

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELÉTRICA

PATRÍCIA DE OLIVEIRA PEREIRA

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA VIA  
REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018

PATRÍCIA DE OLIVEIRA PEREIRA

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA VIA  
REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza.

Coorientador: Prof. Dr. Danilo Hernane Spatti.

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Patrícia de Oliveira Perelra

Proteção diferencial em transformadores de potência via redes neurais artificiais

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 05/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Danilo Hernane Spatti - (Coordenador)

---

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Carolina Ribeiro Rodrigues - (Membro)

## **AGRADECIMENTOS**

À todos aqueles que me acompanharam mesmo antes da vida acadêmica, professores e amigos que auxiliaram na minha formação como pessoa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, professores e servidores, que deram suporte ao meu desenvolvimento acadêmico e colaboraram durante a minha permanência na universidade.

Ao professor Silvio, pela orientação, atenção dispensada, incentivo, me acompanhando durante os desafios que superamos juntos.

Ao professor Danilo Spatti, pelas valiosas contribuições com relação a Redes Neurais Artificiais, e pela atenção concedida.

Às amizades conquistadas durante essa jornada, aprendizados, incentivos e momentos de descontração.

Aos parceiros de departamento acadêmico (DAELT) e empresa júnior (SELECT), aos quais dividimos experiências e aprendizados que vão além da universidade.

Aos meus familiares, em especial meus padrinhos Erika e Júnior, amigos, e todos aqueles presentes na minha vida, me apoiando e vibrando a cada conquista.

Aos meus amados pais, Marli e Airton, e irmão, Maurício, pelo amor, apoio, incentivo, compreensão, paciência e esforço. Esse título é para vocês!

Em principal, à Deus, pela minha vida, à Jesus Cristo, por sempre me amparar, e à Nossa senhora, por interceder por mim, meus pensamentos e atitudes.

*“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes.”*

*(Isaac Newton)*

## RESUMO

PEREIRA, P.O. **Proteção diferencial em transformadores de potência via redes neurais artificiais**. 2018. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.

A presente pesquisa trata-se de um estudo sobre a proteção diferencial em transformadores de potência, via redes neurais. Essa pesquisa tem como objetivo geral, identificar faltas internas e externas de um transformador de potência, em diversas condições de operação, utilizando redes neurais artificiais (RNA). Utilizou-se o *software ATPDraw* com o objetivo de modelar e analisar o comportamento de um transformador de potência de 25MVA diante de diversas condições de operações como: regime permanente, faltas internas entre fase-terra no primário do transformador e faltas próximo a carga. Dentre as condições evidenciadas, destacam-se: situações de faltas internas, faltas externas, regime permanente. Implementou-se no *Matlab*, uma rede RNA, com o objetivo de classificar as condições de operações simuladas. A arquitetura de RNA implementada foi uma *Rede FeedForward* de camadas múltiplas, a *Perceptron* multicamadas. A pesquisa constatou que utilizando-se os dados de simulações geradas no *ATPDraw* como dados de entrada para a RNA, obteve-se resultados satisfatórios, em que o algoritmo classificou corretamente uma porcentagem considerável de amostras, mostrando-se um possível método alternativo de proteção diferencial aos algoritmos convencionais.

Palavras-chave: Transformador de potência. Proteção diferencial. *ATPDraw*. Redes neurais artificiais. *Perceptron* multicamadas.

## ABSTRACT

PEREIRA, P.O. **Differential protection in power transformers using artificial neural networks**. 2018. 90f. Course Completion Work (Graduation) – Superior Course in Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

The present research is a study about the differential protection in power transformers, using neural networks. This research has as general objective, to identify internal and external faults of a power transformer, in several operating conditions, using artificial neural networks (RNA). The ATPDraw software was used to model and analyze the behavior of a 25MVA power transformer in a variety of operating conditions such as: permanent regime, internal phase-to-earth faults in the primary of the transformer and near-load faults. Among the highlighted conditions, the following stand out: situations of internal faults, external faults, permanent regime. An RNA network was implemented in Matlab, in order to classify the conditions of simulated operations. The implemented RNA architecture was a multi-layer FeedForward Network, the Multilayer Perceptron. The research found that using the simulation data generated in ATPDraw as input data for RNA, satisfactory results were obtained, in which the algorithm correctly classified a considerable percentage of samples, showing a possible alternative method of differential protection to conventional algorithms.

Keywords: Power transformers. Differential protection. ATPDraw. Artificial Neural Networks. Multilayer Perceptron.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SUBSISTEMA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	24
FIGURA 2 – (A) ESQUEMA DE CONDIÇÃO NORMAL DE OPERAÇÃO (B) ESQUEMA DE FALTA INTERNA.....	28
FIGURA 3 – ESQUEMA DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	28
FIGURA 4 – ESQUEMA DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL PERCENTUAL.....	30
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DA OPERAÇÃO DA FUNÇÃO 87T.....	31
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DE REDES <i>FEEDFORWARD</i> DE CAMADA SIMPLES.....	34
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DE REDES <i>FEEDFORWARD</i> DE CAMADAS MÚLTIPLAS .....	35
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE REDES RECORRENTES.....	35
FIGURA 9 – MODELO DE NEURÔNIO ARTIFICIAL PROPOSTO POR McCULLOCH & PITTS.....	36
FIGURA 10 – FUNÇÃO LINEAR (PURELIN).....	39
FIGURA 11 – FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO TIPO LOGÍSTICA (LOGSIG).....	39
FIGURA 12 – FUNÇÃO DE ATIVAÇÃO TIPO TANGENTE HIPERBÓLICA (TANSIG).....	40
FIGURA 13 – INTERFACE DO PROGRAMA <i>ATPDraw</i> .....	42
FIGURA 14 – CIRCUITO ELÉTRICO E PARÂMETROS DE COMPONENTES.	43
FIGURA 15 – UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO “ <i>HELP</i> ” PARA A FONTE DE CORRENTE ALTERNADA .....	43
FIGURA 16 – CONFIGURAÇÕES <i>ATP SETTINGS</i> .....	44
FIGURA 17 – <i>STARTUP</i> DO PROJETO.....	45
FIGURA 18 – <i>PLOTXY</i> .....	46
FIGURA 19 – RESPOSTA GRÁFICA DA CORRENTE MEDIDA PELO AMPERÍMETRO.....	46
FIGURA 20 – SISTEMA ELÉTRICO MODELADO.....	47
FIGURA 21 – TRANSFORMADOR PRINCIPAL UTILIZADO NO <i>ATP</i> .....	48



FIGURA 22 – CONEXÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	50
FIGURA 23 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE ALTA NA SITUAÇÃO DE 8MVA.....	51
FIGURA 24 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE BAIXA NA SITUAÇÃO DE 8MVA .....	51
FIGURA 25 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE ALTA – FALTA EM 0°, RESISTÊNCIA DE 0,001 E ENROLAMENTO EM 50% .....	52
FIGURA 26 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE BAIXA – FALTA EM 0°, RESISTÊNCIA DE 0,001 E ENROLAMENTO EM 50% .....	53
FIGURA 27 – SITUAÇÃO DE FALTA ENTRE O TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA E O TC2.....	53
FIGURA 28 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE ALTA - FALTA EM 90°, RESISTÊNCIA DE 0,001.....	54
FIGURA 29 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE BAIXA - FALTA EM 90°, RESISTÊNCIA DE 0,001.....	55
FIGURA 30 – SITUAÇÃO DE FALTA EXTERNA APLICADA APÓS O TC2.....	55
FIGURA 31 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE ALTA - FALTA EM 0°, RESISTÊNCIA DE 0,001.....	57
FIGURA 32 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE BAIXA - FALTA EM 0°, RESISTÊNCIA DE 0,001.....	57
FIGURA 33 – SITUAÇÃO DE FALTA PRÓXIMA À CARGA.....	58
FIGURA 34 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE ALTA - FALTA EM 90°, RESISTÊNCIA DE 5.....	59
FIGURA 35 – CORRENTE DO SECUNDÁRIO DO TC DE BAIXA - FALTA EM 90°, RESISTÊNCIA DE 5.....	59
FIGURA 36 – FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO.....	60
FIGURA 37 – EXEMPLO DE JANELAMENTO REALIZADO NOS DADOS DA OSCILOGRAFIA.....	62
FIGURA 38 – PARTE DA MATRIZ 7920X12 GERADA APÓS COMPILAÇÃO DOS DADOS GERADOS.....	63
FIGURA 39 – PARTE DA MATRIZ DE DADOS NORMALIZADOS.....	63
FIGURA 40 – PARTE DA MATRIZ COM A INCLUSÃO DA COLUNA DESEJADO.....	63

FIGURA 41 – PARTE DA MATRIZ COM AMOSTRAS EMBARALHADAS.....	64
FIGURA 42 – MATRIZ CONFUSÃO .....	65
FIGURA 43 – <i>NEURAL NETWORK TRAINING</i> TOPOLOGIA 1.....	68
FIGURA 44 - CURVA DE ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (EQM) <i>VERSUS</i> NÚMERO DE ÉPOCAS TOPOLOGIA 1.....	68
FIGURA 45 – MATRIZ CONFUSÃO REFERENTE AOS RESULTADOS DE TREINAMENTO TOPOLOGIA 1.....	69
FIGURA 46 – MATRIZ CONFUSÃO REFERENTE AOS RESULTADOS DE TESTE TOPOLOGIA 1.....	70
FIGURA 47 – <i>NEURAL NETWORK TRAINING</i> TOPOLOGIA CANDIDATA 2.....	72
FIGURA 48 – MATRIZ CONFUSÃO – TREINAMENTO E TESTE TOPOLOGIA CANDIDATA 2.....	73
FIGURA 49 – <i>NEURAL NETWORK TRAINING</i> TOPOLOGIA CANDIDATA 3.....	74
FIGURA 50 – MATRIZ CONFUSÃO – TREINAMENTO E TESTE TOPOLOGIA CANDIDATA 3.....	75
FIGURA 51 – <i>NEURAL NETWORK TRAINING</i> TOPOLOGIA CANDIDATA 4.....	76
FIGURA 52 – MATRIZ CONFUSÃO – TREINAMENTO E TESTE TOPOLOGIA CANDIDATA 4.....	77
FIGURA 53 – <i>NEURAL NETWORK TRAINING</i> TOPOLOGIA CANDIDATA 5.....	78
FIGURA 54 – MATRIZ CONFUSÃO – TREINAMENTO E TESTE TOPOLOGIA CANDIDATA 5.....	79

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESTATÍSTICA DE FALTA PARA ALGUNS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA.....	19
TABELA 2 – VALORES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	20
TABELA 3 – VALORES DE AUTOTRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	20
TABELA 4 – VALORES DE TRANSFORMADORES MOFOFÁSICOS.....	20
TABELA 5 – VALORES DE AUTOTRANSFORMADORES MONOFÁSICOS....	21
TABELA 6 – MATRIZ DAS CONDIÇÕES DE FALTAS.....	62
TABELA 7 – TOPOLOGIAS CANDIDATAS.....	64

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CONJUNTOS DE PROTEÇÃO QUE O TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA DEVE DISPOR.....	27
QUADRO 2 – CARACTERÍSTICAS RELEVANTES ENVOLVIDAS COM A APLICAÇÃO DE RNAs.....	33
QUADRO 3 – DIVISÃO DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO PARA A APLICAÇÃO DE FALTAS INTERNAS.....	49
QUADRO 4 – COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DOS CASOS DE REGIME PERMANENTE.....	51
QUADRO 5 – COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DOS CASOS DE FALTAS INTERNAS ENTRE FASE-TERRA.....	52
QUADRO 6 – COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DOS CASOS DE FALTAS ENTRE O TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA E O TC2.....	54
QUADRO 7 – COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DOS CASOS DE FALTAS APLICADAS APÓS O TC2.....	56
QUADRO 8 – COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS UTILIZADOS NA GERAÇÃO DOS CASOS DE FALTAS PRÓXIMO À CARGA.....	58

## LISTA DE SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
ONS	Operador Nacional de Sistemas elétricos
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
ATP	Alternative Transient Program
RNA	Rede Neural Artificial
PMC	<i>Perceptron Multicamadas</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

N1	Número de espiras do enrolamento primário do transformador protegido
N2	Número de espiras do enrolamento secundário do transformador protegido
N1:N2	Relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário do transformador protegido
$n_1$ e $n_2$	Número de espiras dos enrolamentos dos TCs
1:n <sub>1</sub> e 1:n <sub>2</sub>	Relação de espiras entre os ramos e os TCs
$e_{1p}$ e $e_{1s}$	Tensão do primário e secundário do transformador protegido
$i_{1p}$ e $i_{2p}$	Correntes primárias dos TCs
$i_{1s}$ e $i_{2s}$	Correntes secundárias dos TCs
$i_d$	Corrente diferencial
R	Relé
Res	Bobina de retenção
Op	Bobina de operação
$I_{res}$	Corrente de restrição
$\vec{I}_1$ e $\vec{I}_2$	Correntes oriundas do primário e secundário dos TCs
k	Fator de compensação que assume valores entre 0,5 ou 1,0
max	Valor máximo entre as componentes $\vec{I}_1$ e $\vec{I}_2$
SLP	Inclinação da reta que compõe a característica
$I_{pickupmin}$	Valor mínimo da corrente de operação a qual o relé começa a ser sensibilizado
$I_u$	Operação de forma irrestrita, não leva em conta a corrente de restrição
$I_{op}$	Corrente de operação

$I_{res}$	Corrente de restrição
$x_n$	Sinal de entrada do neurônio
$w_n$	Pesos sinápticos da rede neural
$\Sigma$	Combinador linear da rede neural
$\Theta$	Limiar de ativação da rede neural
$u$	Potencial de ativação da rede neural
$g$	Função de ativação da rede neural
$y$	Sinal de saída da rede neural
$\beta$	Parâmetro de excentricidade
Purelin	Função linear
Logsig	Função logística
Tansig	Função tangente hiperbólica
<i>deltaT</i>	Intervalo dos cálculos de precisão do traçado da curva de análise
<i>Tmax</i>	Tempo máximo de simulação
<i>Xopt</i>	Determina qual unidade de medida para a indutância será adotada
<i>Copt</i>	Determina qual unidade de medida para a capacitância será adotada
<i>EPSILN</i>	Tolerância próxima de zero usada para testar a singularidade das matrizes de coeficientes reais
LIS	Mostra modelagem em forma de linhas de comando
PL4	Apresenta os resultados obtidos na simulação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.1.1 Objetivo geral.....	23
1.1.2 Objetivos específicos.....	23
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>24</b>
2.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	24
2.1.1 Relés de proteção.....	25
2.2. PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	26
2.2.1 O relé diferencial percentual.....	28
2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	32
2.3.1 Introdução.....	32
2.3.2 Arquitetura, topologia e treinamento da RNA.....	33
2.3.2.1 Arquitetura.....	33
2.3.2.1.1 Neurônio artificial.....	35
2.3.2.2 Topologia.....	37
2.3.2.3 Treinamento.....	37
2.3.3 <i>Perceptron</i> multicamadas.....	38
2.3.4 Aplicações.....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 <i>ATPDRAW</i> .....	41
3.1.1 Interface <i>ATPDraw</i> .....	41
3.1.2 Sistema exemplo.....	42



3.1.2.1 Executando simulação do exemplo.....	45
3.2 SISTEMA ELÉTRICO MODELADO.....	47
3.2.1 Modelagem do transformador de potência.....	48
3.2.2 Transformadores de corrente.....	49
3.3 SITUAÇÕES SIMULADAS.....	50
3.3.2 Regime permanente.....	50
3.3.3 Faltas internas entre a fase-terra no primário do transformador de potência.....	52
3.3.4 Faltas entre o transformador de potência e o TC2.....	53
3.3.5 Faltas externas aplicadas após o TC2.....	55
3.3.6 Faltas próximo a carga.....	57
3.4 FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO.....	60
3.4.1 Banco de dados.....	61
3.4.1.1 Geração de casos no ATP.....	61
3.4.1.2 Processamento de dados no Matlab.....	61
3.4.1.3 Definição da RNA.....	64
3.4.1.4 Apresentação dos resultados.....	65
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
4.1 MELHOR TOPOLOGIA.....	67
4.1.1 Topologia 1.....	67
4.2 TOPOLOGIAS CANDIDATAS.....	71
4.2.1 Topologia 2.....	71
4.2.2 Topologia 3.....	74
4.2.3 Topologia 4.....	76

4.2.4 Topologia 5.....	78
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE A – Dados de entrada do programa ATP.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico em geral é complexo, envolvendo interligações entre sistemas e equipamentos, cuja finalidade é o fornecimento da energia elétrica. Dentre estes equipamentos, têm-se: geradores, transformadores, linhas de transmissão, entre outros. No Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica são as centrais hidrelétricas, dispondo-se de grandes centros geradores distantes dos centros urbanos e dos principais consumidores, necessitando, portanto, de extensas linhas para a transmissão da energia. (STEVENSON, 1986)

A transmissão é responsável pela condução de energia, desde sua geração até distribuição aos consumidores, havendo interligação entre outros sistemas de transmissão, sendo necessária a mudança de tensão durante esse processo. O equipamento conectado ao longo do sistema de transmissão, que é responsável por elevar ou abaixar o nível de tensão da rede é o transformador de potência, foco deste trabalho. (STEVENSON, 1986)

Segundo Paithankar e Bhide (2004), os transformadores de potência são equipamentos de suma importância e indispensáveis para o sistema elétrico de potência (SEP), apresentando uma taxa de falta na ordem de 10%, quando comparado a todos os equipamentos pertencentes aos SEP, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1 – Estatística de falta para alguns equipamentos do sistema**

<b>Equipamento</b>	<b>Probabilidade de falta [%]</b>
Linhas de transmissão	50,0
Disjuntores	12,0
Transformadores de corrente, equipamentos de controle e etc	12,0
Transformadores	10,0
Cabos subterrâneos	9,0
Geradores	7,0
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>

**Fonte: (Paithankar e Bhide, 2004).**

Para grandes potências, o transformador passa a ser robusto e de alto custo, conforme pode-se ver nas Tabelas 2 a 5, e, caso ocorra algum dano, não é possível realizar sua substituição imediata. Portanto, é considerável que a proteção do mesmo seja adequada e confiável, assegurando sua desconexão, caso esteja sujeito a qualquer defeito interno. (FRONTIN, 2013)

**Tabela 2 – Valores de transformadores trifásicos**

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Potência (MVA)</b>	<b>Preço (R\$)</b>
230/69	100	5.040.000,00
345/69	100	7.340.000,00
500/138	100	9.062.000,00
500/345	100	10.069.000,00

**Fonte: (Frontin, 2013).**

**Tabela 3 – Valores de autotransformadores trifásicos**

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Potência (MVA)</b>	<b>Preço (R\$)</b>
230/69	100	4.441.000,00
345/69	100	5.175.000,00
500/138	100	6.173.000,00
500/345	100	6.859.000,00

**Fonte: (Frontin, 2013).**

**Tabela 4 – Valores de transformadores monofásicos**

<b>Tensão (kV)</b>	<b>Potência (MVA)</b>	<b>Preço (R\$)</b>
230/69	100	4.280.000,00
345/69	100	4.914.000,00
500/138	100	5.850.000,00
500/345	100	6.500.000,00
750/500	100	7.738.000,00

**Fonte: (Frontin, 2013).**

Tabela 5 – Valores de autotransformadores monofásicos

Tensão (kV)	Potência (MVA)	Preço (R\$)
230/69	100	2.888.000,00
345/69	100	3.881.000,00
500/138	100	5.597.000,00
500/345	100	6.219.000,00
750/500	100	8.048.000,00

Fonte: (Frontin, 2013)

Além de falta interna, como cita Tavares (2013), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) define como causas de desligamentos forçados de transformadores os seguintes itens:

- Interno: falha na parte ativa (núcleo, enrolamentos, blindagens, ligações, isolamento) do transformador (ou de seus equipamentos, tais como disjuntores, transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TPs), para-raios, etc.
- Secundário: falha nas partes complementares dos transformadores, como painéis, fiações, relés, serviços auxiliares, etc;
- Externo: falha em outros componentes, mas que resulta na correta atuação da proteção do transformador;
- Operacional: falha por problemas no sistema de potência, como oscilações, sobretensões e rejeição de carga.

O tipo de proteção mais adequada aos transformadores de potência, e que será abordada neste trabalho, é a proteção diferencial. Justifica-se essa escolha o fato de que, dentre as diversas proteções de natureza elétrica aplicáveis aos transformadores de potência, a proteção diferencial de corrente (87T) é a mais utilizada, uma vez que permite a discriminação entre faltas internas de outras condições operativas, além da tomada de decisão de abertura de um disjuntor ou disjuntores associados (Blackburn e Domin, 2007). Embora esta técnica possa ser utilizada em qualquer transformador, sua aplicação é comumente observada em transformadores com potência nominal próxima ou superior a 10MVA (IEEE Std. C37.91, 2008).

Para a modelagem do transformador de potência, utilizou-se o *software* de simulação ATP (*Alternative Transient Program*) e seu aplicativo de apoio ATPDraw, afim de realizar estudos de transitórios eletromagnéticos.

Objetivando melhorar e resolver problemas relativo à proteção de sistemas, nos últimos anos, um volume razoável de publicações utilizando ferramentas inteligentes se fizeram presentes na literatura. Algumas das técnicas inteligentes são: Agentes e Algoritmos Genéticos, Lógica *Fuzzy*, Redes Neurais Artificiais (RNAs) (COURY, 2007, p. 267).

A RNA é o principal objeto de estudo para classificação e reconhecimento de padrões. Cita-se adiante, trabalhos que utilizaram-se de RNA em problemas que relacionam transformadores: WANG; BUTLER (2001) aplicaram RNA na modelagem dos efeitos de curto-circuito nos enrolamentos de transformadores de distribuição; FREITAS; SILVA; SOUZA (2002), realizaram um trabalho com o tema “Aplicação de Redes Neurais na Estimação da Temperatura Interna de Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo”; e SEGATTO (2005) obteve o título de doutor apresentando uma tese cujo o tema é “Relé diferencial para transformadores de potência utilizando ferramentas inteligentes”.

De acordo com Sárközy (1999), as Redes Neurais Artificiais possuem capacidade de aprendizado para diferentes parâmetros de entrada tornando-as capazes de resolver problemas muito complexos em diversas áreas de conhecimento.

