1.060526.899T1 63000.
C <++++> Cards punched by support routine on 20-May-98 11.06.34 <++++>
C <++++> Cards punched by support routine on 20-May-98 12.02.27 <++++>
C SATURATION
C 60.0 7.9674338.333333 0
C 0.7170000000E-03 0.90
C 1.45062000000-03 1.00
C 7.9786000000E-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 1.048 90.83 138.0
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 as chaves do sistema elétrico
G1A CH1A .60E-02 1.000E+02 0.000E+00 0
G1B CH1B .60E-02 1.000E+02 0.000E+00 0
G1C CH1C .60E-02 1.000E+02 0.000E+00 0
NT1A CH2A 1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
NT1B CH2B 1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
NT1C CH2C 1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0

```

```

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
BLANK card terminating switches
C dados referentes ao gerador
14FONTA 0 .1100E+06 6.000E+01 0.000E+00 0 -1.000E+00 1.000E+02
14FONTB 0 .1100E+06 6.000E+01 -1.200E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14FONTC 0 .1100E+06 6.000E+01 1.200E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
BLANK card terminating sources
C CH1A CH1B CH1C NT1A NT1B NT1C
BLANK card terminating outputs
BLANK card terminating plots
BEGIN NEW DATA CASE

```

FIGURA 17 - Arquivo de dados do ATP para a situação de energização

```

BEGIN NEW DATA CASE
C
C ESTE ARQUIVO DE DADOS FOI ELABORADO COM O CÁLCULO DAS CORRENTES DIFERENCIAIS
C
C ARQUIVO BASE DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM TRANSFORMADOR
C Falta interna em 50% do enrolamento primário
2.00E-05.0340000
      1      50      1      1      1      1
TACS HYBRID
$DISABLE
Simulação com valores reamostrados para 1kHz
Enio Carlos Segatto - 08/1998
$ENABLE
C Fontes
C <nome> <---T start<--- T stop
91G1A -1. 1.
91G1B -1. 1.
91G1C -1. 1.
91NT1A -1. 1.
91NT1B -1. 1.
91NT1C -1. 1.
C
C OPERAÇÕES PARA CÁLCULO DE CORRENTES DIFERENCIAIS
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
98CDIFA =(G1A-((NT1A - NT1C) / (SQRT (3.) * 10)))/60
98CDIFB =(G1B-((NT1B - NT1A) / (SQRT (3.) * 10)))/60
98CDIFC =(G1C-((NT1C - NT1B) / (SQRT (3.) * 10)))/60
C SAIDA DA TACS
33CDIFA CDIFB CDIFC
C
C FIM DA ROTINA TACS
BLANK card ending all TACS data
C rede elétrica
$VINTAGE, 1
CH1A TPRA 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH1B TPRB 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
CH1C TPRC 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
TSECA NT1A 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
TSECB NT1B 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
TSECC NT1C 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
C Capacitâncias para balanceamento do sistema
TPRA 5.000000000E-05 0
TPRB 5.000000000E-05 0
TPRC 5.000000000E-05 0
C dados referentes à carga
CHGA .214E+02 .26185210E+02 0.000000000E+00 0
CHGB .214E+02 .26185210E+02 0.000000000E+00 0

```

```

CHGC .214E+02 .26185210E+02 0.000000000E+00 0
C ligação do ponto NEUT do transformador
  NEUT NN1 1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0
  NN1 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 53.99000000 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
C dados referentes ao transformador
C primeiro transformador
  TRANSFORMER 3.019326.899T1 63000.
C <+++++> Cards punched by support routine on 14-Oct-97 11.54.14 <+++++>
C SATURATION
C 60.0 7.9674338.333333 0
C 0.7170000000E-03 0.90
C 1.45062000000-03 1.00
C 7.9786000000E-03 1.10
C 41.1129000000E-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 N10A .104789.083 13.80
3N10A N50A .4191136.33 55.20
4N50A N90A .4191136.33 55.20
5N90A TPRB .104789.083 13.80
C segundo transformador
  TRANSFORMER T1 T2
1TSECB NEUT
2TPRB N10B
3N10B N50B
4N50B N90B
5N90B TPRC
C terceiro transformador
  TRANSFORMER T1 T3
1TSECC NEUT
2TPRC N10C
3N10C N50C
4N50C N90C
5N90C TPRA
C final da descrição do transformador
BLANK card terminating network
C dados referentes às chaves do sistema elétrico
  G1A CH1A -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
  G1B CH1B -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
  G1C CH1C -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
  NT1A CH2A -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
  NT1B CH2B -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
  NT1C CH2C -1.00E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
  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
  N50A .100E-01 1.000E+02 0.000E+00 0
  N90A 0.010E+00 1.000E+02 0.000E+00 0
BLANK card terminating switches
C dados referentes ao gerador
14FONTA 0 .1127E+06 6.000E+01 0.000E+00 0 -1.000E+00 1.000E+02
14FONTB 0 .1127E+06 6.000E+01-1.200E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
14FONTC 0 .1127E+06 6.000E+01 1.200E+02 0 -1.000E+00 1.000E+02
BLANK card terminating sources

```



```

C CH1A CH1B CH1C NT1A NT1B NT1C
BLANK card terminating outputs
BLANK card terminating plots
BEGIN NEW DATA CASE

```

FIGURA 18 - Arquivo de dados do ATP para a situação de falta interna em 50% do enrolamento

A seguir, serão mostrados os gráficos de situações envolvidas no trabalho. A FIGURA 19 e a FIGURA 20 trazem situações de energização. Na FIGURA 19, a energização acontece sob um valor de tensão de 110 kV (valor de pico fase-neutro), onde as fases A,B e C são fechadas todas no instante 6 ms. A FIGURA 20 é análoga à anterior, porém com instantes de fechamentos das fases A,B e C de 11, 7 e 6 ms, respectivamente. A FIGURA 21, FIGURA 22 e FIGURA 23 ilustram situações de faltas internas ao transformador. Na FIGURA 21, a falta interna ocorre no instante 10 ms, em 10% do enrolamento, sob tensão de 112,7 kV (valor de pico fase-neutro) e carga de 10 MVA. A FIGURA 22 é análoga à FIGURA 21, porém com o enrolamento afetado em 50%. Nota-se nesta figura, que as fases A e B são coincidentes. Para a FIGURA 23, a situação é semelhante, embora a percentagem de enrolamento afetado nesse caso é de 70%. Na FIGURA 24, 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 25 traz uma situação de falta externa trifásica, com parâmetros idênticos aos da FIGURA 24, porém com instantes de incidência da falta nas fases A,B e C de 10, 12 e 14 ms respectivamente. A FIGURA 26 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 27 ilustra um caso de remoção de falta externa trifásica, de parâmetros idênticos aos da FIGURA 26, 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. Por fim, a FIGURA 28 mostra uma curva relativa à 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. É importante notar que, da FIGURA 24 à FIGURA 28, apesar dos ruídos presentes nas formas de onda, suas baixas amplitudes não caracterizam a presença de correntes diferenciais significativas.