Portanto, para o trabalho em questão, propõem-se a utilização de RNA como inteligência computacional a ser utilizada de maneira alternativa, para reconhecimento e classificação de faltas internas e externas em transformadores de potência.

Posteriormente, serão apresentadas ao leitor diversas simulações de situações que caracterizam faltas internas, faltas externas, próximas ao transformador, linha de distribuição e carga, e regime permanente, as quais compuseram um banco de dados aplicados em RNAs com o propósito de permitir a observação do comportamento da rede empregada, objetivo final do trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral, identificar faltas internas e externas de um transformador de potência, em diversas condições de operação, utilizando redes neurais artificiais.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Contextualizar conceitos relacionados às condições de operação de um transformador de potência, proteção diferencial em transformadores de potência e RNAs.
- Modelar um sistema de potência no *software* de simulação *ATPDraw*.
- Realizar simulações no *ATPDraw*, e analisar o comportamento do transformador de potência diante das condições de operação.
- Implementar no *software MatLab*, RNAs aplicada à proteção diferencial do transformador de potência, baseando-se nas condições de operação obtidas via inúmeras simulações realizadas no *ATPDraw*.
- Identificar faltas em diversas condições de operação de um transformador de potência, utilizando RNAs.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

“Em oposição ao propósito de garantir economicamente a qualidade do serviço prestado e assegurar uma vida útil razoável às instalações, as concessionárias defrontam-se com perturbações e anomalias de funcionamento que afetam as redes elétricas e seus órgãos de controle.” (CAMINHA, 1977, p. 3).

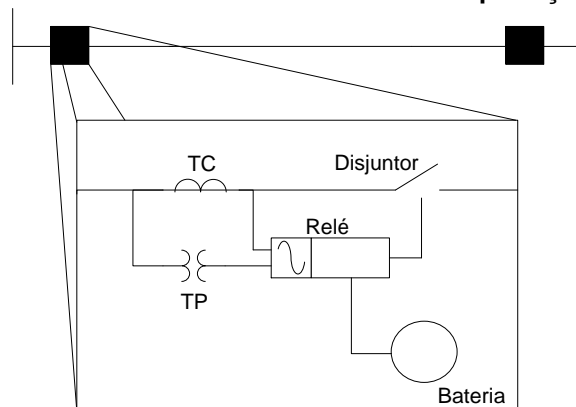
Dessa forma, a proteção dos sistemas deve garantir, caso uma falta ocorra, que o equipamento faltoso seja isolado, mantendo o sistema e materiais da rede sem danos e em pleno funcionamento. Segundo Hewitson (2004, p. 2), a proteção de sistemas possui três principais funções, sendo elas:

1. Proteger todo o sistema para manter a continuidade do abastecimento.
2. Minimizar os custos de danos e manutenção no equipamento onde se localizou a falta.
3. Garantir a segurança das pessoas envolvidas.

Coury (2007, p.19) ressalta que uma das principais características desejadas para o sistema de proteção é a velocidade no tempo de resposta, sendo ela automática, rápida e precisa, causando o mínimo de interrupção ao sistema de energia.

Para o processo de remoção de uma falta no SEP, existe um subsistema do sistema de proteção, apresentado na Figura 1.

**Figura 1 – Subsistema de um sistema de proteção**



**Fonte: Adaptada, Coury, 2007**



Como apresentado por Coury (2007, p.22), esse subsistema consiste de disjuntores (DJ), transdutores (transformadores de corrente e de potencial), relé e um banco ou conjunto de baterias. O disjuntor tem como função isolar o componente ou circuito sob falta, essa ação é feita quando relé fecha os contatos entre o banco de baterias e a bobina de ação do disjuntor. A função do banco de baterias é prover alimentação ao sistema de proteção, sendo independente da linha ou do sistema faltoso. Já os transdutores, são responsáveis por reduzir a magnitude das grandezas envolvidas (correntes e tensões dos sistemas de energia) para níveis aceitáveis aos diversos equipamentos do sistema.

Contudo, os relés são responsáveis pela parte lógica da filosofia de proteção, respondendo aos valores de tensão e corrente, previamente medidos, enviando ou não, um sinal de *trip* (sinal de desligamento enviado por um relé) aos disjuntores, para permitir a sua abertura na presença de situações de falta.

### 2.1.1 Relés de proteção

O sistema de proteção do SEP é usualmente associado aos relés, sendo estes, equipamentos com a função de remover de serviço algum elemento/componente que está operando de maneira inadequada, caracterizando uma situação de falta. (COURY, 2007, p. 23).

Os relés de proteção possuem diversas características e classificações que os particularizam para uma aplicação adequada, em um devido sistema. Como mostrado por Mamede (2005, p. 266), as características construtivas dos relés são:

- relés fluidodinâmicos;
- relés eletromagnéticos;
- relés eletrodinâmicos;
- relés de indução;
- relés térmicos;
- relés eletrônicos;
- relés digitais.

Muitas dessas classificações são dadas como ultrapassadas, já que “com a expansão do SEP, surgiu a necessidade de sistemas de proteção mais confiáveis e com alto desempenho”. (COURY, 2007, p. 2).

Conforme Coury (2007, p. 29), a maioria dos relés do SEP podem ser classificados como:

- relés de magnitude: respondem a magnitude dos valores de entrada;
- relés direcionais: são capazes de distinguir entre o fluxo de corrente em uma ou outra direção;
- relés de distância: respondem através da impedância observada entre a localização do relé e a localização da falta, obtida em função dos valores de tensão e corrente registrados;
- relés diferenciais: operam quando o vetor da diferença entre duas ou mais grandezas elétricas semelhantes excede a uma quantidade pré-determinada;
- relés com mídia de comunicação: utilizam a comunicação de informações entre localizações remotas.

Para o estudo e aplicabilidade do trabalho em questão, será utilizada a teoria de relés diferenciais como dispositivo de proteção. Mamede (2011, p. 138) cita que pelo fato dos relés diferenciais poderem estar submetidos a diferentes condições de operação (correntes de magnetização, defasamentos angulares, entre outros), eles são a mais importante forma de proteção dos transformadores de potência.

## 2.2. PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Transformadores de potência são equipamentos complexos que envolve interação de diversos componentes para garantir seu devido funcionamento e proteção (manter sua integridade e permanência de operação).

De acordo com o Operador Nacional de Sistemas Elétricos (ONS) (2010, p. 11), o transformador de potência deve dispor de três conjuntos de proteção, como descritos no Quadro 1.

**Quadro 1 – Conjuntos de proteção que o transformador de potência deve dispor.**

<b>Conjuntos de proteção</b>	<b>Descrição</b>
Proteção principal: proteção unitária ou restrita e de proteção gradativa ou irrestrita;	Proteção unitária ou restrita – Detecta e elimina as falhas do componente protegido, seletivamente e sem retardo intencional de tempo. Proteção gradativa ou irrestrita – Detecta e elimina as falhas no componente protegido, além de fornecer proteção adicional para os equipamentos adjacentes, atuando de maneira coordenada.
Proteção alternada: proteção unitária ou restrita e de proteção gradativa ou irrestrita;	Proteção alternada – De funcionamento idêntico ao da proteção principal, porém, completamente independente.
Proteção intrínseca	Proteção intrínseca – Dispositivos de proteção integrados aos equipamentos, tais como relés a gás e sensores de temperatura.

Fonte: Autoria própria.

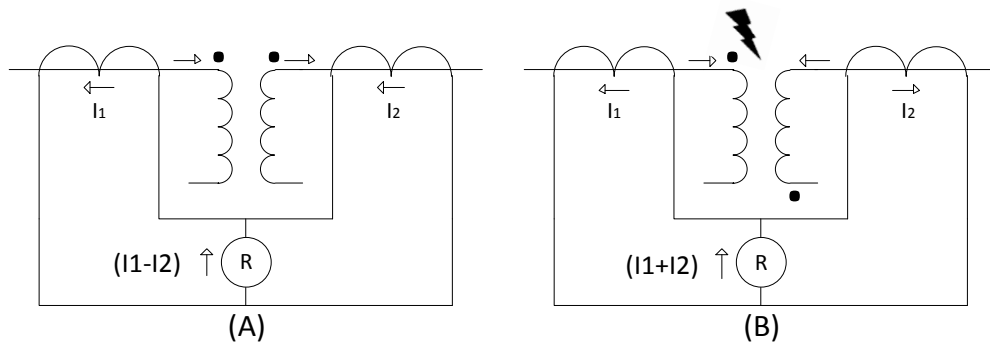
Neste contexto, será abordado o conjunto de proteção principal, e, especificamente, a proteção diferencial.

“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.” (COURY, 2007, p.109).

O trecho compreendido entre os TCs localizados no primário e secundário do transformador é protegido pela proteção diferencial e denominado zona protegida, (MAMEDE FILHO, 2013).

A Figura 2 apresenta dois exemplos de situações em que o dispositivo de proteção compara as correntes do transformador. Na Figura 2 (A), ocorre uma condição normal de operação ou até mesmo uma situação de falta externa à zona protegida, de modo que as correntes do primário e secundário irão se anular ao passarem pelo relé (R), que não atuará. Já na Figura 2 (B), ocorre uma situação de falta interna à zona protegida, onde as correntes analisadas irão se somar, fazendo com que o relé diferencial atue.

**Figura 2 – (A) Esquema de condição normal de operação (B) Esquema de falta interna**



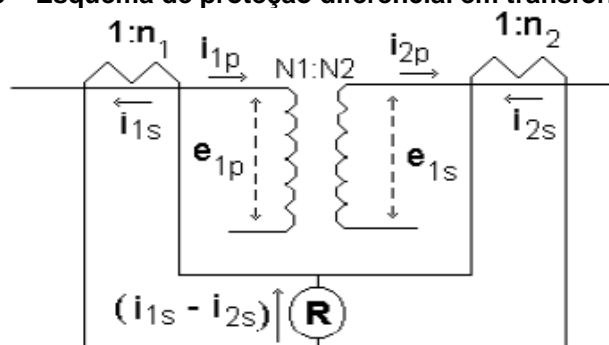
Fonte: Autoria própria.

### 2.2.1 O relé diferencial percentual

A proteção diferencial percentual (87T) atua com a lógica básica de um relé diferencial, porém como esta proteção atua sobre um transformador, e este equipamento apresenta algumas especificidades, a proteção é restritiva, ou seja, a condição necessária para a atuação da proteção não será unicamente a presença de corrente no elemento diferencial. (Mamede Filho, 2013)

A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento básico do relé de proteção diferencial, em transformadores de potência. Esse esquema consiste de um transformador de potência, e em série tanto com o enrolamento primário (N1) quanto com o enrolamento secundário (N2) do transformador, há dois transformadores de corrente, os quais monitoram as correntes passantes do transformador, a fim de disponibilizá-las ao relé diferencial.

**Figura 3 – Esquema de proteção diferencial em transformadores de potência**



Fonte: Segatto, 2008.

onde:

$N1:N2$  – relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário do transformador;

$e_{1p}$  e  $e_{1s}$  – tensão do primário e secundário do transformador protegido

$i_{1p}$  e  $i_{2p}$  – correntes primárias dos TCs

$i_{1s}$  e  $i_{2s}$  – correntes secundárias dos TCs

R – relé de proteção diferencial

As correntes obtidas pelos TCs apresentam formas de onda semelhantes às correntes do transformador protegido, respeitando a relação de transformação entre  $N1$  e  $N2$ , e  $n_1$  e  $n_2$  (enrolamento dos TCs). As relações de espiras entre os ramos e os TCs são definidas por  $1:n_1$  e  $1:n_2$ , fazendo com que  $N1n_1=N2n_2$  (Figura 3).

Os sinais de corrente  $\vec{i}_{1s}$  e  $\vec{i}_{2s}$ , que podem ser observados na equação 1, são transmitidos para o relé de proteção diferencial, que possui um ajuste de corrente diferencial pré-determinado, podendo levar o relé a atuar, em caso de ultrapassagem desse valor.

$$\vec{i}_d = \vec{i}_{1s} - \vec{i}_{2s} \quad (1)$$

Caso esses sinais de corrente sejam aproximadamente iguais, a diferença em  $i_d$  (corrente diferencial) será desprezível, ou seja, o relé considera que não há nenhum problema. Já no caso de uma falta interna ao transformador, os valores das correntes secundárias dos TCs se modificam de tal maneira que  $i_d$  fornece um valor de corrente bem maior do que o ajustado, então o relé irá atuar retirando o transformador do sistema.

Porém, não é possível descartar o aparecimento de falsas correntes diferenciais (diferentes da condição de falta), que podem sensibilizar a proteção diferencial, e assim originar uma operação incorreta.

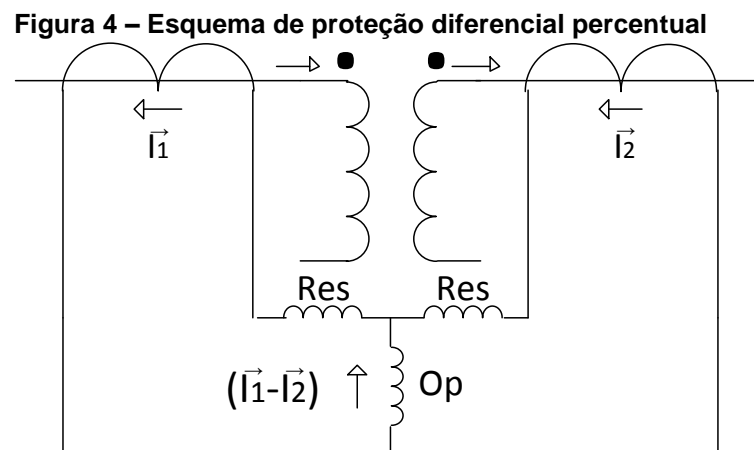
Alguns dos fatores que levam ao surgimento dessas correntes indesejadas foram citadas por Coury (2007, p. 110):

- corrente de magnetização (*inrush*): ocorre durante a energização do transformador devido à magnetização e à saturação do seu núcleo, causando correntes transitórias porém de elevadíssima amplitude;

- faltas externas próximas ao transformador: em alguns casos, origina correntes de valores elevados, podendo saturar o TC em um dos lados do transformador;
- sobre-excitação do transformador: ocorre quando o transformador está submetido a uma tensão muito superior a sua tensão nominal, ocorrendo um comportamento não linear das correntes, ocasionando em um aumento na corrente diferencial que percorre o relé.

Dessa maneira, o relé deve atuar somente para faltas internas ao transformador, permanecendo em bloqueio caso ocorra alguma das situações citadas acima, inibindo a ocorrência de erros.

A Figura 4 ilustra a operação de um relé diferencial com o conceito de bobina de retenção. Esse mecanismo faz com que o relé não seja sensibilizado por pequenas correntes diferenciais. (Segatto, 2005)



Fonte: Adaptada Segatto, 2008.

Barbosa (2010) afirma que as correntes de restrição podem ser encontradas de três formas:

$$I_{res} = k * |\vec{I}_1 - \vec{I}_2| \quad (2)$$

$$I_{res} = \max(|\vec{I}_1|, |\vec{I}_2|) \quad (3)$$

$$I_{res} = k * (|\vec{I}_1| + |\vec{I}_2|) \quad (4)$$

sendo:

Res – Bobina de retenção

Op – Bobina de operação

$I_{res}$  – corrente de restrição;

$\vec{I}_1$  e  $\vec{I}_2$  – correntes fasoriais oriundas do primário e secundário dos TCs;

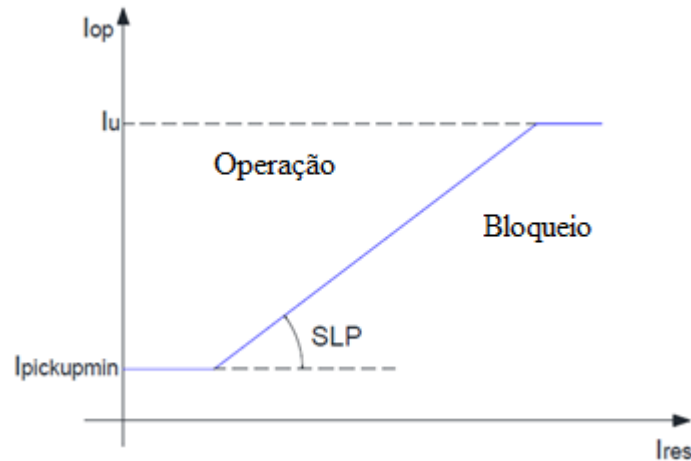
$k$  – fator de compensação que assume valores entre 0,5 ou 1,0;

$\max$  – valor máximo entre as componentes  $\vec{I}_1$  e  $\vec{I}_2$ .

$|\vec{I}_1|$  e  $|\vec{I}_2|$  – módulo das correntes fasoriais oriundas do primário e secundário dos TCs;

As zonas de operação e bloqueio da proteção diferencial podem ser vistas em um plano de correntes, conforme Figura 5. (Tavares, 2013)

**Figura 5 - Representação da operação da função 87T**



Fonte: Adaptada Tavares, 2013.

onde:

$SLP$  – inclinação da reta que compõe a característica;

$I_{pickupmin}$  – valor mínimo da corrente de operação a qual o relé começa a ser sensibilizado;

$I_u$  – operação de forma irrestrita, não leva em conta a corrente de restrição;

$I_{op}$  – corrente de operação;

$I_{res}$  – corrente de restrição;

Haverá atuação da proteção diferencial percentual (operação do relé, na parte superior da curva), caso as duas condições forem atendidas:

$$I_{op} > SLP * I_{res} \quad (5)$$

e

$$I_{op} > I_{pickupmin} \quad (6)$$

Ou se,

$$I_{op} > I_u \quad (7)$$

Mamede (2011, p. 139) atenta-se ao fato de que a proteção diferencial de um transformador de potência deve estar associada a uma proteção de sobrecorrente, alimentada por TCs independentes. O motivo é que a proteção de sobrecorrente atua para faltas externas à zona protegida (área compreendida entre os TCs instalados nos lados primário e secundário do transformador a ser protegido), tendo a função de retaguarda para falhas do relé diferencial.

Como citado anteriormente, é desejável que proteção atue de maneira rápida, portanto “o tempo total de eliminação de faltas – incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores do transformador, pelas proteções unitárias ou restritas – não deve exceder a 120 ms.” (ONS, 2010, p. 11).

## 2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

### 2.3.1 Introdução

Redes neurais artificiais (RNAs) são modelos computacionais que consistem em imitar o cérebro humano, os neurônios. “Pode-se definir uma RNA como um sistema constituído por elementos de processamento interconectados (os neurônios), os quais estão dispostos em camadas e são responsáveis pela não linearidade da rede” (GALVÃO, 1999 p.19)

Segundo Silva et al (2010, p.24) as características mais relevantes, envolvidas com aplicação de RNA, constam no Quadro 2.



**Quadro 2 – Características relevantes envolvidas com a aplicação de RNAs.**

Adaptação por experiência	Os parâmetros internos da rede são ajustados a partir da apresentação sucessiva de exemplos relacionados ao comportamento do processo
Capacidade de aprendizado	A rede é capaz de extrair relações existentes entre as diversas variáveis que compõem a aplicação
Habilidade de generalização	Após o processo de treinamento, a rede é capaz de generalizar o conhecimento adquirido
Organização de dados	A rede é capaz de realizar a sua organização interna visando possibilitar o agrupamento de padrões que apresentam particularidades em comum
Tolerância a falhas	Devido ao elevado nível de interconexões, a rede neural torna-se um sistema tolerante a falhas quando parte de sua estrutura interna é sensivelmente corrompida
Armazenamento distribuído	O conhecimento é realizado de forma distribuída entre as diversas sinapses de seus neurônios artificiais
Facilidade de prototipagem	A implementação das arquiteturas neurais pode ser facilmente prototipada em <i>hardware</i> e <i>software</i> , pois após o treinamento, seus resultados são normalmente obtidos por algumas operações matemáticas elementares

**Fonte: A autoria própria.**

### 2.3.2 Arquitetura, topologia e treinamento da RNA

Antes de implementar o algoritmo relacionado a rede, é primeiramente necessário estabelecer qual a arquitetura, topologia e o tipo de treinamento que serão utilizados, porém, essa análise depende da complexidade do problema no qual a rede será aplicada.

#### 2.3.2.1 Arquitetura

A estrutura de interligação de uma RNA é constituída basicamente por camadas, uma camada de entrada (recebe os dados), uma ou várias camadas

intermediárias (extrai características associadas ao sistema avaliado) e uma camada de saída (produção e apresentação dos resultados finais).

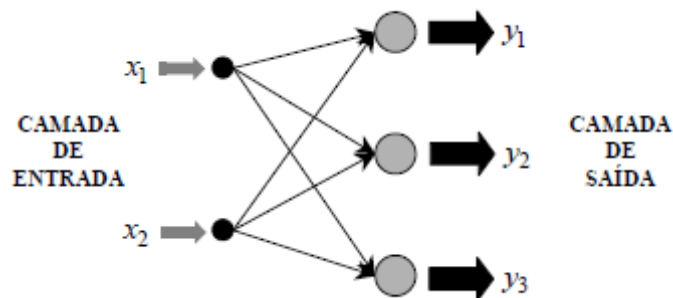
Essas camadas, exceto a de entrada, são constituídas por neurônios, responsáveis por processar as informações recebidas, e entre eles existem as conexões, responsáveis por fazer a conduções dos sinais recebidos pela RNA.

Conforme mencionado, “uma rede neural é constituída de neurônios interligados. A forma como estes se conectam, define a arquitetura da rede” (MORETO, 2005, p.65).

Com relação à arquitetura das RNAs, tem-se (SILVA ET AL, 2010):

- *Redes FeedForward* de camadas simples: possuem uma camada de entrada, uma única camada de neurônios, que é a própria camada de saída. Neste tipo de arquitetura tem-se a rede Perceptron e Adaline.

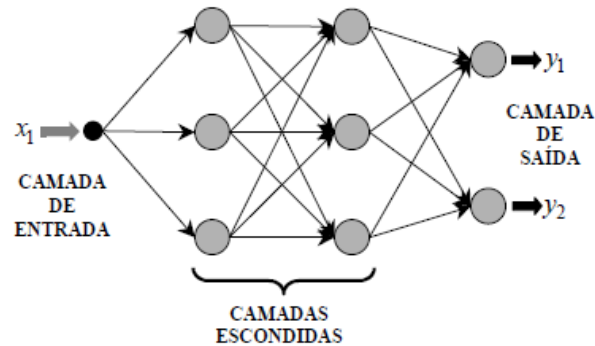
**Figura 6 – Representação de redes *FeedForward* de camada simples**



**Fonte: Tardivo, 2012**

- *Redes FeedForward* de camadas múltiplas: distingue-se da arquitetura anterior por possuir uma ou mais camadas neurais (intermediárias/escondidas). A quantidade de camadas escondidas variam de acordo com a complexidade do problema. Neste tipo de arquitetura tem-se a rede Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC) e *Radial Basis Function* (RBF).

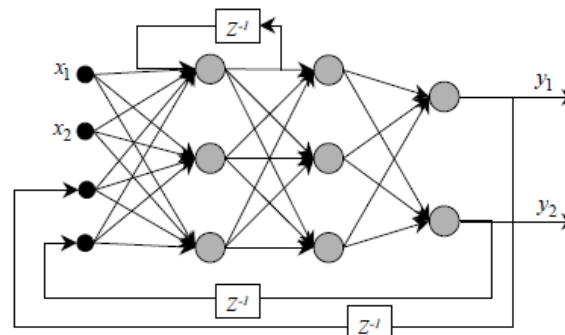
**Figura 7 - Representação de redes *FeedForward* de camadas múltiplas**



Fonte: Tardivo, 2012

- **Redes recorrentes:** trata-se das redes nas quais os neurônios de saída são realimentados como sinais de entrada para outros neurônios. Qualificam-se para o processamento dinâmico de informação. Neste tipo de arquitetura tem-se as redes *Hopfield* e PMC com realimentação.

**Figura 8 - Representação de redes recorrentes**

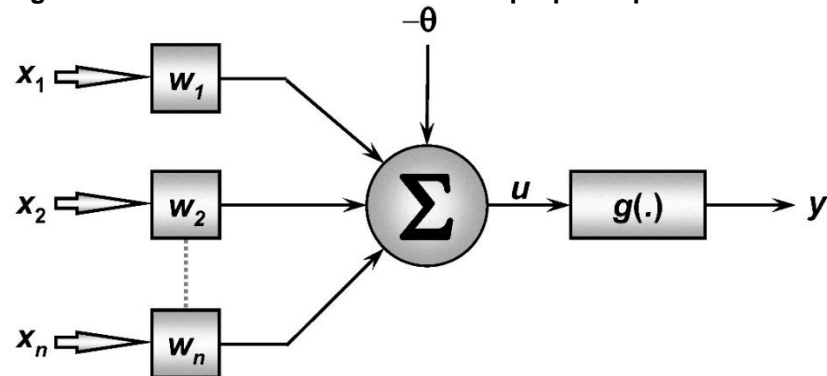


Fonte: Tardivo, 2012

### 2.3.2.1.1 Neurônio artificial

A Figura 9 representa um neurônio artificial, bem como os elementos que o constituem.

Figura 9 – Modelo de neurônio artificial proposto por McCulloch & Pitts



Fonte: Silva et al, 2010

Silva et al (2010, p.33) destaca que o modelo de RNA mais simples e ainda mais utilizado, é o modelo proposto por McCulloch & Pitts em 1943, e ainda, que o neurônio artificial é constituído por sete elementos básicos, sendo eles:

- Sinais de entrada ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )

Advindos do meio externo e que representam os valores assumidos pelas variáveis de uma aplicação específica.

- Pesos sinápticos ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ )

Valores que servirão para ponderar cada uma das variáveis de entrada da rede.

- Combinador linear ( $\Sigma$ )

Sua função é agregar todos os sinais de entrada que foram ponderados a fim de produzir um valor de potencial ativação.

- Limiar de ativação ( $\theta$ )

Variável que especifica qual será o nível apropriado para que o resultado produzido possa gerar um valor de saída.

- Potencial de ativação ( $u$ )

Dado pela equação 8:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i - \theta \quad (8)$$

Se  $u \geq \theta$ , o neurônio produz um potencial excitatório (potencial de ação), caso contrário, o potencial será inibitório (potencial de repouso).

- Função de ativação (g)

Limita a saída do neurônio dentro de um intervalo de valores razoáveis a serem assumidos, como:

- Binário: 0 e 1;
- Bipolares: -1 e 1;
- Reais.

- Sinal de saída (y)

Valor final produzido pelo neurônio em relação a um determinado conjunto de sinais de entrada.

$$y = g(u) \quad (9)$$

### 2.3.2.2 Topologia

Segundo Silva et al (2010, p.45) a topologia pode ser definida como as diferentes formas de composições estruturais que a rede poderá assumir, diante de uma determinada arquitetura.

Galvão (1999, p.61) complementa dizendo que a definição da topologia da rede, depende de fatores como a quantidade de dados para treinamento, assim como a relação e quantidade dos neurônios de entrada e saída.

Exemplos de topologia:

- Topologia 1 – 10 neurônios na camada escondida.
- Topologia 2 – 10 neurônios na primeira camada escondida e 5 neurônios na segunda.
- Topologia 3 – 20 neurônios na primeira camada escondida e 12 neurônios na segunda.

### 2.3.2.3 Treinamento

Deve-se estabelecer também, o treinamento, que segundo Silva et al (2010, p.45), é o processo de ajuste dos pesos e limiares dos neurônios, após um conjunto de passos ordenados. Tal processo de ajuste é definido também como algoritmo de aprendizagem, sintonizando a rede para que os valores obtidos sejam próximos aos desejados.

Tem-se dois tipos de algoritmo de aprendizagem, supervisionado e não-supervisionado.

- Treinamento supervisionado:

Trata-se do treinamento em que os dados são apresentados a rede de forma que cada amostra dos sinais de entrada possua sua saída desejada.

- Treinamento não-supervisionado:

Diferencia-se do treinamento supervisionado pelo fato de que as saídas desejadas são inexistentes. Dessa forma, a rede deve agrupar as amostras de treinamento com características comuns.

E ambos podem ser realizados de forma online, onde os ajustes nos pesos limiares dos neurônios são efetivados apenas após a apresentação de todo conjunto de treinamento, ou off-line, onde os ajustes são efetuados após a apresentação de cada amostra de treinamento.

Após o treinamento, a rede está apta para generalizar soluções não conhecidas. A verificação da rede, como Galvão (1999, p.63) discorre, é feita utilizando-se os conjuntos de dados que não foram utilizados no treinamento, sendo ainda, uma amostra representativa do problema em estudo. Após o treinamento e verificação, a rede estará pronta, se tornando uma eficiente e ágil ferramenta.

### 2.3.3 *Perceptron* multicamadas

“A rede neural *Perceptron* multicamadas é uma importante classe de redes neurais. Ela é do tipo *feedforward* composta por vários neurônios do tipo McCulloch-Pitts dispostos em camadas.” (ALVES ET AL, 2013, p. 3).

“Possui, além da capacidade de abstração, a capacidade de generalização. Com isso, é capaz de classificar um padrão mesmo quando este não pertença ao conjunto de treinamento.” (STIVANELLO E GOMES, 2006, p.35)

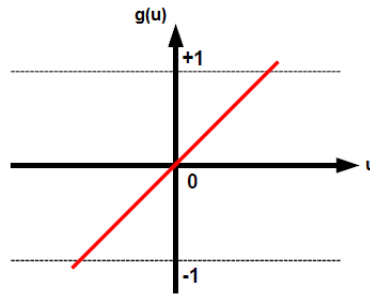
Haykin (2001) cita como vantagem da PMC o fato de sua fase de treinamento (adaptação dos pesos sinápticos) ser realizada todo em aprendizado supervisionado em modo off-line, com isso o tempo computacional na fase de previsão se torna baixo.

As funções de ativação tipicamente usadas para PMC são:

- Função linear (purelin), também conhecida como função identidade, conforme Figura 10, produz uma saída igual ao potencial de ativação ( $u$ ) do neurônio. (Claudio, 2014)

$$g(u) = u \quad (10)$$

**Figura 10 – Função linear (purelin)**

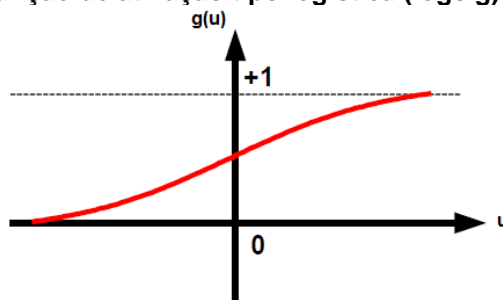


Fonte: Adaptada, Claudio, 2014

- Função logística (logsig), Figura 11, onde  $\beta$  é o parâmetro de excentricidade que define a inclinação da função, a saída do neurônio sempre assumirá saídas positivas entre 0 e 1. (Claudio, 2014)

$$g(u) = \frac{1}{1+e^{-\beta u}} \quad (11)$$

**Figura 11 – Função de ativação tipo logística (logsig)**

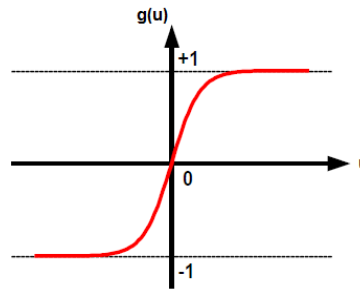


Fonte: Adaptada, Claudio, 2014

- Função tangente hiperbólica (tansig), representada na Figura 12, onde a saída do neurônio pode-se assumir valores reais negativos e positivos no domínio de -1 a 1. (Claudio, 2014)

$$g(u) = \frac{1-e^{-\beta u}}{1+e^{-\beta u}} \quad (12)$$

**Figura 12 – Função de ativação tipo tangente hiperbólica (tansig)**



**Fonte: Adaptada, Claudio, 2014**

Tanto a função logística quanto a função tangente hiperbólica são totalmente diferenciáveis. (Claudio, 2014)

#### 2.3.4 Aplicações

Pesquisas científicas demonstram que a RNA é um excelente modelo computacional para ser aplicado em problemas de engenharia, como citado: “A aplicação de RNAs na proteção de sistemas elétricos oferece uma alternativa altamente viável, uma vez que os problemas relacionados podem ser caracterizados como situações de reconhecimento de padrões.” (COURY, 2007, p.268).

Desse modo, dentre as diversas aplicações de utilização das RNAs (controle de processo, sistema de previsão, otimização de problemas, etc.), a que será devidamente estudada e aplicada para esse trabalho será o reconhecimento (classificação) de padrões, que segundo Silva et al (2010, p.28), consiste em associar uma amostra de entrada para uma das classes previamente definidas, onde a saída é um conjunto conhecido e desejado.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ATPDRAW

O *ATPDraw* trata-se de um *software* livre e derivado do ATP (*Alternative Transients Program*), *software* de simulação em transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica, que aplica o método baseado na utilização da matriz admitância de barras. (Fonseca, Leal, 2003)

Ao longo de 25 anos, o ATP passou por inúmeras modificações, sendo uma delas a codificação dos dados de entrada por meio de interface gráfica, denominada de *ATPDraw*. (Fonseca, Leal, 2003)

O programa *ATPDraw* é utilizado como passo inicial para simulação com o ATP. Com ele o usuário pode construir um circuito elétrico convencional, bastando para isso selecionar modelos pré-definidos dos principais elementos e componentes de uma rede elétrica. (Fonseca, Leal, 2003)

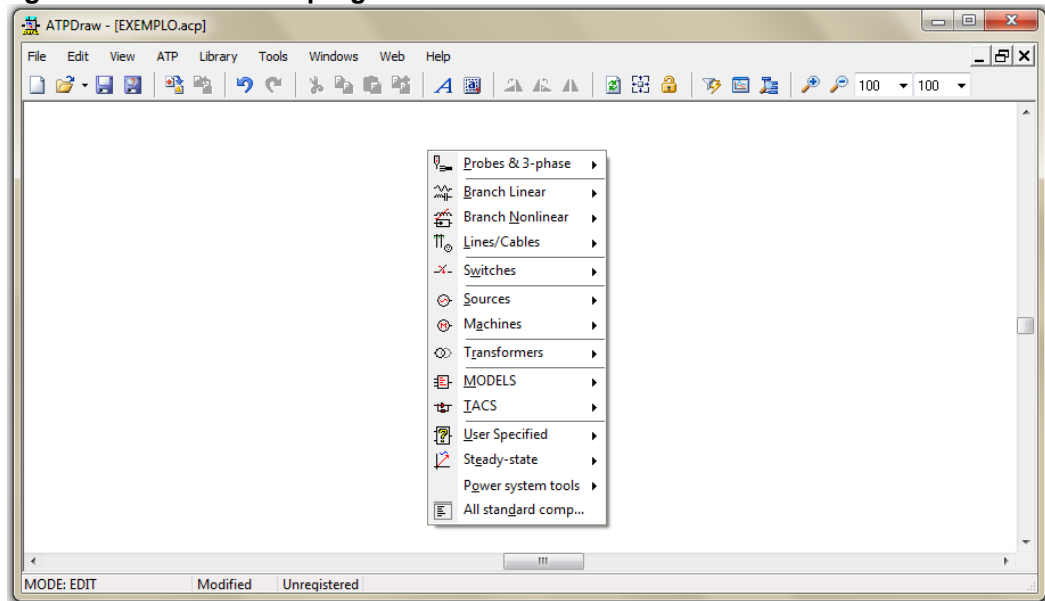
A partir do *software* de simulação computacional *ATPDraw*, modelou-se o sistema elétrico e o transformador de potência do trabalho que se lê, uma vez que “pode ser considerado um dos programas mais utilizados para a simulação de transitórios eletromagnéticos, assim como transitórios eletromecânicos de SEP” (COURY, 2007, p.165).

##### 3.1.1 Interface *ATPDraw*

A Figura 13 representa a interface do programa, onde é possível modelar sistemas elétricos.

Para escolher os dispositivos utilizados no circuito, deve-se apertar com o botão direito do mouse na parte branca da tela, sendo assim, aberta uma janela de biblioteca.

**Figura 13 – Interface do programa *ATPDraw***



**Fonte: Autoria própria.**

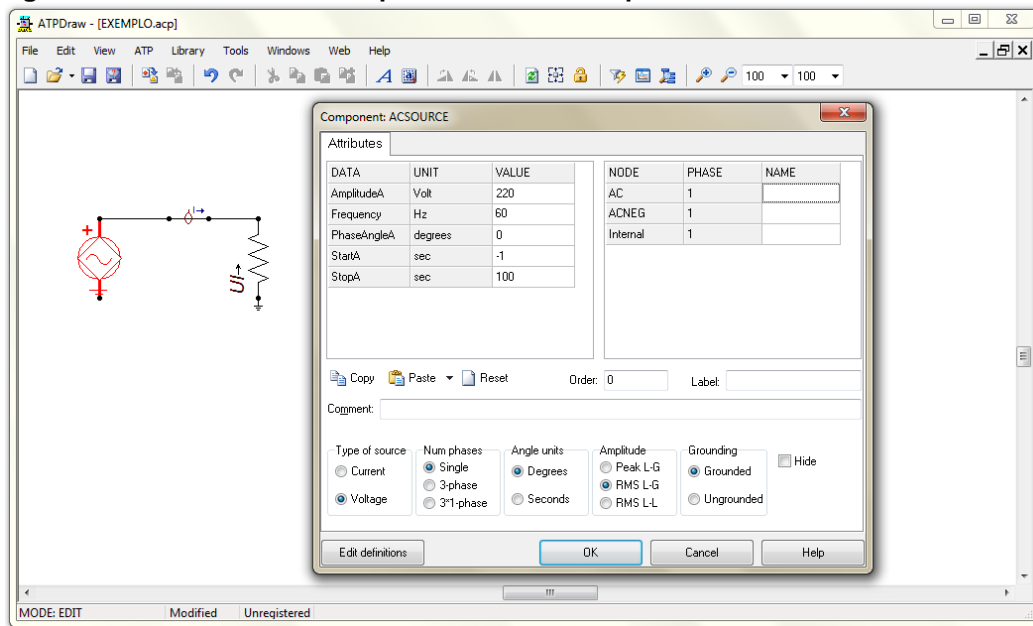
Os dispositivos devem ser escolhidos um a um, e conectados entre si, conforme modelagem do sistema. Enquanto não se especificar os parâmetros dos mesmos, o *software* mantém a cor dos componentes em vermelho.

### 3.1.2 Sistema exemplo

Como forma de exemplificar a simulação de um sistema elétrico no *ATPDraw*, foi realizado um circuito monofásico em corrente alternada (Figura 14), que contempla:

- Fonte de corrente alternada: 220V;
- Amperímetro;
- Resistência: 220  $\Omega$ .

**Figura 14 – Circuito elétrico e parâmetros de componentes**

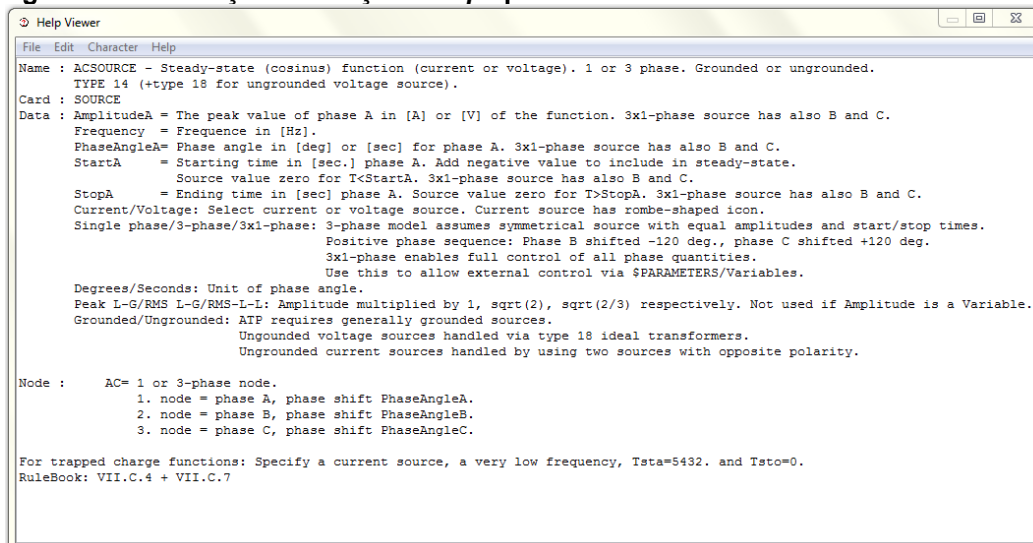


Fonte: Autoria própria.

A caixa de diálogo para configuração dos parâmetros de cada componente abre-se dando dois cliques em cima do mesmo, ou clicando-se com o botão direito.

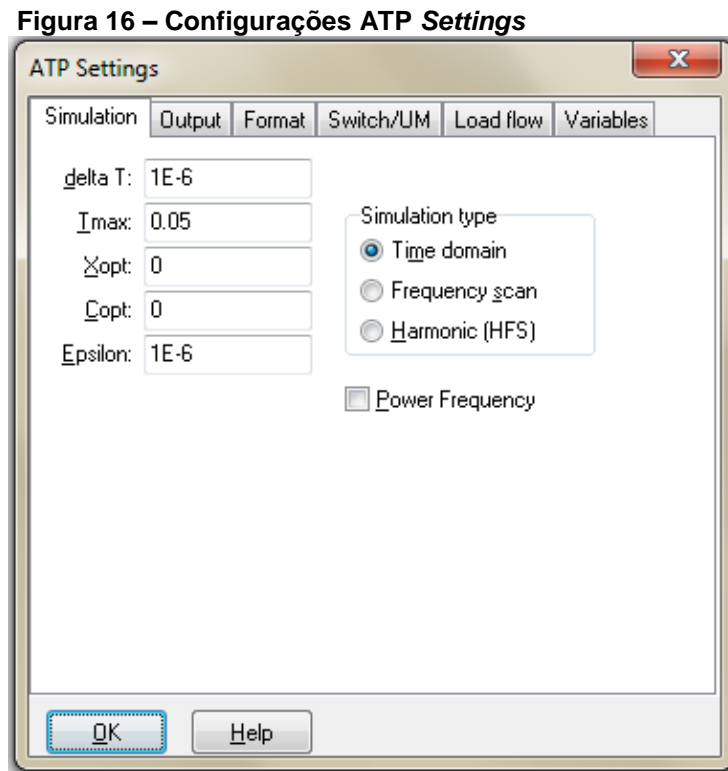
Caso haja alguma dúvida sobre os parâmetros disponíveis para alteração, pode-se clicar em "Help" (parte inferior da caixa de diálogo), conforme segue na Figura 15 para a fonte de corrente alternada.

**Figura 15 – Utilização da função "Help" para a fonte de corrente alternada**



Fonte: Autoria própria.

Antes de executar o sistema modelado, deve-se alterar as configurações de simulação, conforme se deseja. Para tal, deve-se clicar em “ATP”, na barra de tarefas, e após em “Settings”, a Figura 16 ilustra como será a janela de configurações.



Fonte: Autoria própria.

Conforme visto acima:

- *delta T*: passo de integração da curva de análise;
- *Tmax*: tempo máximo de simulação;
- *Xopt*: determina qual unidade de medida para a indutância será adotada pelo programa, se for igual a 0, o valor será dado em mH, caso contrário o sistema admitirá este valor em ohms;
  - *Copt*: determina qual unidade de medida para a capacitância será adotada pelo programa, se for igual a 0, o valor será dado em  $\mu\text{F}$ , caso contrário o sistema admitirá este valor em ohms;
  - *Simulation type*: estabelece qual o domínio que será usado na simulação.
  - *EPSILN*: tolerância próxima de zero que é usada para testar a singularidade das matrizes de coeficientes reais em cada passo. (Tavares et al, 2003) Entre outras configurações.

### 3.1.2.1 Executando simulação do exemplo

Para executar o programa, seleciona-se a opção “ATP” na barra de tarefas, e após, a função “run ATP”, será então aberta a janela de *Startup* do projeto (Figura 17).

Figura 17 – *Startup* do projeto

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

C:\ATPDraw\Projects>COPY C:\ATPdraw\STARTUP STARTUP
1 arquivo(s) copiado(s).