FIGURA 19 - Condição de energização com tensão=110,0 kV e fechamento em 6 ms na fase A, 6 ms na fase B e 6 ms na fase C

FIGURA 20 - Condição de energização com tensão=110,0 kV e fechamento em 11 ms na fase A, 7 ms na fase B e 6 ms na fase C

FIGURA 21 - Condição de falta interna em 10% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

FIGURA 22 - Condição de falta interna em 50% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

FIGURA 23 - Condição de falta interna em 70% do enrolamento, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

FIGURA 24 - Condição de falta externa monofásica, tensão=112,7 kV e carga=10 MVA em 10 ms

FIGURA 25 - 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

FIGURA 26 - Condição de remoção de falta externa monofásica, tensão=112,7 kV, carga=10 MVA, ocorrida em 10 ms e removida em 50 ms

FIGURA 27 - 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 28 - 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

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. A TABELA 4 e a TABELA 5, seguintes, mostram as combinações de casos utilizados na geração do conjunto de arquivos de dados das situações de energização e falta interna, respectivamente. Na primeira tabela, os valores de tensão primária da primeira coluna foram combinados aos instantes de fechamentos das chaves da segunda coluna, resultando em um total de 270 arquivos de dados. Para a segunda tabela, os valores de tensão primária da primeira coluna combinaram-se aos valores de carga da segunda e aos ângulos de incidência de falta da terceira coluna. Estes arquivos, por sua vez, foram associados às variações na percentagem do enrolamento que sofreu a falta (10, 30, 50, 70 e 90%), resultando novamente em um total de 270 arquivos de dados.

TABELA 4 - Combinação de dados para os casos de energização

Tensão (kV)	Instante de fechamento das chaves (ms)		
	Fase A	Fase B	Fase C
107,0	6	6	6
108,0	6	6	10
109,0	6	7	6
109,5	6	7	10
110,0	6	9	12
111,0	6	11	15
112,7	7	9	11
113,3	7	11	7
114,0	7	11	12
115,0	7	6	9
115,5	7	7	6
116,0	7	7	7
116,5	9	9	13
117,0	9	10	13
118,0	9	6	6
	9	9	12
	9	7	10
	9	11	7

TABELA 5 - Combinação de dados para os casos de falta interna

Tensão (kV)	Carga (MVA)	% do enrolamento envolvido na aplicação da falta	Ângulo de Incepção (graus)
112,7 115,0	8,0	10	43,0
	10,0	30	65,0
	12,0	50	108,0
		70	173,0
		90	216,0
			238,0
			260,0
			281,0
			324,0

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 o simulador de redes neurais SNNS – *Stuttgart Neural Network Simulator*.

6 A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM APLICAÇÃO DE RNAs

6.1 Introdução

Este capítulo abordará a aplicação do algoritmo de proteção diferencial de transformadores de potência com base em redes neurais artificiais, conforme descrito no capítulo 4.

Inicialmente será apresentada uma descrição do funcionamento do simulador SNNS, utilizado no reconhecimento de padrões para a distinção entre as correntes de energização e de falta interna. Este processo constitui apenas parte do algoritmo completo proposto.

A seguir, serão apresentados testes com relação ao esquema completo de proteção diferencial de transformadores, atestando sua eficiência.

6.2 Discriminação entre falta interna e corrente de *inrush*, utilizando reconhecimento de padrões

6.2.1 O software SNNS – *Stuttgart Neural Network Simulator*

O *software* empregado com a finalidade de simular uma rede neural artificial foi o SNNS – *Stuttgart Neural Network Simulator*, devido a sua comprovada eficiência e simplicidade em termos de *interface* gráfica [31].

O SNNS (versão 4.1) destina-se a 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 Stuttgart e disponibilizado como um sistema de domínio público.

As principais funções predefinidas pelo programa SNNS e seus respectivos parâmetros são comentadas a seguir e foram utilizadas em arquiteturas *feedforward*.

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 altera-se o peso anterior, sendo este valor adicionado a variação corrente. Os valores utilizados também situam-se 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 utilizada por este último método apresenta-se como segue e foi utilizada no presente trabalho, conforme [29][31].

$$\Delta w_{ij}(k+1) = \alpha \delta_j(k) y_i(k) + \mu \Delta w_{ij}(k) \quad (14)$$

b) função de atualização (*Topological Order*): 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 (*Randomize Weights*): inicializa os pesos da rede neural a ser treinada com valores aleatórios que pertencem ao intervalo $[-1,1]$.

d) função de ativação: função sigmoidal.

e) função de saída (*Out Identify*): atribui o valor de ativação da unidade em questão, como saída desta.

6.2.2 A formação dos conjuntos de padrões

A formação dos conjuntos de padrões para o treinamento e teste das RNAs é descrita a seguir.

Após os conjuntos de dados gerados serem devidamente misturados, estes foram divididos em conjunto de treinamento e validação (50% do total) e conjunto de testes (50% 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 um total 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 1kHz (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.

É ilustrado na FIGURA 29, a seguir, a correspondente divisão da camada de entrada das redes neurais estudadas, em função dos sinais de correntes diferenciais gerados para cada fase e submetidos a janela de dados móvel.

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 29 – Representação das entradas e saídas utilizadas nas redes neurais para a finalidade proposta

As duas primeiras amostras de cada caso foram reservadas para a detecção da corrente diferencial a ser feita pelo algoritmo do relé e portanto não foram utilizadas no treinamento. As correntes i_{A1} , i_{A2} , i_{A3} e i_{A4} representam os quatro próximos valores das correntes diferenciais da fase A, sob 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 540 casos, envolvendo situações de energização e falta interna, significando 1620 padrões de entrada (540×4 janelas) para a rede neural, sendo que 810 vetores correspondem a situações de falta interna ao transformador e outros 810 vetores correspondem a situações de energização. Desses 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 que 0,1 referem-se a situações de energização do transformador e que saídas maiores que 0,9 correspondem a situações faltosas. Valores situados dentro dessa faixa serão classificados pelo algoritmo como dados incertos.

Muitas topologias de redes neurais foram construídas, treinadas e testadas pelo programa SNNS e uma gama de testes, visando a correta distinção entre as situações faltosas e de energização do transformador de potência foram realizados. 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 em uma estação de trabalho *Sun-SPARCstation*.

6.2.3 Arquitetura 12+3+1

A arquitetura representada por 12+3+1, isto é, 12 neurônios na primeira camada (12 sinais de entrada de corrente em cada padrão), 3 neurônios na segunda camada (camada escondida) e 1 célula na camada de saída (resposta zero ou um) é mostrada na FIGURA 30, a seguir, onde a arquitetura mostra cada célula indicada pelo seu número.

FIGURA 30 – Topologia 12+3+1 utilizada

Diante desta configuração, conseguiu-se uma convergência para a somatória dos erros de treinamento e validação por volta da quinta casa decimal (0,00052 e 0,00057 respectivamente) em aproximadamente 20000 ciclos.

As curvas de decaimento da soma dos erros quadráticos (SSE) de treinamento e validação são mostradas na FIGURA 31, a seguir.

FIGURA 31 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+3+1

Após a fase de treinamento e validação da rede, efetuou-se o processo de testes, com a utilização de um banco de dados de 810 vetores não empregados na etapa de treinamento. A configuração testada conseguiu acertar 100% de classificação dos padrões requeridos, com erros da ordem de 10^{-2} (0,013008).

O gráfico de resposta da rede é ilustrado, a seguir, com a representação de 810 padrões, conforme a FIGURA 32.