C:\ATPDraw\Projects>C:\ATPdraw\TPBIG1 DISK C:\ATPDraw\Projects\EXEMPLO.atp *-R
EMTP begins. Send one of following alternatives.
SPY, file_name, DISK, HELP, GO, KEY, STOP, BOTH, DIR:<Loaded from command line:
"DISK">
Ok, output goes to disk. Send input data file name:
SPY, file_name, DISK, HELP, GO, KEY, STOP, BOTH, DIR:<Loaded from command line:
"C:\ATPDraw\Projects\EXEMPLO.atp">
That was just for next subcase. Remainder has N22 = 2 cards. MAXCRD =
90000
Note: Uardim input LISTSIZE.DAT could not be connected. Use maximum sizes.
Exit INSERT with KHOLD, LEUEL, KEYBRD = 0 0
Send desired disk file name for LUNIT6 I <CR>, -R I:<Loaded from command line:
"*-R">
SPY132 =C:\ATPDRAW\PROJECTS\EXEMPLO.p14
CIM132 =C:\ATPDRAW\PROJECTS\EXEMPLO.lis
Check SPY132 for .gnu. N = 0
Using .p14, corrected N = 28
A sintaxe do nome do arquivo, do nome do diretório ou do rótulo do volume está i
ncorreta.

C:\ATPDraw\Projects>DEL STARTUP

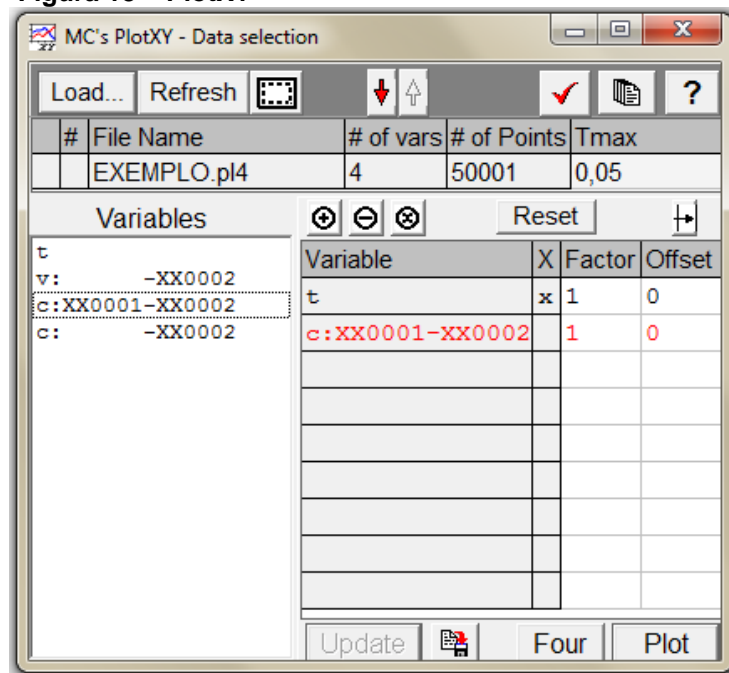
C:\ATPDraw\Projects>del *.dbg,*.bin,*.tmp