FIGURA 32 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+3+1

Observa-se a correta classificação de dados da rede neural pela distribuição dos padrões do conjunto de testes, onde da amostra nº 1 a amostra nº 405, a resposta esperada da rede seria um valor menor que 0,1 , pois este intervalo abriga os dados de situações de energização (não atuação do relé). Da mesma forma, do padrão nº 406 ao padrão nº 810, a classificação esperada da rede seria um valor maior que 0,9 devido a esse intervalo conter dados de situações de falta interna (atuação do relé).

6.2.4 Arquitetura 12+4+1

A seguir, é mostrada na FIGURA 33, a arquitetura composta por 12 células na camada de entrada, 4 células na camada intermediária ou oculta e 1 neurônio como camada de saída da rede. Analogamente à estrutura mostrada anteriormente, cada célula é indicada pelo seu número.

FIGURA 33 – Topologia 12+4+1 utilizada

Analogamente à primeira arquitetura analisada, pode-se visualizar as curvas de convergência da soma dos erros quadráticos (SSE) de treinamento e validação para 20000 ciclos de treinamento conforme a FIGURA 34 seguinte.

FIGURA 34 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+4+1

Com relação ao gráfico de testes, a resposta da rede em questão é mostrada a seguir, na FIGURA 35, também com obtenção de um índice de 100% de acertos para os valores testados, segundo os intervalos de tolerância já descritos.

FIGURA 35 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+4+1

6.2.5 Arquitetura 12+5+1

A terceira composição selecionada envolve uma camada intermediária, englobando 5 células. Novamente são colocados aqui a topologia, a curva de decaimento da soma dos erros quadráticos de treinamento e validação e os patamares do gráfico de resposta da rede frente aos testes efetuados. A FIGURA 36 ilustra a estrutura construída, como mostrado a seguir.

FIGURA 36 – Topologia 12+5+1 utilizada

A próxima FIGURA 37 ilustra a convergência dos erros de treinamento e validação desta rede.

FIGURA 37 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+5+1

Os resultados de teste desta configuração são ilustrados na FIGURA 38, analogamente às estruturas anteriormente apresentadas.

FIGURA 38 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+5+1

As configurações de redes neurais cujas camadas intermediárias (ocultas) possuem um número menor que três neurônios não foram capazes de convergir para a obtenção de respostas aos testes dentro dos intervalos desejados.

A seguir, será mostrada uma arquitetura cujos resultados não alcançaram os índices de acerto requeridos, ou seja, existiram valores de resposta aos testes efetuados que extrapolaram os limites de tolerância fixados.

6.2.6 Arquitetura 12+2+1

A FIGURA 39 mostra esta topologia.

FIGURA 39 – Topologia 12+2+1 utilizada

O mal desempenho desta configuração pode ser comprovado pela sua respectiva curva de convergência como indicado pela FIGURA 40, a seguir.

FIGURA 40 – Curva de convergência dos erros de treinamento e validação para a arquitetura 12+2+1

Os erros obtidos (2,22%) durante a etapa de testes da rede 12+2+1 podem ser notados com ênfase ainda maior de acordo com o exposto na FIGURA 41, seguinte.

FIGURA 41 – Gráfico de resposta da rede para 810 padrões utilizando a arquitetura 12+2+1

Muitas arquiteturas com um número variável de neurônios na camada oculta mostraram-se capazes de classificar os padrões de teste de maneira ótima, resultando em avaliações que corresponderam em 100% de acerto com relação aos valores de

saída desejados, porém, a arquitetura escolhida como a de melhor desempenho foi aquela com três neurônios na camada oculta (12+3+1). Esta foi a menor topologia encontrada, no que diz respeito ao número de neurônios na camada escondida, e que forneceu 100% de acertos nos testes realizados. Assim, ela fornece um esforço computacional mais reduzido para responder a um dado de entrada e pode ser mais facilmente implementada no algoritmo do relé de proteção.

6.2.7 Respostas obtidas pela RNA

A fim de comprovar-se a eficiência da classificação desta estrutura (12+3+1), serão apresentadas tabelas, demonstrando os valores conseguidos como resposta a cada teste realizado.

A TABELA 6 seguinte mostra, para cada combinação de instantes de fechamento das chaves das fases A,B e C e para cada valor de tensão variada no transformador, as respostas fornecidas pela rede neural, analisadas para cada uma das três janelas de dados estudadas, relativas a condição de energização. Conforme citado anteriormente, a resposta esperada da rede para este caso é zero (0,0).

Analogamente à tabela citada, a TABELA 7, TABELA 8 e TABELA 9 mostram a totalidade dos casos de energização testados.

Da mesma forma, a TABELA 10, TABELA 11, TABELA 12, TABELA 13 e TABELA 14, trazem as respostas da rede neural escolhida para as situações de falta interna testadas (resposta 1,0). Estas tabelas representam faltas internas em 10, 30, 50, 70 e 90% do enrolamento da fase sob falta respectivamente. São representados os vários casos simulados com variação do valor da carga do sistema e do ângulo de incidência da falta, bem como pelo deslocamento da janela de dados móveis.

Nota-se nas tabelas apresentadas o ótimo desempenho da rede neural apresentada, onde a classificação dos padrões dentro dos valores desejados atingiu a meta de 100% de acertos, comparando-se a última coluna das tabelas (Resposta Esperada) com os valores obtidos para cada caso.

TABELA 6 – Respostas da RNA para energização do transformador

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO (kV)			
				114,0	115,0	115,5	
FASES				Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Esperada
A	B	C					
6	6	6	1ª	0,001085	0,001059	0,001033	0,000000
			2ª	0,000593	0,000630	0,000647	0,000000
			3ª	0,001323	0,001517	0,001618	0,000000
6	6	10	1ª	0,000049	0,000047	0,000046	0,000000
			2ª	0,000064	0,000061	0,000060	0,000000
			3ª	0,000281	0,000285	0,000286	0,000000
6	7	6	1ª	0,000815	0,000764	0,000753	0,000000
			2ª	0,000291	0,000294	0,000298	0,000000
			3ª	0,000418	0,000436	0,000451	0,000000
6	7	10	1ª	0,000041	0,000039	0,000039	0,000000
			2ª	0,000030	0,000029	0,000029	0,000000
			3ª	0,000059	0,000058	0,000058	0,000000
6	9	12	1ª	0,000202	0,000184	0,000178	0,000000
			2ª	0,000184	0,000168	0,000163	0,000000
			3ª	0,000333	0,000300	0,000290	0,000000
6	11	15	1ª	0,001035	0,001035	0,001034	0,000000
			2ª	0,001037	0,001037	0,001037	0,000000
			3ª	0,001059	0,001075	0,001085	0,000000
7	9	11	1ª	0,000117	0,000105	0,000100	0,000000
			2ª	0,000064	0,000059	0,000057	0,000000
			3ª	0,000081	0,000080	0,000079	0,000000
7	11	7	1ª	0,000823	0,000863	0,000868	0,000000
			2ª	0,000307	0,000313	0,000307	0,000000
			3ª	0,000091	0,000090	0,000088	0,000000