C:\ATPDraw\Projects>pause
Pressione qualquer tecla para continuar. . .
  
```

Fonte: Autoria própria.

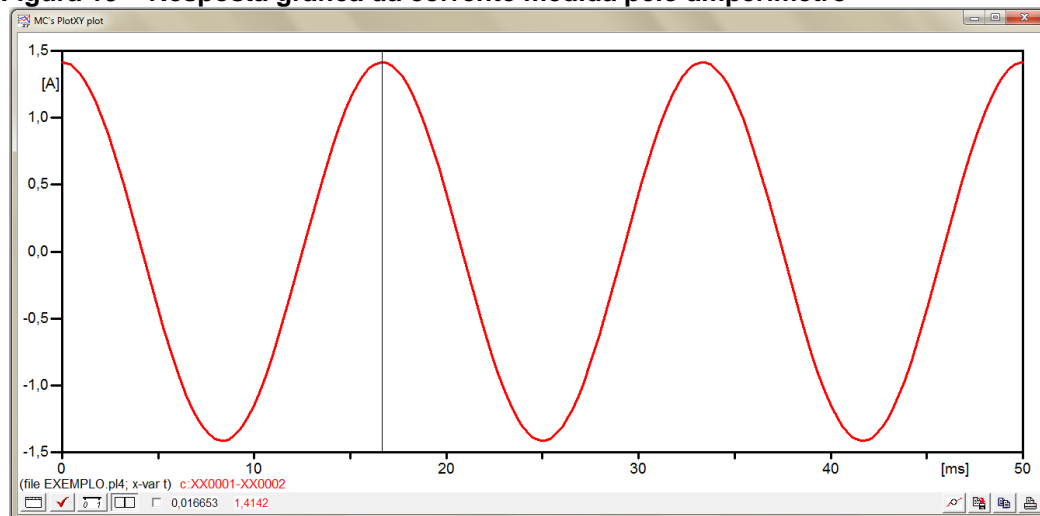
Volta-se na barra de tarefas em “ATP” e em sequência “run Plot”, maneira mais prática de se visualizar a resposta através de resposta gráfica (PlotXY). O gráfico é gerado selecionando-se as variáveis que se deseja visualizar, conforme mostra a Figura 18 e 19.

Figura 18 – PlotXY



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Resposta gráfica da corrente medida pelo amperímetro



Fonte: Autoria própria.

Após efetuar o processamento do sistema, o programa gera dois tipos de arquivos, sendo eles:

- .LIS: que mostra a resposta na forma de linhas de comando, permitindo, entre outras coisas, visualizar os fluxos de potência em cada barra;
- .PL4: o qual apresenta os resultados de corrente, tensão, potência e energia, obtidos na simulação, em forma de vetores coluna.

No capítulo que segue, será apresentado os dados para o sistema modelado neste trabalho, onde utilizou-se o programa *ATPDraw* para realizar as simulações de diversos fenômenos pelos quais o transformador de potência está sujeito durante sua operação, construindo assim um banco de dados a ser aplicado no treinamento e teste da RNA.

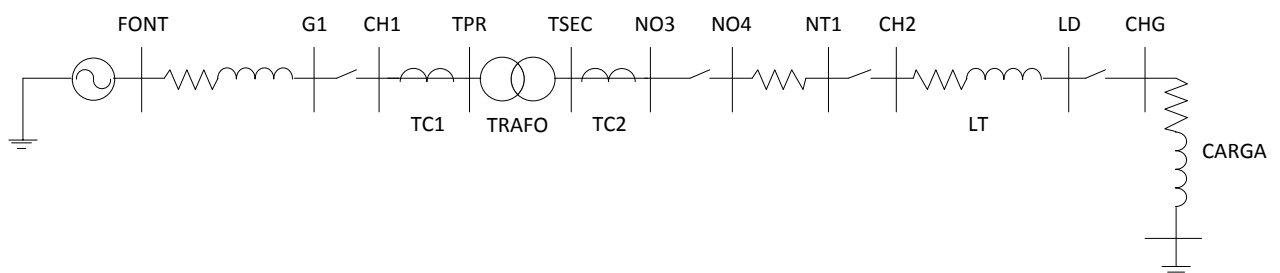
### 3.2 SISTEMA ELÉTRICO MODELADO

A Figura 20 a seguir, mostra um esquema representativo do sistema elétrico modelado, sistema este retirado da tese de doutorado do Ênio Carlos Segatto (Segatto, E., 2005), contando com os nomes dos nós e equipamentos utilizados no programa *ATPDraw*.

Na tese, Ênio também apresenta os cálculos para:

- Fonte equivalente;
- Parâmetros para a linha de distribuição;
- Carga de 10 MVA;
- Transformador de potência;
- Transformadores de corrente.

**Figura 20 – Sistema elétrico modelado**



**Fonte: Autoria própria.**

O sistema elétrico modelado consiste de:

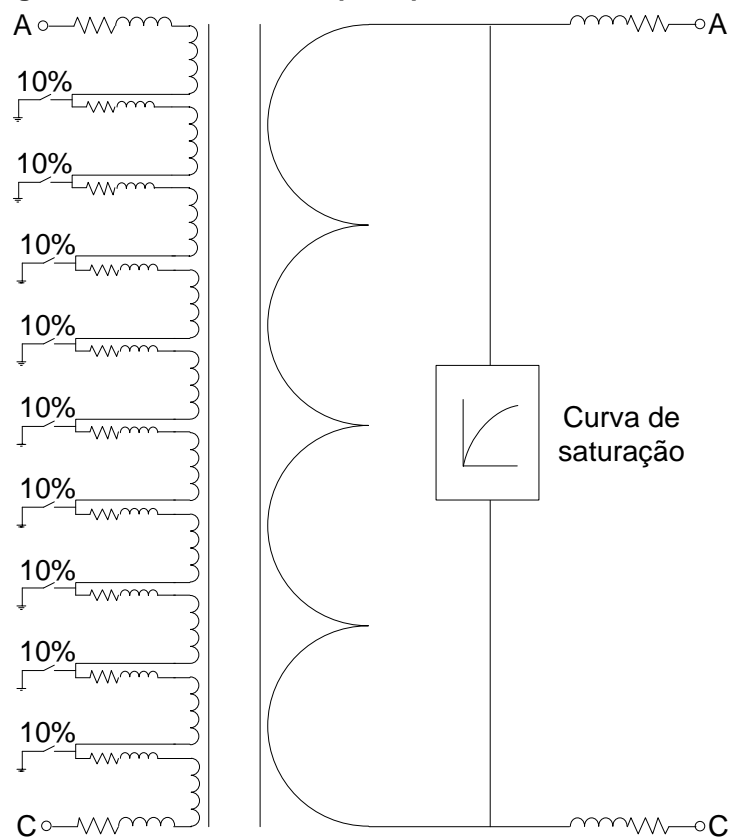
- Equivalente de geração de 138 kV e potência de 30 MVA;
- Dois transformadores de corrente (TCs) com relação de transformação no primário de 200:5 A e no secundário de 2000:5 A.
- Transformador de potência (entre os TCs) de 25 MVA com relação de transformação de 138 kV para 13,8 kV, em ligação triângulo-estrela aterrado;

- Linha de distribuição de 5 km, entre os nós CH2 e LD;
- Carga de 10 MVA, entre os nós CHG e terra, com valor de impedância de  $19,044 \Omega$  e fator de potência 0,92 indutivo.
- Chaves operadas durante o estudo para a simulação de faltas.

### 3.2.1 Modelagem do transformador de potência

Na Figura 21 encontra-se o modelo de transformador de potência empregado no trabalho e o detalhe das conexões dos enrolamentos. Cabe salientar que transformador de potência foi modelado, já que esse modelo não existe pronto no *software* utilizado.

**Figura 21 – Transformador principal utilizado no ATP**



**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se observar que o transformador principal foi modelado para que se conseguisse aplicar faltas internas no mesmo. Para isso, dividiu-se o enrolamento primário em porcentagens, de 10% em 10% até 100% do enrolamento total, para valores de resistência, indutância e tensão relativa ao terra. A Figura 21 ilustra a



divisão do enrolamento entre as fases A e C. O Quadro 3 apresenta como se deu a divisão do enrolamento, e os valores calculados na proporção da divisão, para a ilustração do procedimento adotado.

**Quadro 3 – Divisão do enrolamento primário para aplicação de faltas internas**

Nó	Porcentagem do enrolamento	Resistência ( $\Omega$ )	Indutância (mH)	Tensão (kV)
TPRA - N10TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N10TA - N20TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N20TA - N30TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N30TA - N40TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N40TA - N50TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N50TA - N60TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N60TA - N70TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N70TA - N80TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N80TA - N90TA	10%	0,1048	9,083	13,8
N90TA – TPRC	10%	0,1048	9,083	13,8

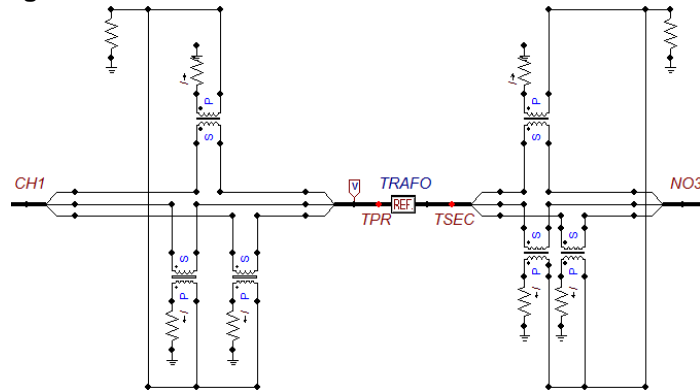
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Transformadores de corrente

Como já citado no capítulo 2, os TCs constituem uma importante composição no sistema elétrico, monitorando as correntes do transformador principal afim de disponibilizá-las ao relé diferencial em magnitudes reduzidas a níveis seguros e manipuláveis para acesso humano.

No sistema em estudo os TCs, modelados para o trabalho, são acoplados entre os ramos CH1-TPR e TSEC-NO3 (Figura 22), em série com o primário e secundário do transformador de potência.

**Figura 22 – Conexão dos transformadores de corrente**



Fonte: Autoria própria.

Deve-se citar uma característica presente em qualquer sistema constituído de um transformador trifásico ligado em conexão do tipo estrela-triângulo ou triângulo-estrela. “Sabe-se que em ligações desse tipo, há o surgimento de uma defasagem angular de 30 graus entre as correntes dos lados primários e secundário do transformador.” (OLIVEIRA et. al., 1984). Para corrigir esta defasagem, usa-se na prática os TCs de maneira inversa as ligações dos lados do transformador principal. De modo que, por exemplo, para um transformador ligado em estrela-triângulo conecta-se dois TCs em triângulo-estrela.

Porém nesse estudo, as ligações entre os TCs e o transformador de potência foram realizadas de modo que não haja a compensação de defasamento. Essa condição será levada em conta durante a aplicação da RNA, observando se a mesma, ainda assim identifica as características de falta nos dados obtidos.

### 3.3 SITUAÇÕES SIMULADAS

Faz parte do objetivo desse trabalho realizar simulações no *ATPDraw* gerando dados referente às diversas condições de operação de um transformador de potência.

#### 3.3.2 Regime permanente

Análise de extrema importância, pois é desta forma que os sistemas operam quase na totalidade do tempo.

Para gerar os casos deste tipo de falta, foram utilizadas as situações conforme o Quadro 4. Vale salientar que as análises foram realizadas considerando o tempo de

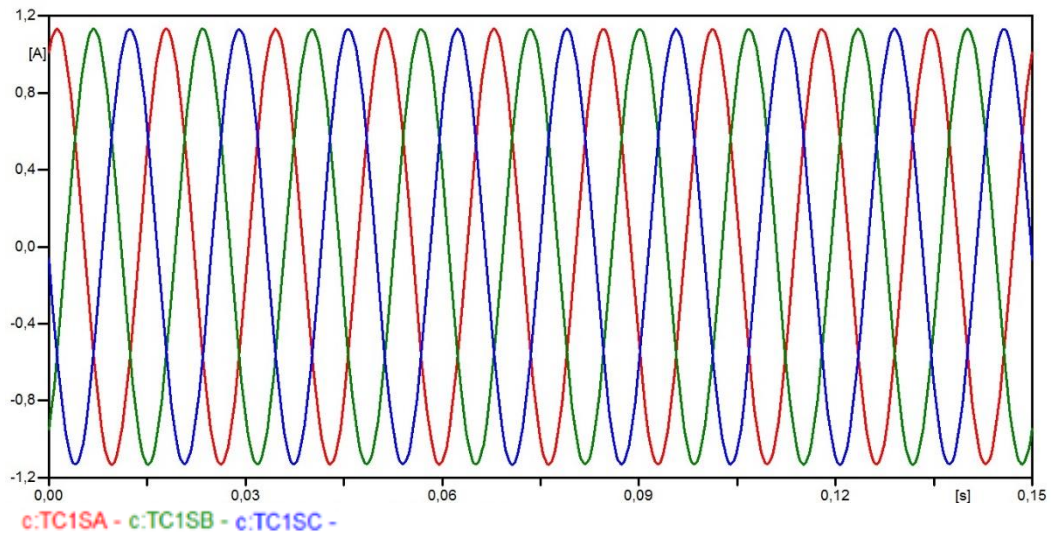
início de falta (fechamento das chaves) em 0,01794 segundos ( $90^\circ$ ) e 0,0221 segundos ( $0^\circ$ ).

**Quadro 4 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de regime permanente.**

Tensão (kV)	Tempo de simulação de operação (s)			Carga (MVA)
	Fase A	Fase B	Fase C	
138	0,01794	1	1	8,0
	0,02210	1	1	10,0
				12,0

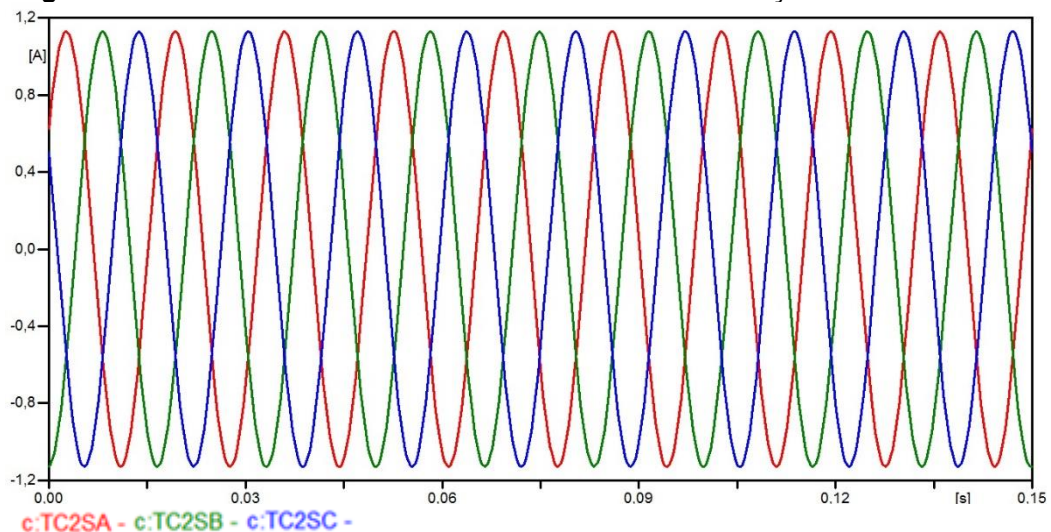
Fonte: Autoria própria.

**Figura 23 – Corrente do secundário do TC de alta na situação de 8 MVA.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 24 – Corrente do secundário do TC de baixa na situação de 8 MVA.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.3 Falhas internas entre a fase-terra no primário do transformador de potência

Consiste na divisão do enrolamento primário do transformador de potência em diversos enrolamentos, aplicando-se faltas fase-terra através de chaves conectadas entre a fase A e o terra. A Figura 21 e o quadro 3, já citados, ilustram essa situação.

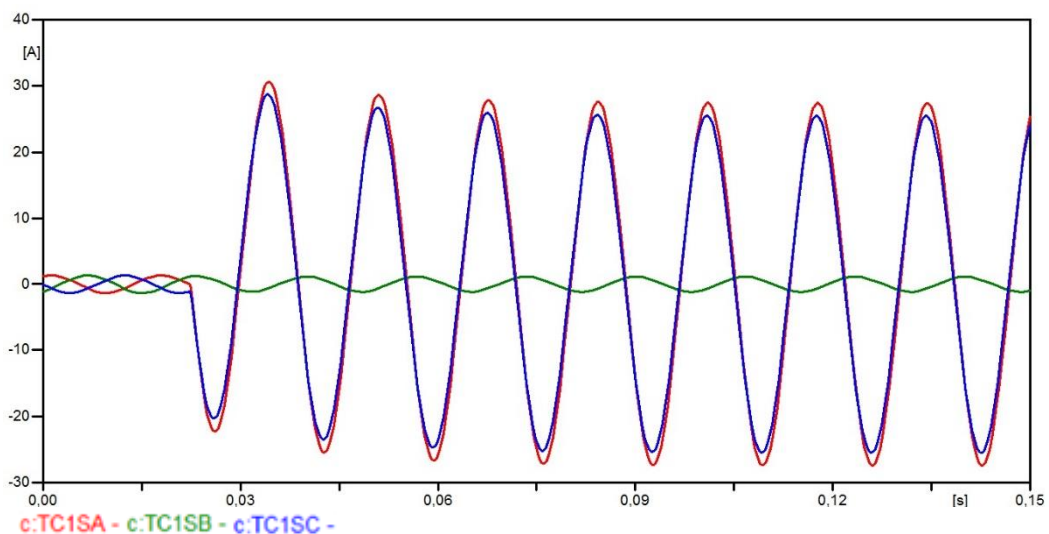
Para gerar esse tipo de falta, variam-se os valores conforme o quadro 5 abaixo.

**Quadro 5 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas internas entre fase-terra.**

Tensão (kV)	Instante de fechamento das chaves (s)			Resistência de falta ( $\Omega$ )	% do enrolamento envolvido na aplicação da falta
	Fase A	Fase B	Fase C		
138	0,01794	1	1	0,001	10
	0,02210	1	1	0,1	20
				1	30
				2	40
				3	50
				4	60
				5	70
					80
					90

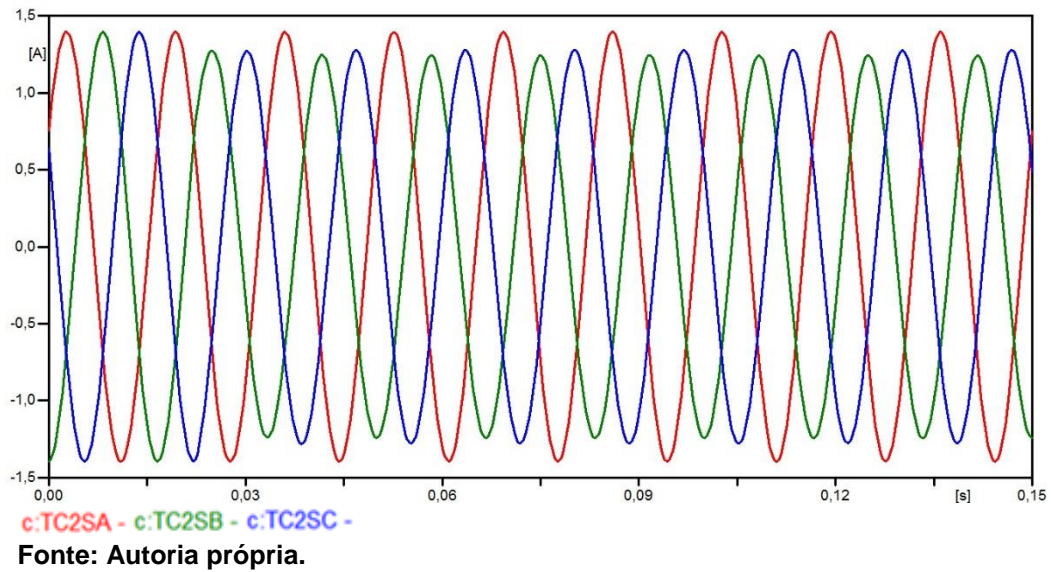
Fonte: Autoria própria.

**Figura 25 – Corrente do secundário do TC de alta – Falta em  $0^\circ$ , resistência de 0,001 e enrolamento em 50%.**



Fonte: Autoria própria.

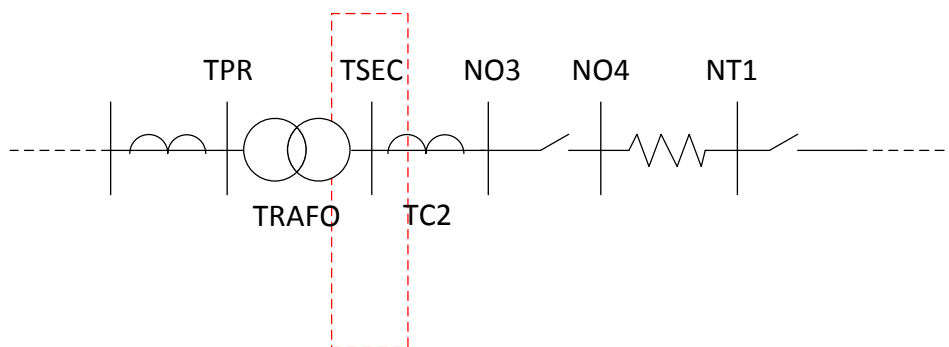
**Figura 26 – Corrente do secundário do TC de baixa – Falta em  $0^\circ$ , resistência de 0,001 e enrolamento em 50%.**



### 3.3.4 Faltas entre o transformador de potência e o TC2

Consiste na aplicação de faltas entre o secundário do transformador de potência e o TC2 (Figura 27) com o sistema em regime, variando-se o instante de fechamento das chaves e a resistência de falta, conforme Quadro 6.

**Figura 27 – Situação de falta entre o transformador de potência e o TC2.**



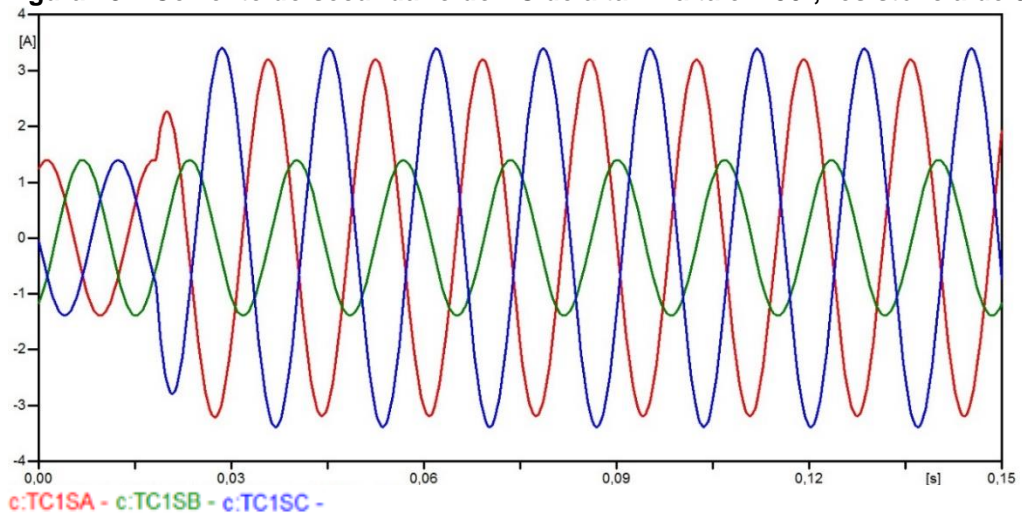
**Fonte: Autoria própria.**

**Quadro 6 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas entre o transformador de potência e o TC2.**

Tensão (kV)	Instante de fechamento das chaves (s)			Resistência de falta ( $\Omega$ )
	Fase A	Fase B	Fase C	
138	0,01794	1	1	0,001
	0,02210	1	1	1
				5
				10
				15
				20
				25
				30
				35
				40
				45
				50
				55
				60
			65	
			70	
			75	
			80	
			85	
			90	
			95	
			100	

Fonte: Autoria própria.

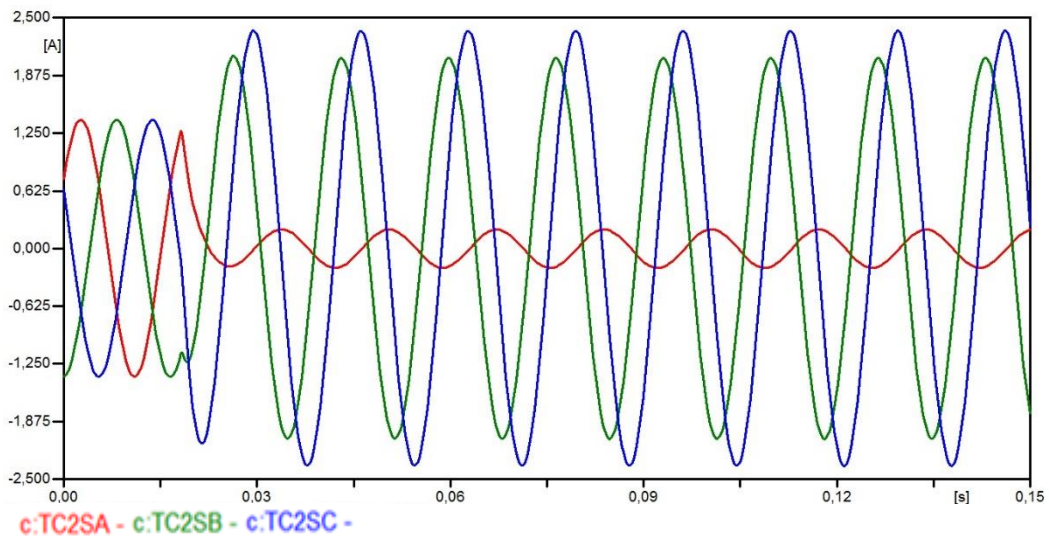
**Figura 28 – Corrente do secundário do TC de alta – Falta em 90°, resistência de 0,001.**



Fonte: Autoria própria.



**Figura 29 – Corrente do secundário do TC de baixa – Falta em 90°, resistência de 0,001.**

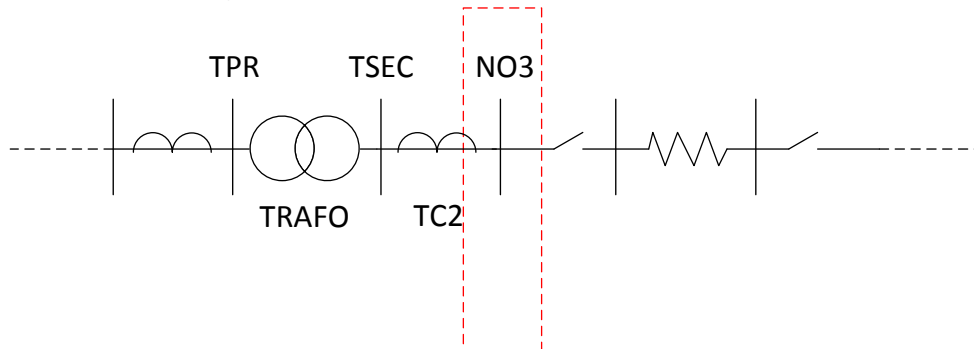


Fonte: Autoria própria.

### 3.3.5 Faltas externas aplicadas após o TC2

Consiste em uma falta monofásica entre a fase A e o terra. Esse tipo de falta é obtida através do fechamento de uma chave após o transformador de corrente do lado de baixa tensão, com o sistema em regime, conforme ilustrado na Figura 30.

**Figura 30 – Situação de falta externa aplicada após o TC2.**



Fonte: Autoria própria.

No Quadro 7 encontram-se os valores que variam-se para gerar esse tipo de falta.

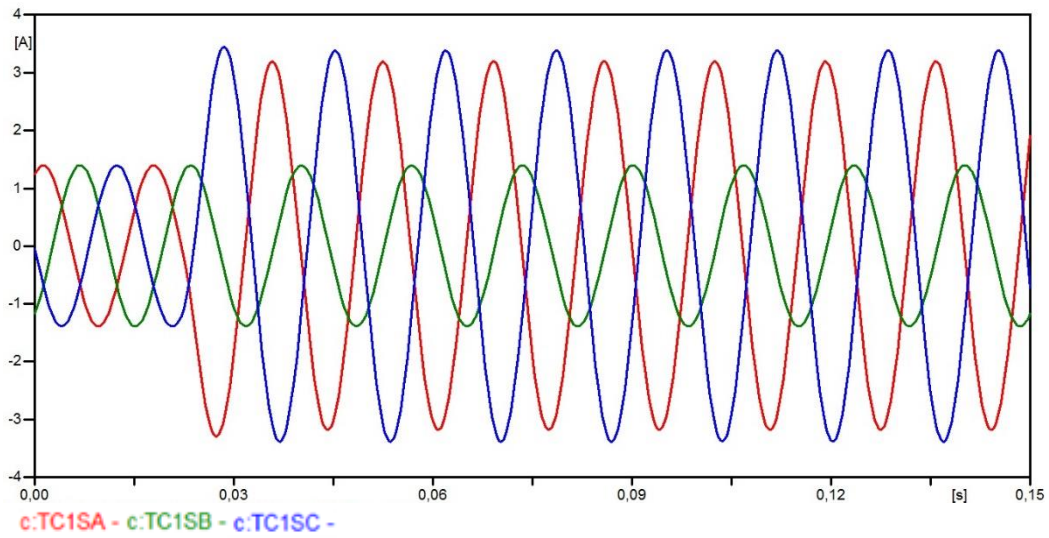
**Quadro 7 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas aplicadas após o TC2.**

Tensão (kV)	Instante de fechamento das chaves (s)			Resistência de falta ( $\Omega$ )
	Fase A	Fase B	Fase C	
138	0,01794	1	1	0,001
	0,02210	1	1	1
				5
				10
				15
				20
				25
				30
				35
				40
				45
				50
				55
				60
				65
				70
				75
			80	
			85	
			90	
			95	
			100	

Fonte: Autoria própria.

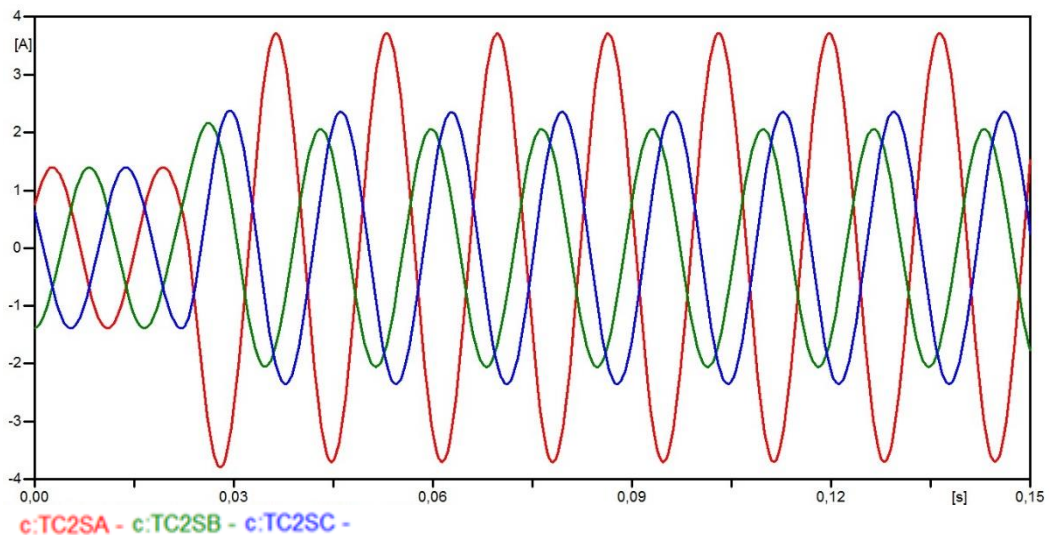


**Figura 31 – Corrente do secundário do TC de alta – Falta em 0°, resistência de 0,001.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 32 – Corrente do secundário do TC de baixa – Falta em 0°, resistência de 0,001.**

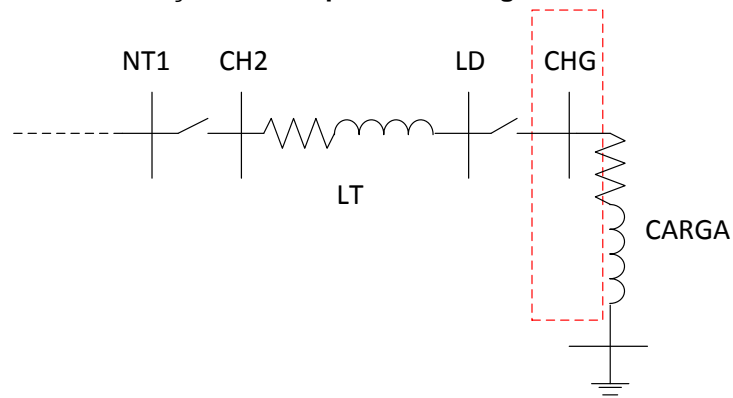


Fonte: Autoria própria.

### 3.3.6 Faltas próximo a carga

Consiste em desconectar a carga do restante do sistema em regime, variando-se o instante de fechamento das chaves e a resistência de falta, conforme a Figura 33 e o Quadro 8.

Figura 33 – Situação de falta próxima à carga.



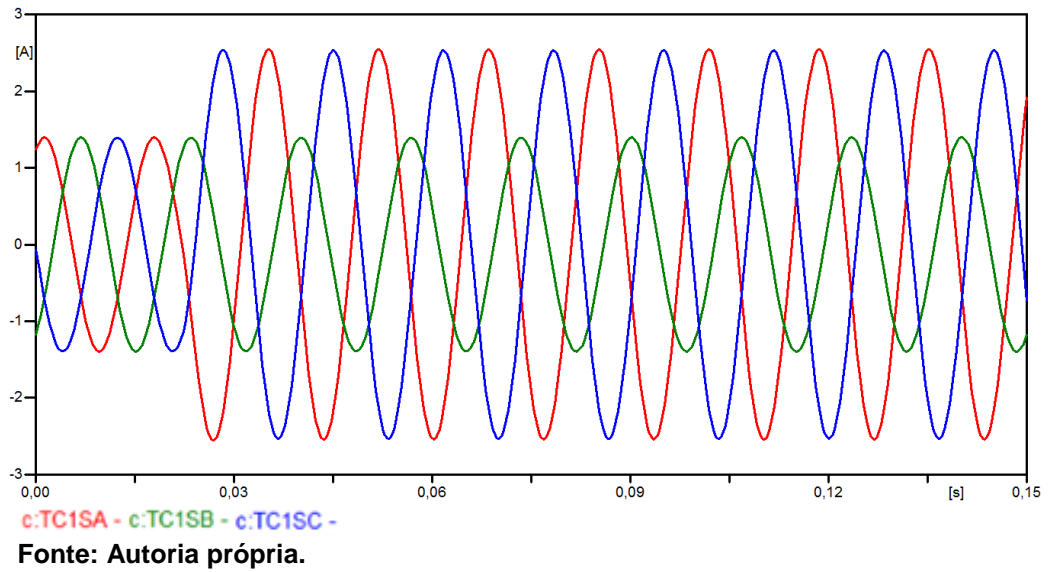
Fonte: Autoria própria.

Quadro 8 – Combinação de parâmetros utilizados na geração dos casos de faltas próximo à carga.

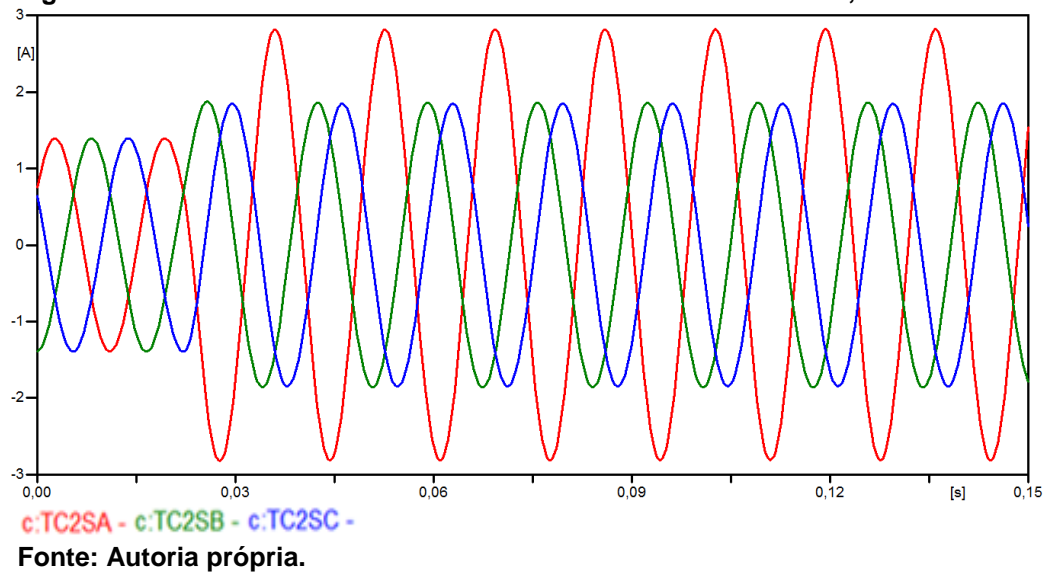
Tensão (kV)	Instante de fechamento das chaves (s)			Resistência de falta ( $\Omega$ )
	Fase A	Fase B	Fase C	
138	0,01794	1	1	0,001
	0,02210	1	1	1
				5
				10
				15
				20
				25
				30
				35
				40
				45
				50
				55
				60
				65
				70
				75
			80	
			85	
			90	
			95	
			100	

Fonte: Autoria própria.

**Figura 34 – Corrente do secundário do TC de alta – Falta em 90°, resistência de 5.**



**Figura 35 – Corrente do secundário do TC de baixa – Falta em 90°, resistência de 5.**

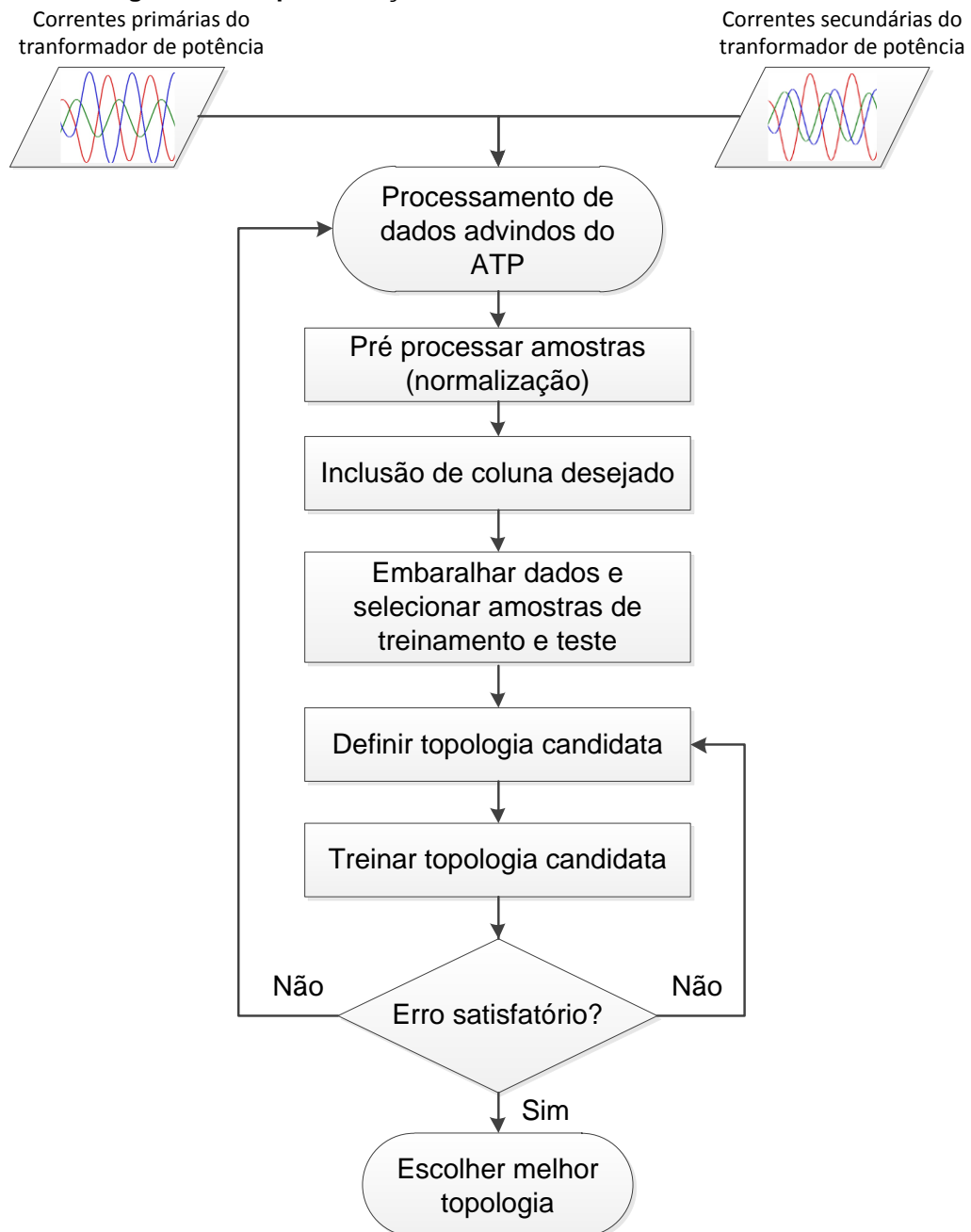


### 3.4 FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO

O processamento dos dados advindos do *ATPDraw*, bem como a implementação do algoritmo de Redes Neurais Artificiais, ocorreu no software *Matlab*.

A Figura 36 apresenta o fluxograma de implementação do trabalho realizado, em que cada processo ou decisão serão descritos a seguir.

**Figura 36 – Fluxograma de implementação.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.4.1 Banco de dados

#### 3.4.1.1 Geração de casos no ATP

As situações de falta foram geradas uma a uma no *software* computacional, alterando a comutação das chaves. Um exemplo de simulação realizada no *ATPDraw* é mostrada no Apêndice A.

#### 3.4.1.2 Processamento de dados no *Matlab*

##### **Processamento de dados advindos do ATP**

Antes dos dados serem inseridos na RNA, os mesmos foram processados no *Matlab* de forma automatizada. Os sinais em questão possuem 64 amostras por ciclo e frequência amostral de 3,84 kHz. Determinou-se que as amostras seriam apresentadas à rede em forma de janelamento para cada corrente (primária e secundária) das fases do transformador.