7	11	12	1ª	0,000300	0,000276	0,000267	0,000000
			2ª	0,000227	0,000208	0,000201	0,000000
			3ª	0,000349	0,000321	0,000315	0,000000

TABELA 7 – Respostas da RNA para energização do transformador

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO (kV)				
				113,3	114,0	115,0	115,5	
A	B	C		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Esperada
7	6	9	1ª	0,000066	0,000064	0,000062	0,000061	0,000000
			2ª	0,000071	0,000069	0,000067	0,000066	0,000000
			3ª	0,000101	0,000099	0,000096	0,000094	0,000000
7	7	6	1ª	0,001223	0,001240	0,001269	0,001287	0,000000
			2ª	0,001349	0,001383	0,001431	0,001465	0,000000
			3ª	0,001093	0,001127	0,001183	0,001220	0,000000
7	7	7	1ª	0,000331	0,000326	0,000317	0,000314	0,000000
			2ª	0,000296	0,000300	0,000310	0,000313	0,000000
			3ª	0,000288	0,000290	0,000296	0,000298	0,000000
9	9	13	1ª	0,000871	0,000842	0,000809	0,000779	0,000000
			2ª	0,000957	0,000939	0,000920	0,000910	0,000000
			3ª	0,000986	0,000974	0,000958	0,000956	0,000000
9	10	13	1ª	0,000819	0,000776	0,000714	0,000686	0,000000
			2ª	0,000923	0,000906	0,000869	0,000856	0,000000
			3ª	0,000869	0,000855	0,000818	0,000806	0,000000
9	6	6	1ª	0,001425	0,001475	0,001551	0,001584	0,000000
			2ª	0,002734	0,002971	0,003343	0,003511	0,000000
			3ª	0,005711	0,006366	0,007434	0,007946	0,000000
9	9	12	1ª	0,000250	0,000238	0,000223	0,000214	0,000000
			2ª	0,000218	0,000207	0,000193	0,000185	0,000000
			3ª	0,000388	0,000376	0,000348	0,000330	0,000000
9	7	10	1ª	0,000896	0,000837	0,000789	0,000760	0,000000
			2ª	0,000235	0,000222	0,000208	0,000200	0,000000
			3ª	0,000103	0,000098	0,000092	0,000089	0,000000
9	11	7	1ª	0,005168	0,005719	0,006648	0,007084	0,000000
			2ª	0,003796	0,004108	0,004708	0,004961	0,000000
			3ª	0,006485	0,007352	0,008892	0,009617	0,000000

TABELA 8 – Respostas de RNA para energização do transformador

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO (kV)				
				116,0	116,5	117,0	118,0	
A	B	C		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Esperada
6	6	6	1ª	0,001015	0,001014	0,000989	0,000971	0,000000
			2ª	0,000667	0,000689	0,000711	0,000759	0,000000
			3ª	0,001728	0,001856	0,001985	0,002277	0,000000
6	6	10	1ª	0,000045	0,000044	0,000043	0,000042	0,000000
			2ª	0,000059	0,000057	0,000057	0,000055	0,000000
			3ª	0,000289	0,000291	0,000295	0,000301	0,000000
6	7	6	1ª	0,000739	0,000714	0,000704	0,000675	0,000000
			2ª	0,000304	0,000313	0,000323	0,000345	0,000000
			3ª	0,000469	0,000499	0,000523	0,000585	0,000000
6	7	10	1ª	0,000038	0,000036	0,000035	0,000033	0,000000
			2ª	0,000028	0,000028	0,000028	0,000027	0,000000
			3ª	0,000058	0,000058	0,000058	0,000058	0,000000
6	9	12	1ª	0,000170	0,000164	0,000156	0,000144	0,000000
			2ª	0,000156	0,000151	0,000144	0,000133	0,000000
			3ª	0,000275	0,000266	0,000251	0,000232	0,000000
6	11	15	1ª	0,001035	0,001034	0,001034	0,001034	0,000000
			2ª	0,001037	0,001037	0,001037	0,001038	0,000000
			3ª	0,001096	0,001106	0,001115	0,001137	0,000000
7	9	11	1ª	0,000095	0,000090	0,000086	0,000078	0,000000
			2ª	0,000055	0,000053	0,000052	0,000049	0,000000
			3ª	0,000078	0,000078	0,000078	0,000078	0,000000
7	11	7	1ª	0,000892	0,000912	0,000921	0,000965	0,000000
			2ª	0,000310	0,000311	0,000308	0,000308	0,000000
			3ª	0,000088	0,000088	0,000086	0,000085	0,000000
7	11	12	1ª	0,000255	0,000247	0,000236	0,000219	0,000000
			2ª	0,000191	0,000185	0,000177	0,000164	0,000000
			3ª	0,000299	0,000292	0,000283	0,000256	0,000000

TABELA 9 – Respostas da RNA para energização do transformador

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO (kV)				
				116,0	116,5	117,0	118,0	
FASES				Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Esperada
A	B	C						
7	6	9	1ª	0,000061	0,000060	0,000059	0,000058	0,000000
			2ª	0,000065	0,000065	0,000064	0,000063	0,000000
			3ª	0,000093	0,000093	0,000091	0,000089	0,000000
7	7	6	1ª	0,001300	0,001315	0,001339	0,001370	0,000000
			2ª	0,001489	0,001518	0,001560	0,001623	0,000000
			3ª	0,001246	0,001277	0,001320	0,001384	0,000000
7	7	7	1ª	0,000310	0,000306	0,000304	0,000298	0,000000
			2ª	0,000318	0,000323	0,000328	0,000339	0,000000
			3ª	0,000301	0,000303	0,000305	0,000311	0,000000
9	9	13	1ª	0,000747	0,000718	0,000690	0,000638	0,000000
			2ª	0,000891	0,000877	0,000864	0,000829	0,000000
			3ª	0,000941	0,000933	0,000933	0,000904	0,000000
9	10	13	1ª	0,000658	0,000636	0,000612	0,000563	0,000000
			2ª	0,000837	0,000831	0,000813	0,000775	0,000000
			3ª	0,000789	0,000786	0,000766	0,000739	0,000000
9	6	6	1ª	0,001633	0,001672	0,001724	0,001821	0,000000
			2ª	0,003768	0,003981	0,004272	0,004839	0,000000
			3ª	0,008716	0,009400	0,010311	0,012215	0,000000
9	9	12	1ª	0,000208	0,000200	0,000194	0,000182	0,000000
			2ª	0,000179	0,000172	0,000167	0,000155	0,000000
			3ª	0,000317	0,000301	0,000290	0,000266	0,000000
9	7	10	1ª	0,000740	0,000713	0,000686	0,000638	0,000000
			2ª	0,000194	0,000187	0,000181	0,000169	0,000000
			3ª	0,000087	0,000084	0,000081	0,000076	0,000000
9	11	7	1ª	0,007756	0,008238	0,008997	0,010339	0,000000
			2ª	0,005347	0,005665	0,006095	0,006914	0,000000
			3ª	0,010820	0,011625	0,013008	0,015461	0,000000

TABELA 10 – Respostas da RNA para faltas internas em 10% do enrolamento do transformador

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO = 115,0 kV			Resposta Esperada
		CARGA (MVA)			
		8	10	12	
		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	
43	1ª	0,999975	0,999976	0,999976	1,000000
	2ª	0,999931	0,999931	0,999931	1,000000
	3ª	0,999974	0,999972	0,999971	1,000000
65	1ª	0,999365	0,999379	0,999390	1,000000
	2ª	0,998944	0,998944	0,998944	1,000000
	3ª	0,998942	0,998942	0,998942	1,000000
108	1ª	0,998943	0,998943	0,998943	1,000000
	2ª	0,998942	0,998942	0,998942	1,000000
	3ª	0,998942	0,998942	0,998942	1,000000
173	1ª	0,998942	0,998942	0,998942	1,000000
	2ª	0,998946	0,998946	0,998946	1,000000
	3ª	0,999019	0,999018	0,999018	1,000000
216	1ª	0,999761	0,999755	0,999749	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
238	1ª	0,999995	0,999996	0,999996	1,000000
	2ª	0,999919	0,999920	0,999920	1,000000
	3ª	0,999977	0,999974	0,999973	1,000000
260	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
281	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	0,999991	0,999992	0,999992	1,000000
324	1ª	0,999996	0,999996	0,999997	1,000000
	2ª	0,999929	0,999929	0,999929	1,000000
	3ª	0,999930	0,999930	0,999930	1,000000

TABELA 11 – Respostas da RNA para faltas internas em 30% do enrolamento do transformador

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO = 115,0 kV			
		CARGA (MVA)			
		8	10	12	
		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	
43	1ª	0,999999	0,999999	0,999999	1,000000
	2ª	0,999933	0,999933	0,999933	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