Foram geradas diversas combinações de janelamento, de modo que os resultados obtidos pelo algoritmo de RNA fossem comparados. Sendo assim, no capítulo 4, serão apresentados os melhores resultados com a combinação de janelamento, de acordo com a estrutura a seguir:

- Número de janelas: 5;
- Número de amostras em uma janela: 12 amostras;
- Número de amostras de passo: 6 amostras.

O janelamento foi utilizado como estratégia para que fosse possível aumentar o número de amostras apresentadas à rede, dessa forma, para cada corrente dos casos simulados foram coletadas 5 janelas de dados sobrepostas (linhas da matriz gerada), cada uma com 12 amostras da oscilografia (colunas da matriz gerada), conforme Tabela 6.

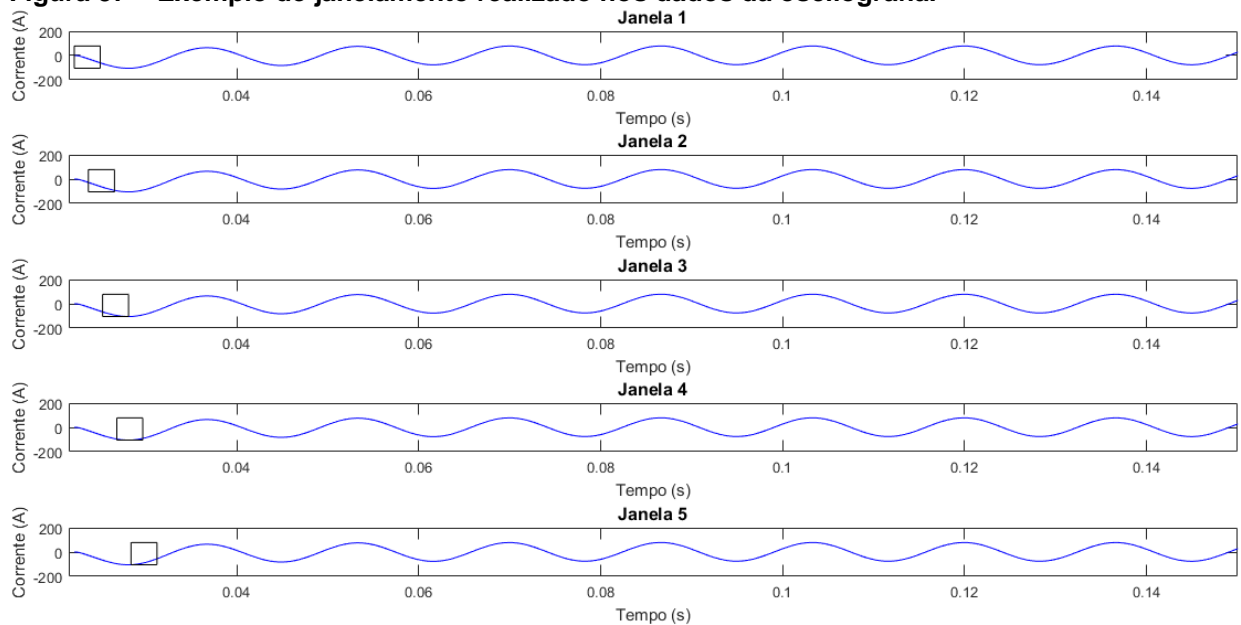
Tabela 6 – Matriz das condições de faltas

Condições de faltas	Nº casos	Nº correntes	Nº janelas	Nº amostras por janelas	Matriz
Regime permanente.	6	6	5	12	180x12
Internas entre a fase-terra no primário.	126	6	5	12	3780x12
Entre o transformador de potência e o TC do secundário	44	6	5	12	1320x12
Externas aplicadas após o TC do secundário	44	6	5	12	1320x12
Próximo a carga	44	6	5	12	1320x12

Fonte: Autoria própria

A Figura 37 apresenta o janelamento para a corrente primária da fase A do transformador de potência, de um dos casos simulados.

Figura 37 – Exemplo de janelamento realizado nos dados da oscilografia.



Fonte: Autoria própria.

### Pré processar amostras (normalizar)

Compilado todas as situações de falta processadas (Tabela 6), obteve-se uma matriz 7920 X 12 (Figura 38), que teve seus vetores normalizados, ou seja, os valores mínimos e máximos da matriz alocados entre -1 e 1 (Figura 39).

**Figura 38 – Parte da matriz 7920x12 gerada após compilação dos dados gerados.**

7920x12 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0052	-0.1314	-2.8819	-8.4419	-14.3628	-20.5779	-27.0205	-33.6170	-40.2955	-46.9829	-53.6082	-60.0971
2	-27.0205	-33.6170	-40.2955	-46.9829	-53.6082	-60.0971	-66.3799	-72.3882	-78.0564	-83.3226	-88.1299	-92.4236
3	-66.3799	-72.3882	-78.0564	-83.3226	-88.1299	-92.4236	-96.1554	-99.2823	-101.7680	-103.5640	-104.6730	-105.0510
4	-96.1554	-99.2823	-101.7680	-103.5640	-104.6730	-105.0510	-104.5620	-103.2380	-101.2640	-98.5840	-95.2165	-91.1878
5	-104.5620	-103.2380	-101.2640	-98.5840	-95.2165	-91.1878	-86.5306	-81.2839	-75.4921	-69.2052	-62.4782	-55.3702
6	0.0052	-0.1314	-2.5332	-7.3201	-12.3214	-17.4832	-22.7523	-28.0712	-33.3829	-38.6326	-43.7655	-48.7264
7	-22.7523	-28.0712	-33.3829	-38.6326	-43.7655	-48.7264	-53.4633	-57.9259	-62.0671	-65.8423	-69.2113	-72.1374

Fonte: Autoria própria.

**Figura 39 – Parte da matriz de dados normalizados.**

7920x12 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.2003	0.1524	0.0795	-7.9288e-04	-0.0807	-0.1610	-0.2430	-0.3271	-0.4097	-0.4667	-0.5245	-0.5836
2	-0.1100	-0.2219	-0.3290	-0.4056	-0.4802	-0.5535	-0.6272	-0.7018	-0.7723	-0.8092	-0.8460	-0.8830
3	-0.5617	-0.6552	-0.7412	-0.7874	-0.8316	-0.8746	-0.9179	-0.9618	-1	-1	-1	-1
4	-0.9035	-0.9558	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.9952	-0.9531	-0.9119	-0.8716
5	-1	-1	-0.9945	-0.9477	-0.9037	-0.8623	-0.8240	-0.7878	-0.7477	-0.6762	-0.6071	-0.5398
6	0.2003	0.1524	0.0833	0.0110	-0.0599	-0.1302	-0.2013	-0.2735	-0.3433	-0.3880	-0.4329	-0.4783
7	-0.0610	-0.1599	-0.2535	-0.3179	-0.3800	-0.4406	-0.5011	-0.5621	-0.6187	-0.6445	-0.6698	-0.6951

Fonte: Autoria própria.

### Inclusão de coluna desejado

Após, foi acrescentada à matriz a coluna de resultados desejados, 0 para relé em bloqueio e 1 para atuação do relé, de forma que obteve-se uma matriz 7920 x 13 (Figura 40).

**Figura 40 – Parte da matriz com a inclusão da coluna desejado.**

7920x13 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.2003	0.1524	0.0795	-7.9288e-04	-0.0807	-0.1610	-0.2430	-0.3271	-0.4097	-0.4667	-0.5245	-0.5836	1
2	-0.1100	-0.2219	-0.3290	-0.4056	-0.4802	-0.5535	-0.6272	-0.7018	-0.7723	-0.8092	-0.8460	-0.8830	1
3	-0.5617	-0.6552	-0.7412	-0.7874	-0.8316	-0.8746	-0.9179	-0.9618	-1	-1	-1	-1	1
4	-0.9035	-0.9558	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.9952	-0.9531	-0.9119	-0.8716	1
5	-1	-1	-0.9945	-0.9477	-0.9037	-0.8623	-0.8240	-0.7878	-0.7477	-0.6762	-0.6071	-0.5398	1
6	0.2003	0.1524	0.0833	0.0110	-0.0599	-0.1302	-0.2013	-0.2735	-0.3433	-0.3880	-0.4329	-0.4783	1
7	-0.0610	-0.1599	-0.2535	-0.3179	-0.3800	-0.4406	-0.5011	-0.5621	-0.6187	-0.6445	-0.6698	-0.6951	1

Fonte: Autoria própria.

### Embaralhar dados e selecionar amostras de treinamento e teste

As amostras foram embaralhadas (Figura 41), e após, setenta (70) por cento mais 1 foram selecionadas para o treinamento, e o restante para a validação da rede.

**Figura 41 – Parte da matriz com amostras embaralhadas.**

7920x13 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.2160	0.1689	0.1251	0.1010	0.0775	0.0543	0.0307	0.0065	-0.0150	-0.0175	-0.0201	-0.0229	1
2	0.1913	0.1440	0.1002	0.0766	0.0537	0.0312	0.0083	-0.0151	-0.0358	-0.0370	-0.0383	-0.0398	0
3	0.1899	0.1427	0.0990	0.0756	0.0529	0.0306	0.0078	-0.0155	-0.0360	-0.0371	-0.0382	-0.0396	1
4	0.2076	0.1601	0.1161	0.0920	0.0685	0.0454	0.0219	-0.0022	-0.0236	-0.0257	-0.0280	-0.0304	1
5	0.1764	0.1279	0.0830	0.0588	0.0353	0.0123	-0.0111	-0.0350	-0.0560	-0.0571	-0.0583	-0.0597	0
6	0.2023	0.1546	0.1103	0.0860	0.0624	0.0393	0.0157	-0.0084	-0.0298	-0.0318	-0.0339	-0.0362	1
7	0.2042	0.1591	0.1174	0.0953	0.0737	0.0524	0.0306	0.0082	-0.0117	-0.0126	-0.0137	-0.0151	1

Fonte: Autoria própria.

### 3.4.1.3 Definição da RNA

#### Definir topologia candidata

Definiu-se a rede que será utilizada e estudou-se diversas topologias candidatas, com números variados de neurônios para obtenção dos resultados.

Cabe salientar que para entrada dos dados na RNA, é necessário realizar a inversa da matriz de dados (7920x12), obtendo então uma matriz 12x7920.

#### Treinar topologia candidata

Durante o treinamento e validação, foram realizados estudos com diferentes funções de ativação, visto na Tabela 7.

**Tabela 7 – Topologias candidatas**

Topologia candidata	Função ativação – 1ª camada	Função ativação – 2ª camada	Função ativação – 3ª camada (saída)	Épocas	Tempo (s)	Erro Relativo Treinamento (%)	Erro Relativo Teste (%)
1	purelin	tansig	logsig	4424	03:34	9,1	9,0
2	purelin	logsig	logsig	10000	07:19	8,2	8,2
3	Tansig	tansig	logsig	10000	09:19	7,3	8,1
4	purelin	purelin	logsig	10000	00:11	59,2	58,2
5	tansig	purelin	logsig	10000	08:03	8,9	10,3

Fonte: Autoria própria

#### Decisão – Erro satisfatório?

Após o treinamento das topologias PMC candidatas, caso o erro não fosse satisfatório, ou era realizado um novo processamento/janelamento dos dados advindos do ATP, ou alterava-se a topologia da RNA, até que se encontrasse a combinação com erro satisfatório (<10%) para o estudo em questão.



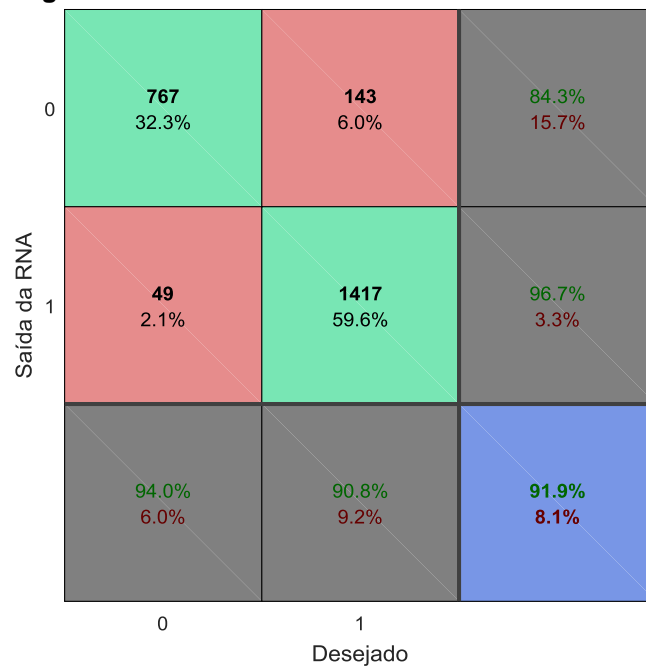
### Melhor topologia

Levou-se em consideração, para escolha da melhor topologia, aquela em que o erro fosse maior referente as amostras de treinamento do que para as amostras de teste, evitando memorização excessiva do PMC e proporcionando resultados melhores e mais confiáveis.

#### 3.4.1.4 Apresentação dos resultados

Os resultados de treinamento e teste serão apresentados em forma de matriz confusão Figura 42, na qual leitura dos valores se dão da seguinte forma:

Figura 42 – Matriz confusão.



Fonte: Autoria própria.

#### Duas primeiras células diagonais (quadrantes verdes)

Mostram o número e a porcentagem de classificações corretas pela rede treinada.

#### Células fora da diagonal (quadrantes vermelhos)

Os números e porcentagem correspondem as observações classificadas incorretamente.

**Coluna à direita (quadrantes cinza)**

Mostra as porcentagens de todos os exemplos previstos pertencentes a cada classe que são classificadas correta ou incorretamente.

**Linha inferior (quadrantes cinza)**

Mostra as porcentagens de todos os exemplos pertencentes a cada classe que são classificadas correta ou incorretamente.

**Células canto inferior (quadrante azul)**

Mostra a precisão geral do estudo.

## 4. RESULTADOS

Todas as topologias apresentadas, possuíam as mesmas características abaixo, alterando apenas as funções de ativação:

- *Rede FeedForward* de camadas múltiplas – *Perceptron* multicamadas;
- 12 entradas (matriz 12x7920) e 1 saída (desejado);
- Duas camadas escondidas:
  - 1ª camada: 15 neurônios;
  - 2ª camada: 5 neurônios;
  - 3ª camada (saída): 1 neurônio;
- Algoritmo de treinamento supervisionado *off-line*:
  - *Backpropagation Levenbrg-Marquardt (trainlm)*;
- Grau de confiança para pós processamento (aproximação): 0,8.

Salientando que para os resultados apresentados, o treinamento da topologia foi realizado 5 vezes, contornando os problemas de mínimos locais a fim de apresentar o melhor resultado.

### 4.1 MELHOR TOPOLOGIA

#### 4.1.1 Topologia 1

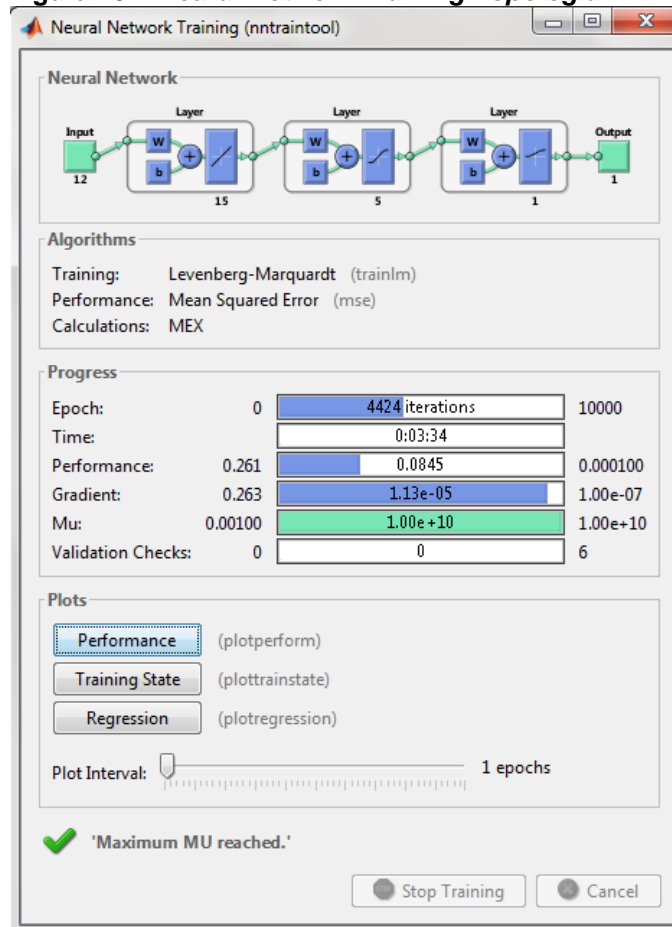
Foi utilizado no MATLAB, a *Neural Network Toolbox* com o objetivo de criar, treinar e validar o algoritmo de classificação de padrões em RNAs.

O *Neural Network Training* e a curva de treinamento da RNA em função ao número de iterações, para a Topologia 1, são mostrados respectivamente, nas Figuras 43 e 44. Para tal topologia, as funções de ativação utilizadas foram:

- Função linear – primeira camada neural escondida;
- Tangente hiperbólica – segunda camada neural escondida;
- Logística – camada neural de saída.

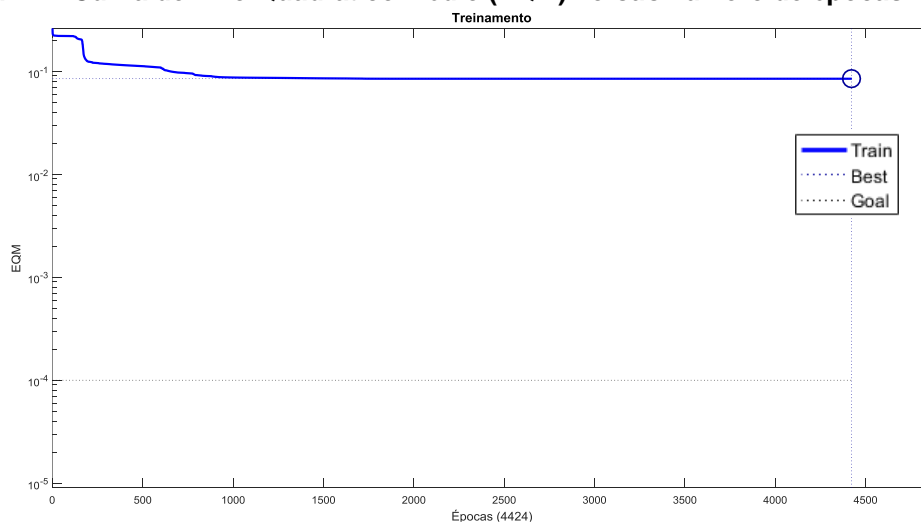
O treinamento encerrou-se por ter convergido ao erro quadrático médio, não utilizando o número total de épocas (cada apresentação completa de todas as amostras pertencentes ao conjunto de treinamento, visando o ajuste de pesos sinápticos e limiares dos neurônios) determinados.

**Figura 43 – Neural Network Training Topologia 1.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 44 – Curva de Erro Quadrático Médio (EQM) versus número de épocas Topologia 1.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 45, são apresentados os resultados de treinamento da topologia 1.

**Figura 45 – Matriz confusão referente aos resultados de treinamento Topologia 1.**  
**Matriz de Confusão - Treinamento**

Saída da RNA	0	1859 33.5%	357 6.4%	83.9% 16.1%
	1	145 2.6%	3184 57.4%	95.6% 4.4%
		92.8% 7.2%	89.9% 10.1%	90.9% 9.1%
		0	1	Desejado

Fonte: Autoria própria.

### **Duas primeiras células diagonais**

1859 amostras são corretamente classificadas como 0, relé em bloqueio, o que corresponde a 33,5% do total de amostras de treinamento apresentadas a rede. Da mesma forma, 3184 amostras são classificadas como 1, atuação do relé, correspondendo a 57,4% das amostras.

### **Células fora da diagonal**

357 amostras com características de bloqueio são incorretamente classificadas como característica de atuação do relé, isso corresponde a 6,4%. Bem como, 145 (2,6%) amostras de atuação são incorretamente classificadas como bloqueio do relé.

### **Coluna à direita**

Das 2216 (1859+357) amostras de bloqueio de relé, 83,9% estão corretamente classificadas e 16,1% erradas. Das 3329 (145+3184) amostras de atuação do relé, 95,6% estão corretas e 4,4% erradas.

### **Linha inferior**

Das 2004 (1859+145) amostras com características de bloqueio de relé, 92,8% estão corretamente classificados como bloqueio, e 7,2% como atuação do relé. Assim

como para as 3541 (357+3184) amostras com características de atuação do relé, onde 89,9% são corretamente classificadas e 10,1% são erroneamente classificadas como bloqueio do relé.

### Células canto inferior

No geral, 90,9% das classificações estão corretas e 9,1% erradas.

Na Figura 46, são apresentados os resultados de treinamento e teste da topologia 1.

**Figura 46 – Matriz confusão referente aos resultados de teste Topologia 1.**  
**Matriz de Confusão - Teste**

Saída da RNA	0	754 31.7%	152 6.4%	83.2% 16.8%
	1	62 2.6%	1408 59.3%	95.8% 4.2%
		92.4% 7.6%	90.3% 9.7%	91.0% 9.0%
		0	1	Desejado

Fonte: Autoria própria.

### Duas primeiras células diagonais

754 amostras são corretamente classificadas como 0, relé em bloqueio, o que corresponde a 31,7% do total de amostras de teste apresentadas a rede. Da mesma forma, 1408 amostras são classificadas como 1, atuação do relé, correspondendo a 59,3% das amostras.

**Células fora da diagonal**

152 amostras com características de bloqueio são incorretamente classificadas como característica de atuação do relé, isso corresponde a 6,4%. Bem como, 62 (2,6%) amostras de atuação são incorretamente classificadas como bloqueio do relé.

**Coluna à direita**

Das 906 (754+152) amostras de bloqueio de relé, 83,2% estão corretamente classificadas e 16,8% erradas. Das 1470 (62+1408) amostras de atuação do relé, 95,8% estão corretas e 4,2% erradas.