65	1ª	0,999999	0,999999	0,999999	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	0,998971	0,998971	0,998972	1,000000
108	1ª	0,999235	0,999238	0,999239	1,000000
	2ª	0,998943	0,998943	0,998943	1,000000
	3ª	0,998942	0,998942	0,998942	1,000000
173	1ª	0,998942	0,998942	0,998942	1,000000
	2ª	0,998945	0,998945	0,998945	1,000000
	3ª	0,999024	0,999024	0,999024	1,000000
216	1ª	0,999243	0,999243	0,999243	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
238	1ª	0,999999	0,999999	0,999999	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
260	1ª	0,999989	0,999989	0,999989	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
281	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	0,999986	0,999986	0,999986	1,000000
324	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000

TABELA 12 – Respostas da RNA para faltas internas em 50% do enrolamento do transformador

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO = 115,0 kV			
		CARGA (MVA)			
		8	10	12	
		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Esperada
43	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	0,999986	0,999986	0,999986	1,000000
	3ª	0,999944	0,999944	0,999944	1,000000
65	1ª	0,999920	0,999920	0,999920	1,000000
	2ª	0,999922	0,999922	0,999922	1,000000
	3ª	0,999916	0,999916	0,999916	1,000000
108	1ª	0,991091	0,991204	0,991189	1,000000
	2ª	0,997290	0,997313	0,007299	1,000000
	3ª	0,999732	0,999725	0,999715	1,000000
173	1ª	0,998994	0,998990	0,998985	1,000000
	2ª	0,999042	0,999043	0,999043	1,000000
	3ª	0,999118	0,999118	0,999118	1,000000
216	1ª	0,999188	0,999188	0,999188	1,000000
	2ª	0,999764	0,999762	0,999761	1,000000
	3ª	0,999999	0,999999	0,999999	1,000000
238	1ª	0,999501	0,999500	0,999499	1,000000
	2ª	0,999987	0,999987	0,999987	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
260	1ª	0,998278	0,998315	0,998313	1,000000
	2ª	0,998139	0,998200	0,998212	1,000000
	3ª	0,995625	0,995597	0,995530	1,000000
281	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	0,999999	0,999999	0,999999	1,000000
324	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	0,999929	0,999929	0,999929	1,000000
	3ª	0,999930	0,999930	0,999930	1,000000

TABELA 13 – Respostas da RNA para faltas internas em 70% do enrolamento do transformador

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO = 115,0 kV			Resposta Esperada
		CARGA (MVA)			
		8	10	12	
		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	
43	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	0,999996	0,999996	0,999996	1,000000
	3ª	0,999931	0,999931	0,999931	1,000000
65	1ª	0,999993	0,999993	0,999993	1,000000
	2ª	0,999930	0,999930	0,999930	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
108	1ª	0,999946	0,999946	0,999946	1,000000
	2ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
173	1ª	0,999958	0,999956	0,999955	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	0,999864	0,999871	0,999878	1,000000
216	1ª	0,998967	0,998967	0,998967	1,000000
	2ª	0,999466	0,999463	0,999460	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
238	1ª	0,999080	0,999080	0,999079	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
260	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
281	1ª	0,999897	0,999897	0,999896	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
324	1ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	2ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000

TABELA 14 - Respostas da RNA para faltas internas em 90% do enrolamento do transformador

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	JANELA DE DADOS MÓVEIS	TENSÃO = 115,0 kV			Resposta Esperada
		CARGA (MVA)			
		8	10	12	
		Resposta Obtida	Resposta Obtida	Resposta Obtida	
43	1ª	0,999503	0,999471	0,999435	1,000000
	2ª	0,999978	0,999978	0,999978	1,000000
	3ª	0,999935	0,999935	0,999935	1,000000
65	1ª	0,999952	0,999952	0,999952	1,000000
	2ª	0,999930	0,999930	0,999930	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
108	1ª	0,999908	0,999908	0,999907	1,000000
	2ª	0,999927	0,999927	0,999927	1,000000
	3ª	0,999928	0,999928	0,999928	1,000000
173	1ª	0,999383	0,999386	0,999381	1,000000
	2ª	0,999846	0,999846	0,999845	1,000000
	3ª	0,999995	0,999994	0,999994	1,000000
216	1ª	0,999368	0,999371	0,999373	1,000000
	2ª	0,999554	0,999551	0,999550	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
238	1ª	0,999350	0,999349	0,999350	1,000000
	2ª	0,999998	0,999998	0,999998	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
260	1ª	0,999998	0,999997	0,999997	1,000000
	2ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
	3ª	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
281	1ª	0,999915	0,999921	0,999924	1,000000
	2ª	0,999729	0,999729	0,999728	1,000000
	3ª	0,999612	0,999613	0,999609	1,000000
324	1ª	0,997307	0,997160	0,997000	1,000000
	2ª	0,999921	0,999921	0,999921	1,000000
	3ª	0,999930	0,999930	0,999930	1,000000

6.3 Esquema completo de proteção diferencial de transformadores

Nesta seção, serão apresentados os testes efetuados com o intuito de comprovar-se a eficiência do novo esquema proposto de funcionamento de um relé diferencial para a proteção de transformadores de potência.

Implementou-se um programa em linguagem FORTRAN, onde houve a inclusão da rede neural artificial no algoritmo tradicional de proteção de transformadores. Este programa considera os pesos conseguidos no treinamento da rede neural e procura avaliar uma vasta gama de casos que podem ocorrer em campo.

De acordo com o algoritmo mostrado no capítulo 4, os sinais de corrente diferencial provenientes das simulações são lidos pelo algoritmo, que faz a detecção de corrente diferencial, analisando a curva de ajuste da restrição percentual do relé, conforme descrito no capítulo 1. Sendo esta detectada, o algoritmo utiliza-se da rede neural artificial para a classificação do sinal entre as situações de energização e falta interna ao transformador.

Após esta etapa, se a corrente de *inrush* é detectada pela rede neural, o programa faz a verificação de corrente diferencial de falta para terra e dependendo da resposta, incrementa e verifica o contador de faltas. Se a corrente diferencial detectada for de falta interna, o algoritmo passa diretamente para a análise do contador de faltas. Caso este exceda um valor prefixado, o sinal de desligamento é enviado ao disjuntor de proteção.

É importante mencionar que o algoritmo utiliza a RNA na classificação do sinal, considerando inicialmente a primeira janela de dados. A fim de obter-se maior precisão na resposta fornecida pela rede, uma segunda janela de dados é utilizada para a confirmação do resultado anterior. Caso estes sejam coincidentes, a classificação é aceita. Caso contrário, uma terceira janela de dados seria analisada. Para os testes realizados, é válido informar que a rede neural utilizou sempre duas janelas em sua classificação.

As duas primeiras amostras de cada caso simulado são reservados para que o programa detecte a presença de corrente diferencial. Os próximos quatro valores constituem a primeira janela de dados utilizada pela RNA na classificação do sinal.

Serão exibidas a seguir as tabelas construídas com a finalidade de ilustrar a resposta do algoritmo do relé diferencial com relação aos testes aplicados.

Para tanto, foram simuladas situações de energização, falta interna, falta externa monofásica e trifásica, remoção de falta externa monofásica e trifásica e casos de rejeição de carga. Todos os casos descritos constituem-se ocorrências onde há a presença de altos valores de impulsos transitórios no sistema.

As próximas seis tabelas (tabelas 15 a 20) são semelhantes e correspondem a situações de falta interna em 10, 50 e 90% do enrolamento do transformador. Foram variados os ângulos de incidência da falta e os valores de carga do sistema.

Observa-se na segunda coluna da TABELA 15, o tempo de detecção de corrente diferencial pelo algoritmo. Na terceira e quarta colunas, são apresentados os tempos de classificação do sinal pela rede neural e o número de janelas de dados utilizadas na tarefa, lembrando que foram utilizadas duas janelas de dados para a confirmação da resposta do dispositivo.

Na última coluna, há a contagem do tempo total gasto pelo algoritmo proposto na execução do processo, até a decisão final de envio do sinal de *trip*.

Nota-se em todas as tabelas apresentadas que o algoritmo do relé diferencial utilizou 1 ms para a detecção da corrente diferencial e 5 ms na classificação dessa corrente. O tempo total de resposta do relé para o envio do sinal de abertura do disjuntor é de 6 ms para os casos de falta interna como mostra a última coluna e esta correta decisão foi tomada para 100% dos casos estudados.

A seguir são exibidas as tabelas de resposta do relé para os casos de energização, nos quais foram variados os instantes de fechamento das chaves nas fases A, B e C e os valores de tensão na fonte.

Na TABELA 21, TABELA 22, TABELA 23 e TABELA 24 seguintes, pode-se observar na primeira coluna o tempo de detecção de corrente diferencial pelo relé, lembrando que essa operação é feita com base na curva de ajuste da restrição percentual do dispositivo.

TABELA 15 – Funcionamento do relé para falta internas em 10% do enrolamento do transformador (carga de 8 MVA)

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	TENSÃO = 115 kV CARGA = 8 MVA FALTA EM 10% DO ENROLAMENTO			
	TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
43	1,0	5,0	2,0	6,0
65	1,0	5,0	2,0	6,0
108	1,0	5,0	2,0	6,0
173	1,0	5,0	2,0	6,0
216	1,0	5,0	2,0	6,0
238	1,0	5,0	2,0	6,0
260	1,0	5,0	2,0	6,0
281	1,0	5,0	2,0	6,0
324	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 16 - Funcionamento do relé para falta internas em 10% do enrolamento do transformador (carga de 12 MVA)

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	TENSÃO = 115 kV CARGA = 12 MVA FALTA EM 10% DO ENROLAMENTO			
	TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
43	1,0	5,0	2,0	6,0
65	1,0	5,0	2,0	6,0
108	1,0	5,0	2,0	6,0
173	1,0	5,0	2,0	6,0
216	1,0	5,0	2,0	6,0
238	1,0	5,0	2,0	6,0
260	1,0	5,0	2,0	6,0
281	1,0	5,0	2,0	6,0
324	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 17 - Funcionamento do relé para faltas internas em 50% do enrolamento do transformador (carga de 8 MVA)

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	TENSÃO = 115 kV CARGA = 8 MVA FALTA EM 50% DO ENROLAMENTO			
	TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
43	1,0	5,0	2,0	6,0
65	1,0	5,0	2,0	6,0
108	1,0	5,0	2,0	6,0
173	1,0	5,0	2,0	6,0
216	1,0	5,0	2,0	6,0
238	1,0	5,0	2,0	6,0
260	1,0	5,0	2,0	6,0
281	1,0	5,0	2,0	6,0
324	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 18 - Funcionamento do relé para faltas internas em 50% do enrolamento do transformador (carga de 12 MVA)

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	TENSÃO = 115 kV CARGA = 12 MVA FALTA EM 50% DO ENROLAMENTO			
	TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
43	1,0	5,0	2,0	6,0
65	1,0	5,0	2,0	6,0
108	1,0	5,0	2,0	6,0
173	1,0	5,0	2,0	6,0
216	1,0	5,0	2,0	6,0
238	1,0	5,0	2,0	6,0
260	1,0	5,0	2,0	6,0
281	1,0	5,0	2,0	6,0
324	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 19 - Funcionamento do relé para faltas internas em 90% do enrolamento do transformador (carga de 8 MVA)

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	TENSÃO = 115 kV CARGA = 8 MVA FALTA EM 90% DO ENROLAMENTO			
	TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
43	1,0	5,0	2,0	6,0
65	1,0	5,0	2,0	6,0
108	1,0	5,0	2,0	6,0
173	1,0	5,0	2,0	6,0
216	1,0	5,0	2,0	6,0
238	1,0	5,0	2,0	6,0
260	1,0	5,0	2,0	6,0
281	1,0	5,0	2,0	6,0
324	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 20 - Funcionamento do relé para faltas internas em 90% do enrolamento do transformador (carga de 12 MVA)

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (graus)	TENSÃO = 115 kV CARGA = 12 MVA FALTA EM 90% DO ENROLAMENTO			
	TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
43	1,0	5,0	2,0	6,0
65	1,0	5,0	2,0	6,0
108	1,0	5,0	2,0	6,0
173	1,0	5,0	2,0	6,0
216	1,0	5,0	2,0	6,0
238	1,0	5,0	2,0	6,0
260	1,0	5,0	2,0	6,0
281	1,0	5,0	2,0	6,0
324	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 21 – Funcionamento do relé para energização (tensão de 114,0 kV)

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			TENSÃO = 114,0 kV			
			TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
FASES						
A	B	C				
6	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	6	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	7	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	9	12	1,0	5,0	2,0	6,0
6	11	15	1,0	5,0	2,0	6,0
7	9	11	2,0	5,0	2,0	7,0
7	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0
7	11	12	2,0	5,0	2,0	7,0
7	6	9	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	7	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	10	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	12	2,0	5,0	2,0	7,0
9	7	10	2,0	5,0	2,0	7,0
9	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 22 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 115,5 kV)

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			TENSÃO = 115,5 kV			
			TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
FASES						
A	B	C				
6	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	6	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	7	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	9	12	1,0	5,0	2,0	6,0
6	11	15	1,0	5,0	2,0	6,0
7	9	11	2,0	5,0	2,0	7,0
7	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0
7	11	12	2,0	5,0	2,0	7,0
7	6	9	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	7	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	10	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	12	2,0	5,0	2,0	7,0
9	7	10	2,0	5,0	2,0	7,0
9	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 23 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 116,5 kV)

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			TENSÃO = 116,5 kV			
			TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
FASES						
A	B	C				
6	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	6	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	7	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	9	12	1,0	5,0	2,0	6,0
6	11	15	1,0	5,0	2,0	6,0
7	9	11	2,0	5,0	2,0	7,0
7	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0
7	11	12	2,0	5,0	2,0	7,0
7	6	9	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	7	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	10	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	12	2,0	5,0	2,0	7,0
9	7	10	2,0	5,0	2,0	7,0
9	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0

TABELA 24 - Funcionamento do relé para energização (tensão de 118,0 kV)

INSTANTE DE FECHAMENTO DAS CHAVES (ms)			TENSÃO = 118,0 kV			
			TEMPO DE DETECÇÃO DE CORR. DIFER. PELO RELÉ (ms)	TEMPO DE CLASSIFICAÇÃO DA RNA (ms)	Nº DE JANELAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO	TEMPO TOTAL GASTO PELO ALGORITMO (ms)
FASES						
A	B	C				
6	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	6	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
6	7	10	1,0	5,0	2,0	6,0
6	9	12	1,0	5,0	2,0	6,0
6	11	15	1,0	5,0	2,0	6,0
7	9	11	2,0	5,0	2,0	7,0
7	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0
7	11	12	2,0	5,0	2,0	7,0
7	6	9	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	6	2,0	5,0	2,0	7,0
7	7	7	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	10	13	2,0	5,0	2,0	7,0
9	6	6	2,0	5,0	2,0	7,0
9	9	12	2,0	5,0	2,0	7,0
9	7	10	2,0	5,0	2,0	7,0
9	11	7	1,0	5,0	2,0	6,0

Para cada situação simulada com variações nos instantes de fechamento das chaves e nas tensões do transformador, nota-se que o tempo de detecção de corrente diferencial pelo relé, indicado na quarta coluna, é de no máximo 2 ms.