**Linha inferior**

Das 816 (754+62) amostras com características de bloqueio de relé, 92,4% estão corretamente classificados como bloqueio, e 7,6% como atuação do relé. Assim como para as 1560 (152+1408) amostras com características de atuação do relé, onde 90,3% são corretamente classificadas e 9,7% são erroneamente classificadas como bloqueio do relé.

**Células canto inferior**

No geral, 91,0% das classificações estão corretas e 9,0% erradas.

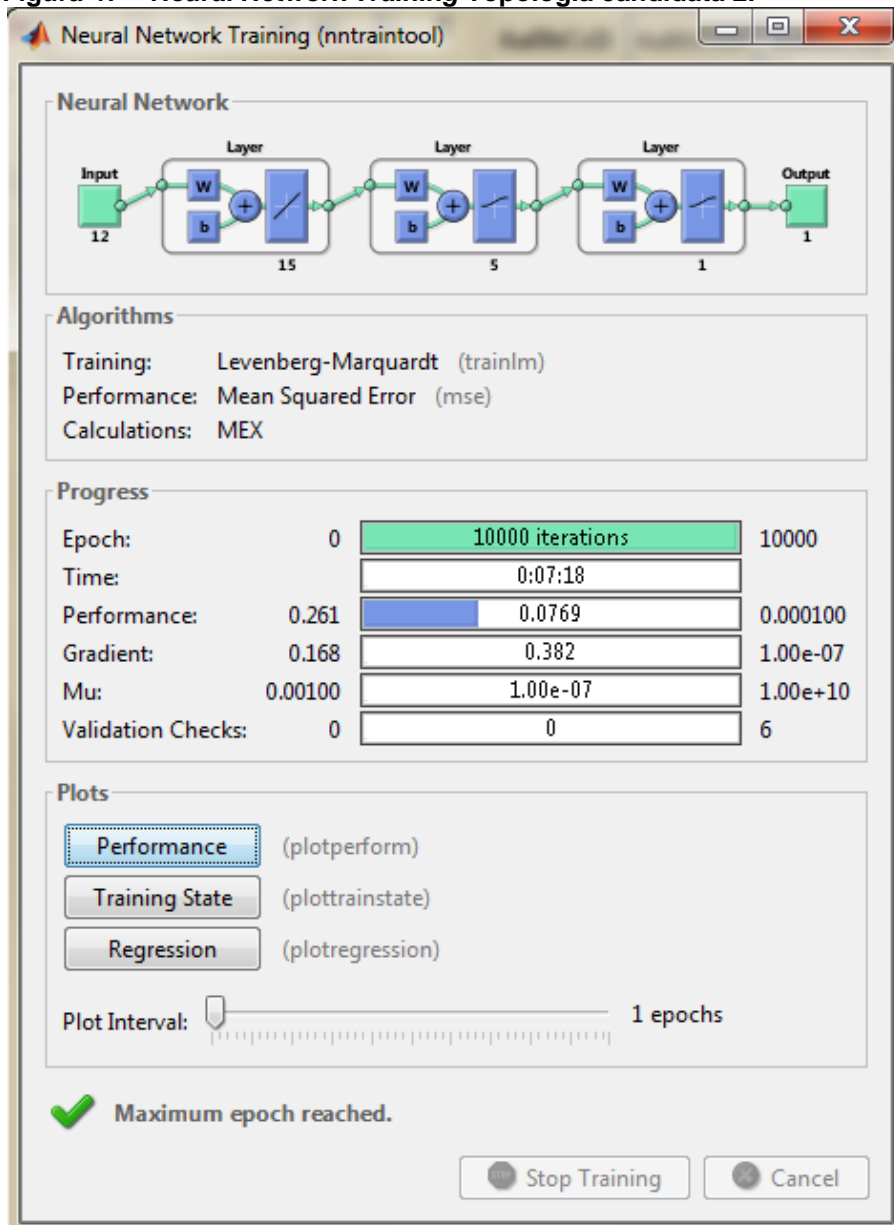
## 4.2 TOPOLOGIAS CANDIDATAS

### 4.2.1 Topologia 2

Na topologia candidata 2, a função de ativação utilizada na primeira camada escondida foi a função linear, e para a segunda camada escondida, e camada de saída, utilizou-se a função logística.

Para essa topologia, o treinamento encerrou-se pelo máximo número de épocas (10000), em um tempo de 7 minutos e 18 segundos (Figura 47).

Figura 47 – *Neural Network Training Topologia candidata 2.*

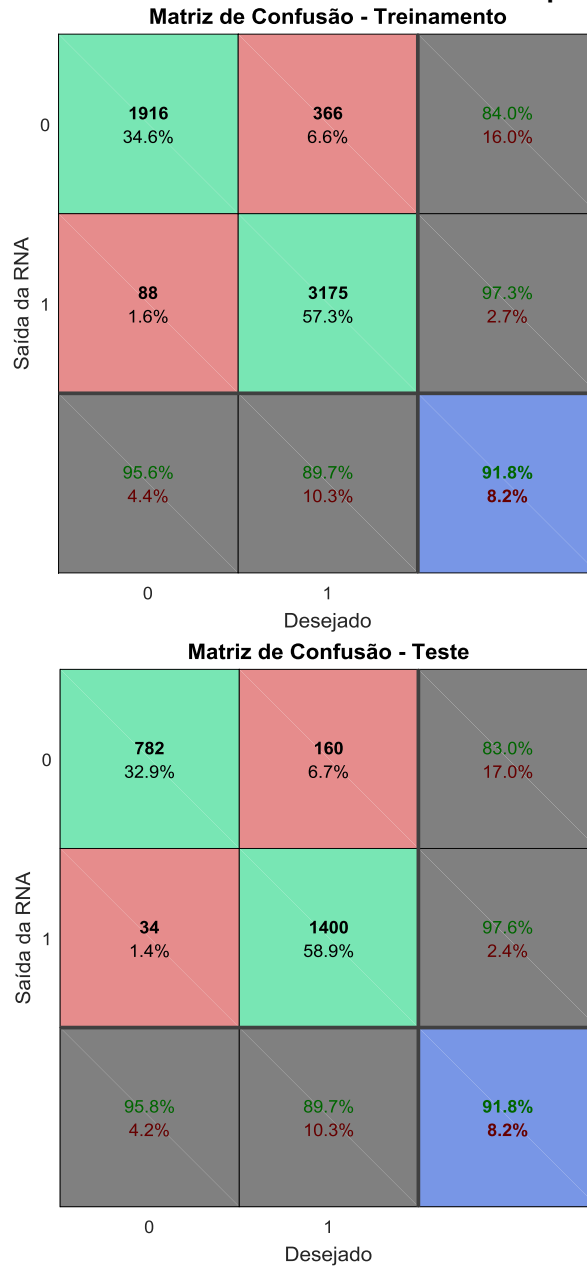


Fonte: Autoria própria.



Nessa topologia, os erros relativos ao treinamento e ao teste foram ambos de 8,2%, conforme podemos observar no quadrante da Figura 48.

**Figura 48 – Matriz confusão - Treinamento e Teste Topologia candidata 2.**

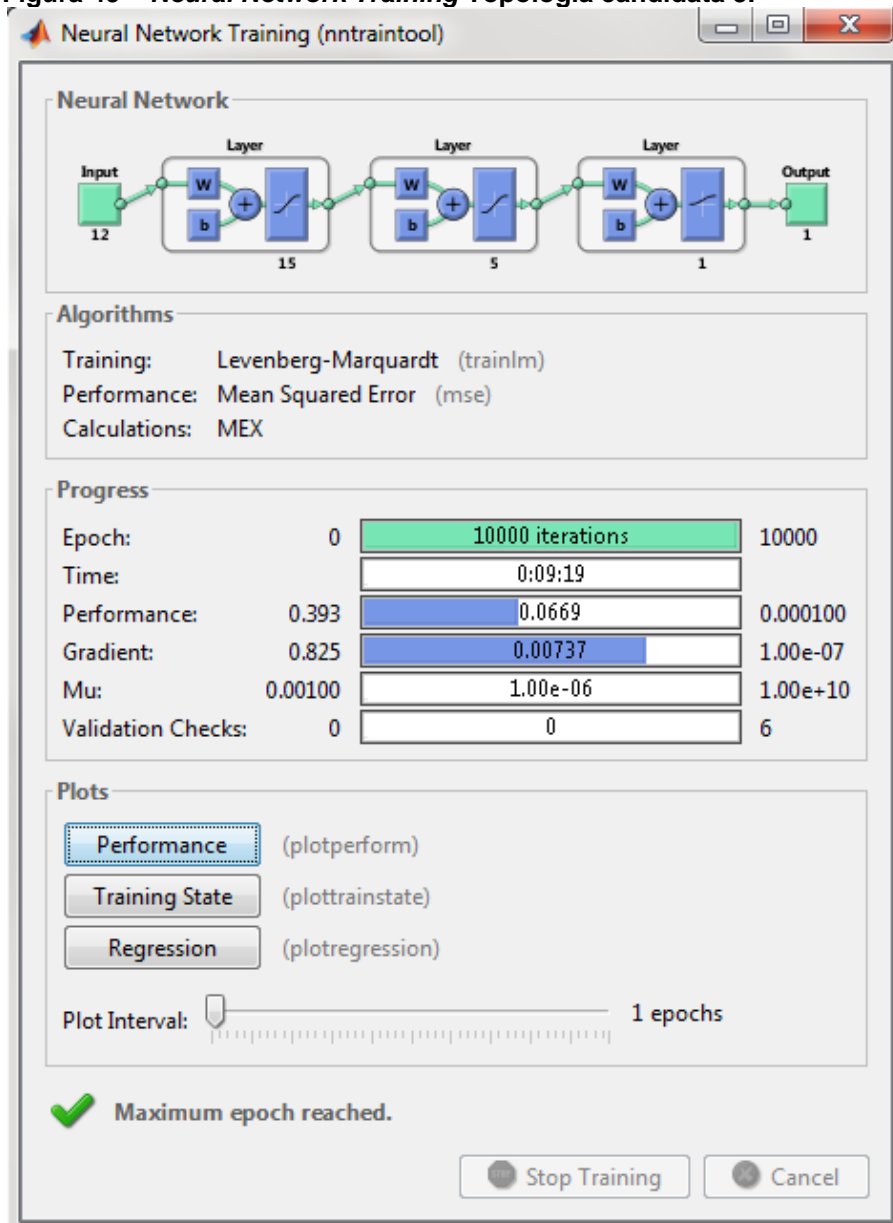


**Fonte: Autoria própria.**

### 4.2.2 Topologia 3

Para essa topologia, utilizou-se como funções de ativação a tangente hiperbólica (primeira e segunda camada escondida) e logística (camada de saída). Com isso, obteve-se um treinamento *off-line* de 9 minutos e 19 segundos, encerrando-se pelo máximo número de épocas (10000) (Figura 49).

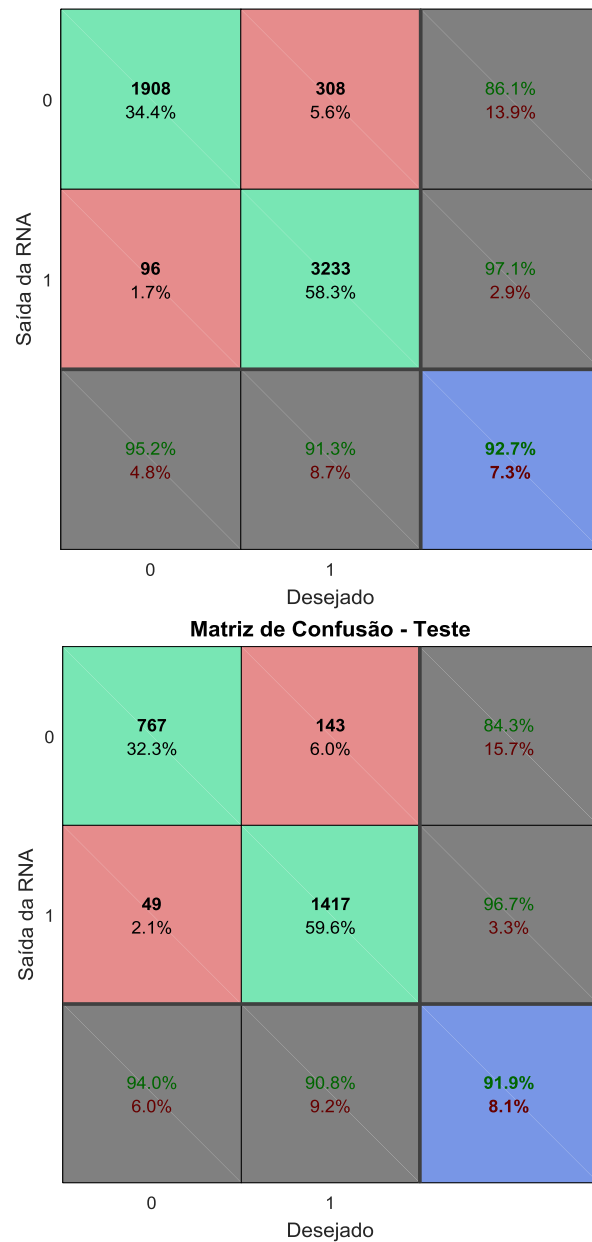
Figura 49 – Neural Network Training Topologia candidata 3.



Fonte: Autoria própria.

Porém, o valor de erro relativo para treinamento foi menor que o valor para teste, 7,3% e 8,1% (quadrantes azul Figura 50) respectivamente, demonstrando uma circunstância de memorização excessiva (*overfitting*) do PMC, em que o mesmo acaba decorando as respostas.

**Figura 50 – Matriz confusão-Treinamento e Teste Topologia candidata 3.**

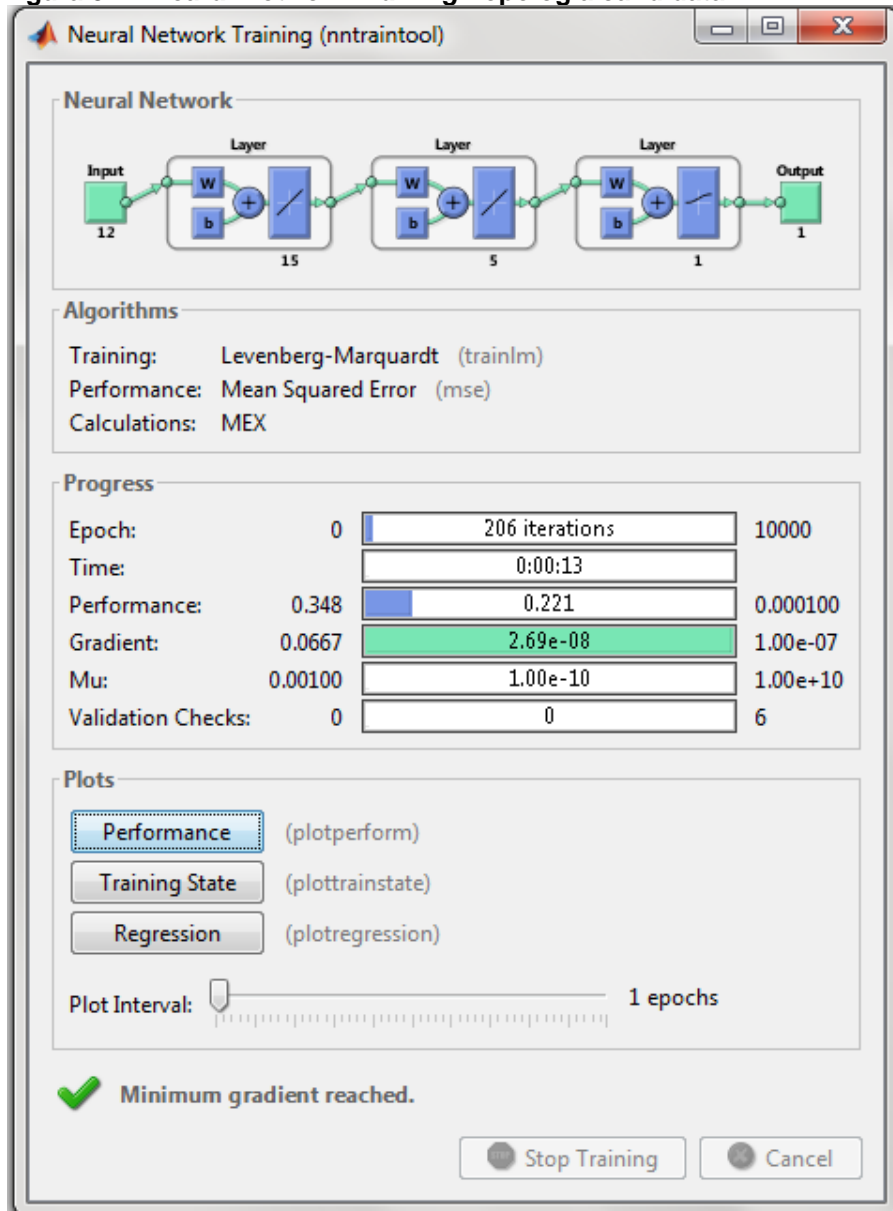


**Fonte: Autoria própria.**

### 4.2.3 Topologia 4

A quarta topologia testada encerrou-se aos 13 segundos, às 206 iterações de épocas (Figura 51). As funções de ativação utilizadas foram função linear para a primeira camada neural escondida, e logística para as demais.

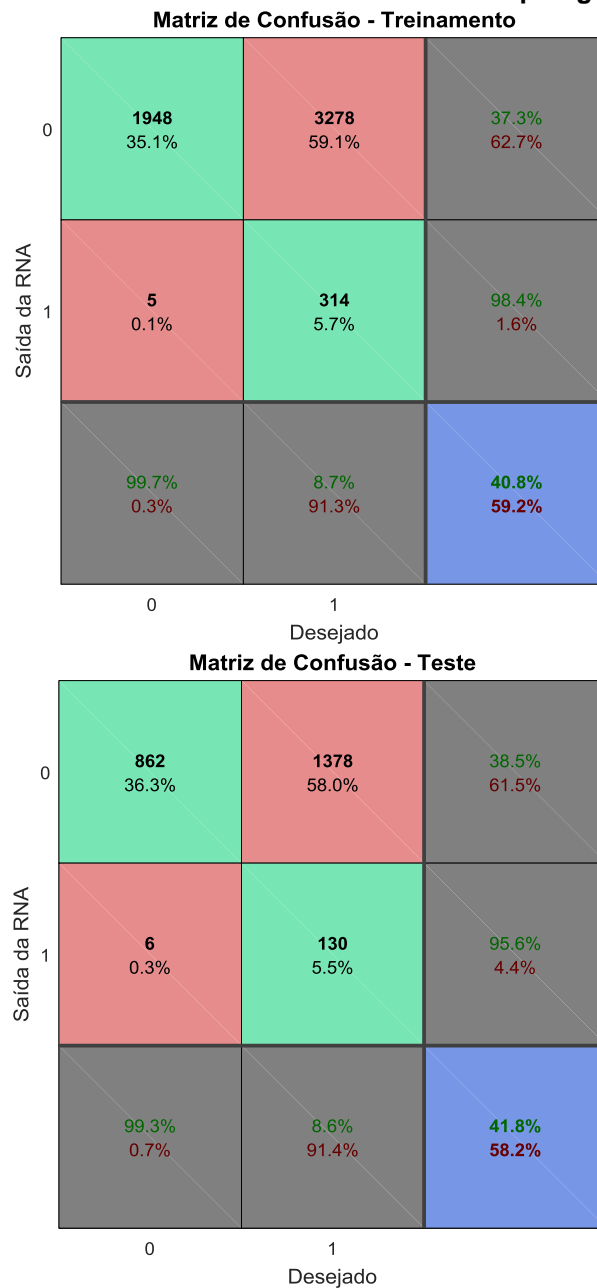
Figura 51 – Neural Network Training Topologia candidata 4.



Fonte: Autoria própria.

Neste caso não houve *overfitting*, já que o erro relativo para treinamento (59,2%) foi maior que para o de teste (58,2%), porém os valores de erro não mostraram-se satisfatórios, conforme Figura 52.

**Figura 52 – Matriz confusão-Treinamento e Teste Topologia candidata 4.**

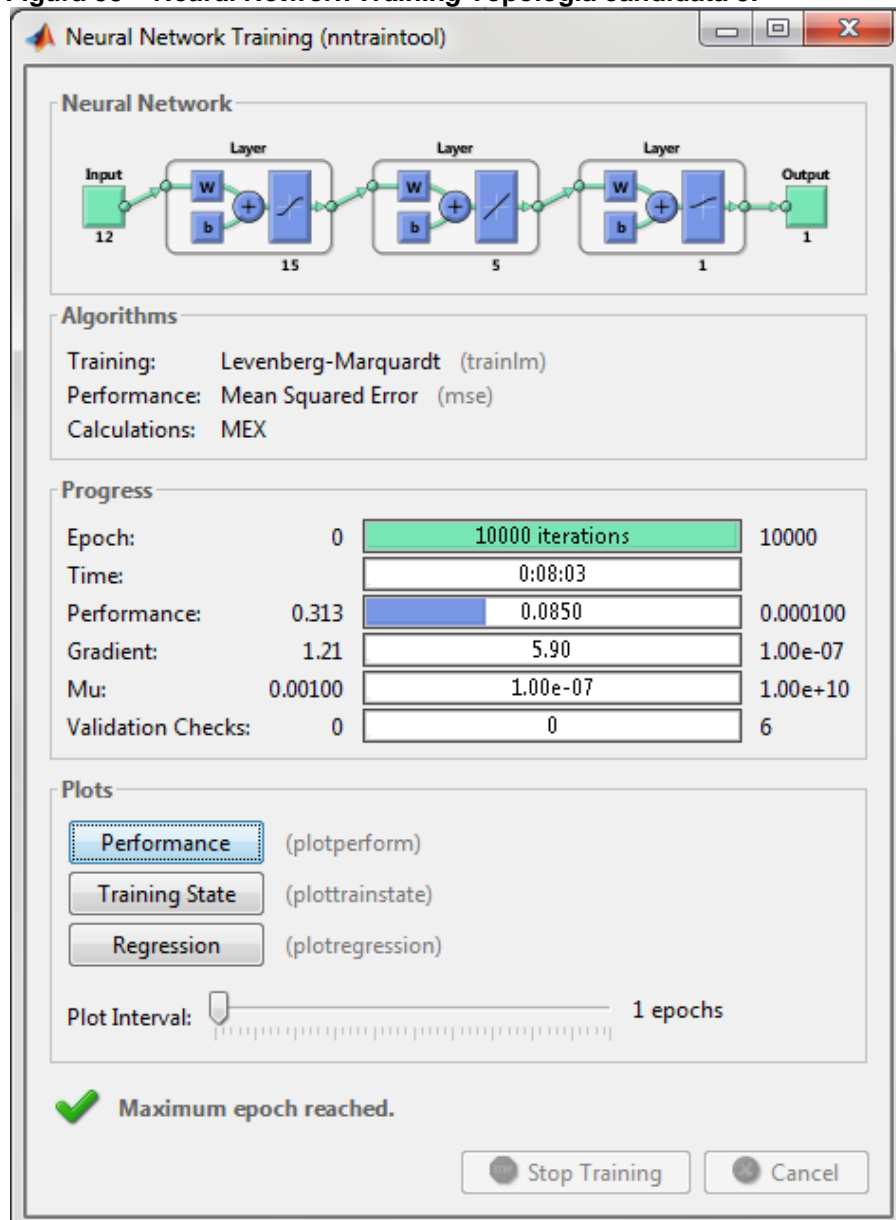


**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.2.4 Topologia 5

Composta pelas funções de ativação tangente hiperbólica (primeira camada neural escondida), função linear (segunda camada neural escondida) e logística (camada neural de saída), a quarta topologia realizou seu treinamento em 8 minutos e 3 segundos, encerrando-se à máxima iteração de épocas (Figura 53).

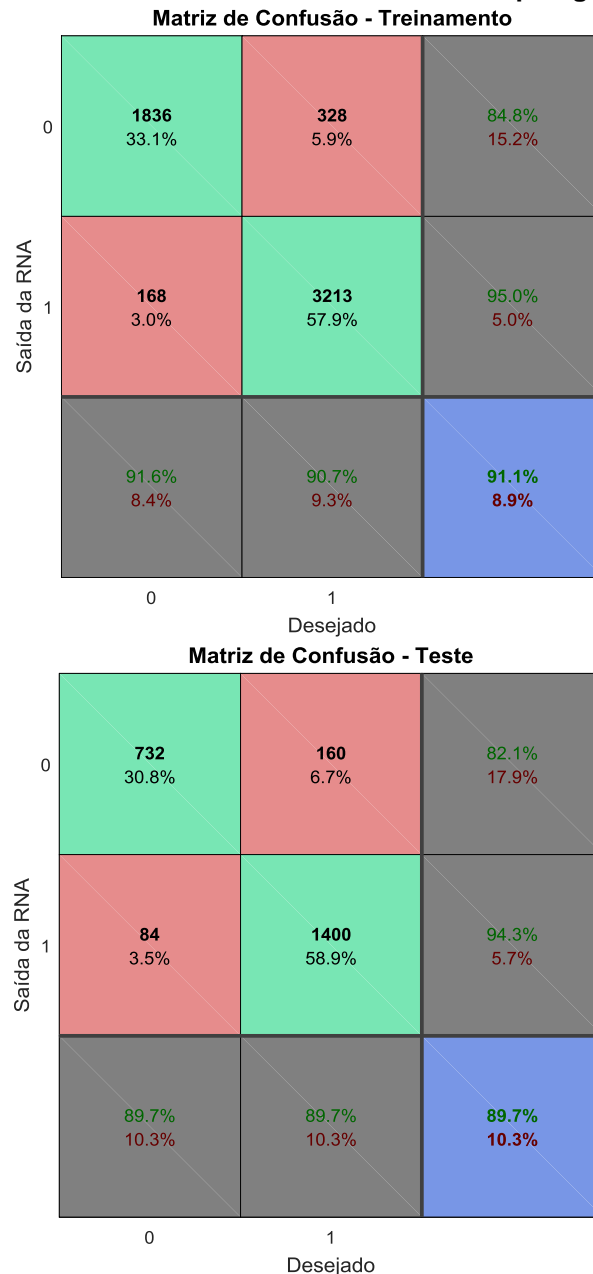
Figura 53 – Neural Network Training Topologia candidata 5.



Fonte: Autoria própria.

Portanto, bem como a topologia 4, ela apresentou memorização excessiva, já que o valor de erro relativo para treinamento (8,9%) foi menor que o valor para teste (10,3%), valores observados nos quadrantes azul da Figura 54.

**Figura 54 – Matriz confusão-Treinamento e Teste Topologia candidata 5.**



**Fonte: Autoria própria.**

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento e implementação de um sistema de proteção diferencial em transformadores de potência aplicando-se técnicas de Redes Neurais Artificiais. O método proposto trata o esquema de proteção diferencial como um problema de classificação de padrões, reconhecendo e classificando faltas internas e externas ao transformador de potência.

Na fase de geração de dados, utilizou-se o programa *ATPDraw* para modelagem de um sistema de potência e, posteriormente, para obtenção dos sinais de correntes primárias e secundárias do transformador de potência para diversas situações em que o mesmo está envolvido durante sua operação. Tais sinais de correntes foram processados de forma automatizada no *software MatLab*, afim de serem dados de entrada para o algoritmo implementado.

Foram gerados cinco casos de situações de faltas, sendo eles: regime permanente (180x12), faltas internas entre a fase-terra no primário (3780x120), faltas entre o transformador de potência e o TC secundário (1320x12), faltas externas aplicadas após o TC secundário (1320x12) e situações de faltas próximo a carga (1320x12), formando uma matriz de banco de dados de 7920 X 12.

Com os dados gerados, e a utilização de janelamento para processamento dos sinais, foi obtido um número expressivo de amostras para entrada da rede neural, sendo 61200 amostras de falta interna a zona de proteção do transformador de potência, 31680 amostras de falta externa a zona de proteção, 2160 amostras de simulação de regime permanente, totalizando em 95040 amostras de dados.

O *MatLab* foi um *software* de importante contribuição para o trabalho, pois permite a simulação de ferramentas computacionais de forma eficiente e rápida, sendo utilizado também para a implementação do algoritmo de RNA.

O uso de RNA foi estrategicamente escolhido pois abrange diversos ramos das ciências e engenharias, tratando-se de um método eficiente para classificação de padrões, objetivo deste trabalho. Para isso, foram estudadas diversas topologias utilizando a arquitetura PMC, de forma que fosse escolhida a que obtivesse resultados melhores e mais confiáveis.



Os resultados foram considerados bons, já que 91% das amostras foram classificadas corretamente (erro de 9%) para um transformador de 25MVA e arquitetura neural do tipo PMC, com janelamento de 31,2ms de amostras.

Cabe notar que diversos casos, combinações de janelamento e topologias foram testadas, porém ainda há muitos outros casos (energização, energização sob falta, sobre-excitação do transformador, energização de banco capacitores, falta no lado estrela do transformador de potência, falta no lado estrela do transformador de potência próximo ao neutro, entre outros) que poderiam ser utilizados como dados de entrada.

Conclui-se então, através os resultados obtidos, que a aplicação das ferramenta inteligente RNA constitui uma nova e importante etapa na análise da proteção diferencial de transformadores de potência.

## REFERÊNCIAS

ALVES, MARLEIDE F.; LOTUFO, ANNA D. P.; LOPES, MARA L. M. **Seleção de variáveis stepwise aplicadas em redes neurais artificiais para previsão de demanda de cargas elétricas**. In: DINCON 2013 – Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, 2013. v.1.

BARBOSA, Daniel. **Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying Principles and Applications**, 3 edn, CRC Press, Boca Raton. IEEE Std. C37.91 (2008). IEEE guide for protecting power transformers. ISBN: 978-0-7381-5389-6, 2007.

CAMINHA, Amadeu C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Edgar Blucher, 1997.

CLAUDIO, RAFAEL A. **Redes neurais artificiais à estimação de curtíssimo prazo do preço da energia elétrica**. São Carlos, 2014.

COURY, Denis V.; OLESKOVICZ, Renan G. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessadores inteligentes**. São Paulo: EESC – USP, 2007.

FONSECA, HUGO L. C. A.; LEAL, MÁRCIO F. **Análise de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando o ATPDraw**. Distrito Federal, 2003.

FREITAS, A. A. C. de, SILVA, I. N. da; SOUZA, A. N. de. **Aplicação de Redes Neurais na Estimação da Temperatura Interna de Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo**. Revista Controle & Automação, V. 13, n. 3, p. 266-274, Nov./Dez., 2002.

FRONTIN, Sergio de Oliveira. **Equipamentos de alta tensão - prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

GALVÃO, Carlos O.; VALENÇA, Mêuser J. S. **Sistemas inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais**. Rio Grande do Sul: Ed. da Universidade Federal, 1999.

HAYKIN, S. **Redes Neurais Princípios e Prática**. 2ª. ed, Bookman Porto Alegre-RS, 2001.

HEWITSON, Les G.; BROWN, Mark; RAMASH, Bem. **Practical Power Systems Protection**. Oxford: Linacre House, Jordan Hill, 2004.

*IEEE Guide for Protecting Power Transformers*. IEEE Standard C37.91-2008, Jan.2008.

MAMEDE FILHO, João. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MAMEDE, João Filho. **Manual de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MAMEDE, João Filho; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. **A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity**. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, n.5, pp. 115-133, 1943.

MORETO, Miguel. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais**. 2005. 126 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J.P.G. **Transformadores: Teoria e Ensaio**. Editora Edgard Blucher Ltda, 1984

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.6: requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**. 2010.

PAITHANKAR, Y. G. BHIDE, S. R. **Fundamentals of Power System Protection**. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2004.

SÁRKÖZY, F. **Gis functions - Interpolation**. Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng., 43:63-86, 1999.

SEGATTO, Ênio C. **Relé diferencial para transformadores de potência utilizando ferramentas inteligentes**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005.

SEGATTO, Ênio C.; COURY, Denis V. **Redes Neurais aplicadas a relés diferenciais para transformadores de potência.** Revista Controle & Automação, Campinas-SP, v.19, n. 1, p. 93-106, jan.-mar. 2008.

SILVA, Ivan N. da.; SPATTI, Danilo H.; FLAUZINO, Rogério A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas.** São Paulo: Artliber, 2010.

STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência.** 2 ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

STIVANELLO, M. E.; GOMES, PAULO C. R. **Inspeção visual industrial automatizada por análise de forma com descritores de Fourier e redes neurais artificiais.** In: SEMINCO – Seminário de Computação, 2006, Blumenau. Anais do XV SEMINCO. Blumenau: Editora da FURB, 2006. p. 29-40.

TARDIVO, Márcio A. **Uma aplicação de redes neurais artificiais para estimação da elevação de temperatura de transformadores monofásicos de distribuição imersos em líquido isolante.** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2012.

TAVARES, KARLA A. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência no ATP.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, 2013.

TAVARES, MARIA C. D., CAMPOS, PAULO G., PRADO, PAULO. **Guia resumido do ATP – Alternative Transient Program.** Apostila. Universidade Estadual de. Capinas, 2003.

WANG, H.; BUTLER, K.L. **Neural Network Modeling of Distribution Transformers With Internal Short Circuit Winding Falts.** In: Proceedings of the 22nd IEEE Power Engineering Society. International Conference on Power Industry Computer Applications. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001, Sidney, 2001.

## APÊNDICE A – Dados de entrada do programa ATP

Arquivo completo de dados de entrada do programa ATP (ATP *file*) para um caso de regime permanente.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, terça-feira 17, 2018
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
$DUMMY, XYZ000
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >< Epsiln>
  .00026      .15
C          1      1      1      1      0      0      1      0
C          1      2      3      4      5      6      7
8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C dados referente ao equivalente de geração, em valores de sequência
51FONTA G1A          7.5962          115.45
52FONTB G1B          7.1003          53.99
53FONTC G1C
C dados referente a Linha de transmissão com parâmetros concentrados
51CH2A LDA          .7186          11.45
52CH2B LDB          .3101          2.41
53CH2C LDC
   NO4A NT1A          .001
   NO4B NT1B          .001
   NO4C NT1C          .001
0
C dados referentes a carga
CHGA          14.616.496
CHGB          14.616.496
CHGC          14.616.496
0
C Resistência de Neutro para medição
NEUT1A          .0001
NEUT1B          .0001
NEUT1C          .0001
RF10A          .001
RF10B          .001
RF10C          .001
RF20A          .001
RF20B          .001
RF20C          .001
RF30A          .001
RF30B          .001
RF30C          .001
RF40A          .001
RF40B          .001
RF40C          .001
RF50A          .001
```

RF50B	.001
RF50C	.001
RF60A	.001
RF60B	.001
RF60C	.001
RF70A	.001
RF70B	.001
RF70C	.001
RF80A	.001
RF80B	.001
RF80C	.001
RF90A	.001
RF90B	.001
RF90C	.001
RFTC2A	.001
RFTC2B	.001
RFTC2C	.001
RFSECA	.001
RFSECB	.001
RFSECC	.001
RFCARA	.001
RFCARB	.001
RFCARC	.001
XX0001	1.001
XX0002	1.001

0

C Dados referentes ao TC1 - FASE A TC DO LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT.-Y  
SEC

TRANSFORMER	.0028	.026TX0001
-------------	-------	------------

0

0.00282842712	0.0262592259
0.00525107738	0.0750263597
0.00805200092	0.131296129
0.00937604273	0.161306673
0.0130507689	0.281348849
0.0269326991	0.750263597
0.0363934345	1.27544811
0.062340771	1.61306673
0.0851843969	1.76311945
0.178251034	1.87565899
0.453547317	2.06322489

9999

1TC1SA XX0001	1.2	.001	200.
---------------	-----	------	------

2CH1A TPRA	.0001	.1	5.
------------	-------	----	----

C segundo transformador - FASE B DO TC DO LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT -  
Y SEC

TRANSFORMER	.0028	.026TX0002
-------------	-------	------------

0

0.00282842712	0.0262592259
0.00525107738	0.0750263597
0.00805200092	0.131296129
0.00937604273	0.161306673
0.0130507689	0.281348849
0.0269326991	0.750263597
0.0363934345	1.27544811
0.062340771	1.61306673
0.0851843969	1.76311945
0.178251034	1.87565899
0.453547317	2.06322489

9999

1TC1SB XX0001	1.2	.001	200.
---------------	-----	------	------

```

2CH1B TPRB .0001 .1 5.
C terceiro transformador - FASE C DO TC DO LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT -
Y SEC
TRANSFORMER .0028 .026TX0003
0
0.00282842712 0.0262592259
0.00525107738 0.0750263597
0.00805200092 0.131296129
0.00937604273 0.161306673
0.0130507689 0.281348849
0.0269326991 0.750263597
0.0363934345 1.27544811
0.062340771 1.61306673
0.0851843969 1.76311945
0.178251034 1.87565899
0.453547317 2.06322489
9999
1TC1SC XX0001 1.2 .001 200.
2CH1C TPRC .0001 .1 5.
C IMPEDÂNCIA NO SECUNDÁRIO DO TC DO LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. POT.
TC1SA 3.
1
C IMPEDÂNCIA NO SECUNDÁRIO DO TC DO LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. POT.
TC1SB 3.
1
C IMPEDÂNCIA NO SECUNDÁRIO DO TC DO LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. POT.
TC1SC 3.
1
C Dados referentes ao TC2 - FASE A TC DO LADO SECUND DO TRANSF. DE POT.-Y
SEC
TRANSFORMER .0028 .026TX0004
0
0.00282842712 0.0262592259
0.00525107738 0.0750263597
0.00805200092 0.131296129
0.00937604273 0.161306673
0.0130507689 0.281348849
0.0269326991 0.750263597
0.0363934345 1.27544811
0.062340771 1.61306673
0.0851843969 1.76311945
0.178251034 1.87565899
0.453547317 2.06322489
9999
1TC2SA XX0002 1.2 .001 2.E3
2TSECA NO3A .0001 .1 5.
C segundo transformador - FASE B DO TC DO LADO SECUND DO TRANSF. DE POT -Y
SEC
TRANSFORMER .0028 .026TX0005
0
0.00282842712 0.0262592259
0.00525107738 0.0750263597
0.00805200092 0.131296129
0.00937604273 0.161306673
0.0130507689 0.281348849
0.0269326991 0.750263597
0.0363934345 1.27544811
0.062340771 1.61306673
0.0851843969 1.76311945
0.178251034 1.87565899
0.453547317 2.06322489

```

```

          9999
1TC2SB XX0002          1.2  .001  2.E3
2TSECB NO3B          .0001  .1  5.
C terceiro transformador - FASE C DO TC DO LADO SECUND DO TRANSF. DE POT -Y
SEC
TRANSFORMER          .0028  .026TX0006
0
  0.00282842712      0.0262592259
  0.00525107738      0.0750263597
  0.00805200092      0.131296129
  0.00937604273      0.161306673
  0.0130507689       0.281348849
  0.0269326991       0.750263597
  0.0363934345       1.27544811
  0.062340771        1.61306673
  0.0851843969       1.76311945
  0.178251034        1.87565899
  0.453547317        2.06322489
          9999
1TC2SC XX0002          1.2  .001  2.E3
2TSECC NO3C          .0001  .1  5.
C IMPEDANCIA NO SECUNDÁRIO DO TC8
TC2SB                3.
1
C IMPEDANCIA NO SECUNDÁRIO DO TC8
TC2SA                3.
1
C IMPEDANCIA NO SECUNDÁRIO DO TC8
TC2SC                3.
1
C dados referente ao TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA COM REPARTIÇÕES
$INCLUDE, C:\ATPDraw\Projects\trafo.lib
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C dados referentes as chaves do sistema elétrico
C dados referentes as chaves do sistema elétrico
G1A  CH1A          -1.    100.
G1B  CH1B          -1.    100.
G1C  CH1C          -1.    100.
NO3A NO4A          -1.    100.
NO3B NO4B          -1.    100.
NO3C NO4C          -1.    100.
NT1A CH2A          -1.    100.
NT1B CH2B          -1.    100.
NT1C CH2C          -1.    100.
LDA  CHGA          -1.    100.
LDB  CHGB          -1.    100.
LDC  CHGC          -1.    100.
0
C Chave para Falta a 10% Primário Delta
C Chave para Falta a 10% Primário Delta
N10TA RF10A        1.    100.
N10TB RF10B        1.    100.
N10TC RF10C        1.    100.
0
C Chave para Falta a 20% Primário Delta
C Chave para Falta a 20% Primário Delta
N20TA RF20A        1.    100.
N20TB RF20B        1.    100.
N20TC RF20C        1.    100.
0

```



```

C Chave para Falta a 30% Primário Delta
C Chave para Falta a 30% Primário Delta
N30TA RF30A      1.      100.
N30TB RF30B      1.      100.
N30TC RF30C      1.      100.
0
C Chave para Falta a 40% Primário Delta
C Chave para Falta a 40% Primário Delta
N40TA RF40A      1.      100.
N40TB RF40B      1.      100.
N40TC RF40C      1.      100.
0
C Chave para Falta a 50% Primário Delta
C Chave para Falta a 50% Primário Delta
N50TA RF50A      1.      100.
N50TB RF50B      1.      100.
N50TC RF50C      1.      100.
0
C Chave para Falta a 60% Primário Delta
C Chave para Falta a 60% Primário Delta
N60TA RF60A      1.      100.
N60TB RF60B      1.      100.
N60TC RF60C      1.      100.
0
C Chave para Falta a 70% Primário Delta
C Chave para Falta a 70% Primário Delta
N70TA RF70A      1.      100.
N70TB RF70B      1.      100.
N70TC RF70C      1.      100.
0
C Chave para Falta a 80% Primário Delta
C Chave para Falta a 80% Primário Delta
N80TA RF80A      1.      100.
N80TB RF80B      1.      100.
N80TC RF80C      1.      100.
0
C Chave para Falta a 90% Primário Delta
C Chave para Falta a 90% Primário Delta
N90TA RF90A      1.      100.
N90TB RF90B      1.      100.
N90TC RF90C      1.      100.
0
C Chave para faltas logo após o TC2
C Chave para faltas logo após o TC2
NO3A RFTC2A      1.      100.
NO3B RFTC2B      1.      100.
NO3C RFTC2C      1.      100.
0
C Chave para faltas entre o SEC do TRAFO e TC2
C Chave para faltas entre o SEC do TRAFO e TC2
TSECA RFSECA     1.      100.
TSECB RFSECB     1.      100.
TSECC RFSECC     1.      100.
0
C Chave para faltas próximo a carga
C Chave para faltas próximo a carga
CHGA RFCARA      1.      100.
CHGB RFCARB      1.      100.
CHGC RFCARC      1.      100.
0
/SOURCE

```

```
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART ><
TSTOP >
C dados referente ao gerador
14FONTA 112676.528 60. -1.
100.
14FONTB 112676.528 60. -120. -1.
100.
14FONTC 112676.528 60. -240. -1.
100.
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```