Como o tempo de classificação do sinal pela RNA foi de 5 ms, o tempo máximo para que o algoritmo tome a decisão foi de 7 ms, como indicado nas últimas colunas das tabelas. Deve ser ressaltado que, para 100% dos casos testados, o relé reconheceu a situação de energização e portanto não enviou qualquer sinal de abertura aos disjuntores correspondentes.

A fim de cobrir uma ampla extensão de casos para uma maior valorização dos testes efetuados pelo algoritmo proposto, outras situações críticas foram testadas.

A seguir serão mostradas as tabelas relativas a esses testes.

A TABELA 25, ilustrada a seguir, traz as respostas fornecidas pelo relé diferencial para casos de falta externa monofásica, onde foram variados os ângulos de incidência das faltas e o valor da tensão no transformador. Nota-se que as respostas fornecidas pelo algoritmo foram a de não presença de corrente diferencial em 100% dos casos. Estes resultados são satisfatórios, uma vez que um evento desse tipo não deve sensibilizar o dispositivo de proteção do transformador de potência.

A TABELA 26 seguinte mostra o mesmo tipo de resultado que o anterior, mas para casos de faltas externas trifásicas.

Novamente o algoritmo respondeu com 100% de adequação para as situações simuladas.

Analogamente, é apresentada a TABELA 27 e a TABELA 28, nas quais estão incluídas as respostas fornecidas pelo algoritmo para as situações de remoção de faltas externas monofásicas e trifásicas, respectivamente. Novamente o programa respondeu adequadamente a todas as situações testadas. Para estes casos, variou-se os ângulos de incidência das faltas na fase A e os instantes de remoção das mesmas.

As situações de rejeição de carga estão ilustradas na TABELA 29 seguinte, onde os parâmetros variados foram os instantes de rejeição da carga e os próprios valores das mesmas. Percebe-se mais uma vez a resposta adequada fornecida pelo sistema de proteção concernente a 100% dos casos testados.

TABELA 25 – Funcionamento do relé para falta externa monofásica

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA NA FASE A (graus)	TENSÃO (kV)	
	112,7	115,0
	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL
43	NÃO	NÃO
173	NÃO	NÃO
216	NÃO	NÃO
281	NÃO	NÃO
324	NÃO	NÃO

TABELA 26 - Funcionamento do relé para falta externa trifásica

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA TRIFÁSICA (graus)	TENSÃO (kV)	
	112,7	115,0
	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL
43	NÃO	NÃO
173	NÃO	NÃO
216	NÃO	NÃO
281	NÃO	NÃO
324	NÃO	NÃO

TABELA 27 – Funcionamento do relé para remoção de falta externa monofásica

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA NA FASE A (graus)	INSTANTE DE REMOÇÃO DA FALTA (ms)			
	40,0	50,0	60,0	70,0
	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL
43	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
173	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
281	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

TABELA 28 – Funcionamento do relé para remoção de falta externa trifásica

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA TRIFÁSICA (graus)	INSTANTE DE REMOÇÃO DA FALTA (ms)			
	40,0	50,0	60,0	70,0
	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL
43	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
173	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
281	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

TABELA 29 – Funcionamento do relé para rejeição de carga

INSTANTE DE REJEIÇÃO DA CARGA (ms)			CARGA (MVA)		
			8,0	10,0	12,0
FASES			DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL	DETECÇÃO DE CORRENTE DIFERENCIAL
A	B	C			
18	10	15	NÃO	NÃO	NÃO
13	10	18	NÃO	NÃO	NÃO
24	13	18	NÃO	NÃO	NÃO
15	24	13	NÃO	NÃO	NÃO

7 CONCLUSÕES

Através de observações teóricas e experimentais, bem como de publicações na área, destaca-se a especial atenção necessária à detecção da corrente de magnetização (*inrush*) 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 faltosas de situações de magnetização.

Este trabalho envolve um mecanismo de detecção de correntes de *inrush*, através da diferenciação entre sua forma de onda e a da corrente de falta. Isto é conseguido, adicionando-se elementos de inteligência artificial ao algoritmo de proteção digital pela utilização de uma rede neural artificial.

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

Pelos eficientes resultados obtidos nestas simulações, há um estímulo a possíveis estudos futuros com o intuito de melhorar ainda mais o arranjo do sistema elétrico em questão, a fim de conseguir-se uma maior proximidade ao modelo real.

Em relação ao programa SNNS – *Stuttgart Neural Network Simulator* – a maior limitação encontrada, por esta ferramenta de manuseio de redes neurais artificiais, foi a dificuldade em aplicar-se os algoritmos de treinamento com parâmetros variáveis no decorrer do processo, usando-se apenas a interface gráfica do simulador. Isto foi superado pela obtenção de estruturas neurais de rápida convergência e, assim, não foi necessária nessa etapa a variação de parâmetros, tais como, a taxa de aprendizagem e o termo *momentum*.

Com isso, acompanhou-se a característica de decaimento dos erros de aprendizagem para as estruturas estudadas, observando-se que as respostas das redes para os conjuntos de testes apresentados não demonstraram erros de classificação, sendo que os desvios de saída obtidos foram de, no máximo, da ordem de 10^{-4} .

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.

As melhores redes obtidas e apresentadas neste trabalho foram as de topologia 12+3+1, 12+4+1 e 12+5+1, obtendo convergências mais rápidas e resultados de testes precisos. Todas elas distinguiram com exatidão as situações onde o relé deveria ou não operar, isto é, os casos de falta interna ao transformador e os casos de energização, com 100% de acertos.

Uma observação válida é a de que uma RNA de três camadas é capaz de classificar satisfatoriamente amostras para qualquer situação de campo interno e aproximar qualquer função não-linear. A determinação do número ótimo de neurônios por camada é conseguida através da experiência em resolver problemas semelhantes.

Foi aplicado ainda um estudo sobre o algoritmo de operação do relé com a inclusão da rede neural artificial escolhida (12+3+1), em substituição ao processo de filtragem para a obtenção do conteúdo harmônico do sinal, avaliando o funcionamento total do dispositivo. O sistema obteve respostas corretas para os vários tipos de situações testadas, contando com uma classificação rápida e precisa pela RNA, principalmente se comparada aos métodos convencionais⁴. De forma geral, conclui-se que o método desenvolvido e aplicado mostrou-se rápido e eficiente em busca do objetivo proposto.

Um complemento do trabalho será ainda conseguido, quando dados gerados pelo ATP forem substituídos por valores reais captados através de ensaios em transformadores, e a elaboração de um protótipo do relé for iniciada. O efeito de saturação dos transformadores de corrente (TCs) poderá constituir parte de estudos futuros.

A aplicação da ferramenta de redes neurais artificiais constitui uma nova e importante etapa na metodologia de análise de relés diferenciais na proteção de transformadores, como pretende este desenvolvimento.

⁴ O método convencional baseado na decomposição harmônica por Fourier gasta no mínimo meio ciclo para o fornecimento da resposta devido à necessidade de preenchimento da janela de dados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coury, D.V. - “Curso de Proteção Digital em Sistemas Elétricos” , EESC – USP – São Carlos – SP – Brasil (1997).
- [2] Kolla, S.R. ; Gedeon, D.V. - “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 (1995), 195-198.
- [3] Piovesan, L.S. - “Avaliação de Algoritmos para Proteção Diferencial de Transformadores”, Dissertação de Mestrado – USP – SP – Brasil (1997).
- [4] Verma, H.K. ; Basha, A.M. - “A Microprocessor-based Inrush Restrained Differential Relay for Transformer Protection” , Journal of Microcomputer Applications (1986)9, 313-318.
- [5] Coury, D.V. ; Campos, P.E.G. ; Tavares, M.C. - “Utilização do ATP-EMTP para Estudo da Proteção Diferencial dos Transformadores de Potência” , XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, MG, Brasil, Set., (1998).
- [6] Sidhu, T.S. ; Sachdev, M.S. - “On-line Identification of Magnetizing Inrush and Internal Faults in Three-Phase Transformers” , IEEE Transactions on Power Delivery (1992), vol.7, 1885-1891.
- [7] Ling, P.C.Y. ; Basak, A. - “A New Detection Scheme for Realisation of Magnetising Inrush Current in Transformers” , Fourth International Conference on Developments in Power System Protection (1989), 239-243.

- [8] Stigant, S.A. ; Franklin, A.C. - "The J&P Transformer Book", USA, Halsted Press (1973).
- [9] Pihler, J. ; Grcar, B. ; Dolinar, D. - "Improved Operation of Power Transformer Protection Using Artificial Neural Network", IEEE Transactions on Power Delivery (1997), vol.12, n.3, 1128-1136.
- [10] Kolla, S.R. - "Digital Protection of Power Transformers Using Artificial Neural Networks" , Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Instrumentation and Control (1995), 141-150.
- [11] Rahman, M.A. ; Jeyasurya, B. - "A State-of-the-art Review of Transformer Protection Algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery (1988), vol.3, n.2, 534-544.
- [12] Murty, Y.V.V.S. ; Smolinski, W.J. - "Design and Implementation of a Digital Differential Relay for a 3-Phase Power Transformer Based on Kalman Filtering Theory", IEEE Transactions on Power Delivery (1988), vol.3, n.2, 525-533.
- [13] Liu, P. ; Malik, O.P. ; Chen, D. ; Hope, G.S. ; Guo, Y. - "Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults", IEEE Transactions on Power Delivery (1992), vol.7, n.4, 1912-1919.
- [14] Hijazi, M.E.A. ; Basak, A. - "Analysis of Integral Method for Fault Detection in Transformers", IEEE Transactions on Magnetics (1993), vol.29, n.6, 3213-3215.
- [15] Grcar, B. ; Dolinar, D. - "Integrated Digital Power Transformer Protection", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution (1994), vol.141, n.4, 323-328.

- [16] Bo, Z.Q. ; Redfern, M.A. ; Aggarwal, R.K. ; Johns, A.T. – “A New Technique to Detect Transformer Magnetizing Inrush” , Universities Power Engineering Conference, Vol.1, 129-132, (1997).
- [17] Criss, J. ; Lawhead, L. - “Using Transformer Differential Relay Iop Characteristics to Measure Near-trip Conditions”, Proceedings of the 1996 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (1996), 103-108.
- [18] Wiszniewski, A. ; Kasztenny, B. ; “A Multi-criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic”, IEEE Transactions on Power Delivery (1995), vol.10, n.4, 1786-1792.
- [19] Mao, P.L. ; Bo, Z.Q. ; Aggarwal, R.K. ; Li, R.M. - “Identification of Electromagnetic Transients in Power Transformer System Using Artificial Neural Network” , Proceedings of the 1998 International Conference on Power System Technology (1998), vol.2, 880-884.
- [20] Perez, L.G. ; Flechsig, A.J. ; Meador, J.L. ; Obradovic, Z. - “Training an Artificial Neural Network to Discriminate Between Magnetizing Inrush and Internal Faults”, IEEE Transactions on Power Delivery (1994), vol.9, n.1, 434-441.
- [21] Bastard, P. ; Meunier, M. ; Régál, H. - “Neural Network-based Algorithm for Power Transformer Differential Relays”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution (1995), vol.142, n.4, 386-392.
- [22] Nagpal, M. ; Sachdev, M.S. ; Ning, K. ; Wedephol, L.M. - “Using a Neural Network for Transformer Protection” , Proceedings of the 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery (1995), Part 2, 674-679.

- [23] Bertrand, P. ; Martin, E. ; Guillot, M. – “Neural Networks: A Mature Technique for Protection Relays” , IEE Conference Publication N.438, 1.22.1-1.22.5, (1997).
- [24] Kasztenny, B. ; Rosolowski, E. ; Saha, M.M. ; Hillstrom, B. - “A Power Transformer Model for Investigation of Protection Schemes”, International Conference on Power Systems Transients (1995), Sept., 136-141.
- [25] Stringer, N.T. ; Lawhead, L. ; Wilkerson, T. ; Biggs, J. ; Rockefeller, G.D. - “Real-Time Transient and Performance of Transformer Differential Relays” , IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (1995) , vol.2, 1142-1150.
- [26] Chaudhary, A.K.S. ; Tam, K.S. ; Phadke, A.G. - “Protection System Representation in the Electromagnetic Transients Program” , IEEE Transactions on Power Delivery (1994), vol.9, n.2, 700-711.
- [27] Coury, D.V. ; Campos, P.E.G. ; Tavares, M.C. – “Modeling a Power Transformer for Investigation of Digital Protection Schemes” , The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, Oct., (1998).
- [28] Hertz, J. ; Krogh, A. ; Palmer, R.G. - “Introduction to the Theory of Neural Computation” , vol.1, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley Publishing Company , USA, (1991).
- [29] Braga, A.P. ; Carvalho, A.C.P.L.F. ; Ludermir, T.B. - “Fundamentos de Redes Neurais Artificiais” , XI Escola Brasileira de Computação, Brasil (1998).
- [30] “Alternative Transients Program Rule Book”, Leuven EMTP Center (LEC) (1987).
- [31] SNNS – User Manual, Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems (IPVR), University of Stuttgart (1995).