



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC - 02
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO V
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

**PESQUISA DE UMA SOLUÇÃO PRÁTICA PARA A PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
COM A UTILIZAÇÃO DE RDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

**Ricardo Caneloi dos Santos
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

**Eduardo César Senger *
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um algoritmo baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) para a implementação de uma proteção de distância de linhas de transmissão. Tal algoritmo possui como principal contribuição a possibilidade de ser utilizado em qualquer linha de transmissão, independentemente da configuração ou do nível de tensão desta. Portanto, este algoritmo não necessita de nenhum ajuste na topologia ou nos parâmetros da RNA (retreinamento), quando aplicado à diferentes sistemas elétricos. Esta característica diferencia a solução proposta, das demais baseadas em RNA, sempre projetadas para operarem numa única e exclusiva linha de transmissão (geometria de torre, condutores, comprimento e nível de tensão pré-determinados), inviabilizando sua implementação num relé comercial.

PALAVRAS-CHAVE

Relé Digital, Proteção de Distância, Redes Neurais Artificiais, Proteção de Linhas de Transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Notoriamente, a linha de transmissão é um dos componentes mais importantes do sistema elétrico, visto que esta proporciona a transferência de grandes blocos de energia dos centros geradores até os consumidores. Em consequência das grandes distâncias percorridas pelas linhas de transmissão, sempre expostas às mais diversas condições climáticas, esses componentes apresentam um elevado índice de falhas, necessitando, portanto, de um eficiente sistema de proteção. Visando melhorar o desempenho da proteção de distância, a mais utilizada nas linhas de transmissão, novos algoritmos estão surgindo como alternativa aos algoritmos convencionais. Entre os novos algoritmos, os baseados em RNA se destacam, pois apresentam resultados bastante promissores com relação à precisão e tempo de atuação. Entretanto, tais algoritmos não são utilizados na prática devido, principalmente, ao fato destes operarem exclusivamente na linha de transmissão para a qual a RNA foi treinada. Além disso, tais algoritmos atuam como classificadores de sinais e somente indicam se o defeito ocorreu dentro ou fora da zona de proteção do relé.

Para superar as limitações existentes nos algoritmos baseados em RNA, viabilizando a implementação destes num relé comercial, foi desenvolvido um algoritmo baseado nesta tecnologia com as seguintes características: aplicável a qualquer linha de transmissão, independentemente das particularidades da mesma (geometria de torre, condutores, comprimento e nível de tensão); atua com aproximador de função, indicando com precisão o local do defeito. A fim de atingir estas características, a exemplo da proteção de distância convencional, o algoritmo desenvolvido conta com seis elementos de medição, porém baseados em RNA. Cada elemento de medição é formado pelos estágios de pré-processamento, RNA e pós-processamento, conforme ilustra, genericamente, a Figura 1. Os sinais $V(t)$ e $I(t)$ são provenientes dos secundários dos TP e TC.

*AV. Professor Luciano Gualberto, travessa 3, 158 - Bloco A – Sala A2-14
CEP 05508-900 – São Paulo - SP - BRASIL
Tel.: (11) 3091-5316 - e-mail: ricardo.santos@poli.usp.br - e-mail: senger@pea.usp.br

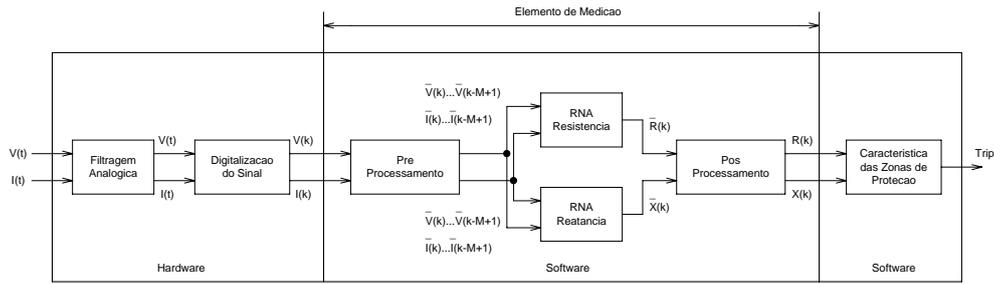


FIGURA 1 – Estágios que formam um elemento de medição genérico

2.0 - ELEMENTOS DE MEDIÇÃO

Para a determinação da impedância da falta, o relé de distância convencional possui seis elementos de medição. Três desses elementos são denominados de elementos de fase (AB, BC e CA) e cobrem os defeitos que envolvem mais de uma fase. Os outros três elementos são denominados de elementos de terra (AN, BN e CN) e cobrem os casos de defeitos que envolvem uma fase e a terra. Portanto, com esses seis elementos de medição é possível cobrir os dez tipos de defeitos possíveis numa linha de transmissão trifásica: monofásico (AN, BN e CN), dupla-fase (AB, BC e CA), dupla-fase e terra (ABN, BCN e CAN), e trifásico (ABC e ABCN) (1) (3).

O algoritmo apresentado neste trabalho é uma adaptação do relé de distância convencional, visto que os seus elementos de medição são implementados com RNA. Essa proposta agrega as vantagens das RNA à proteção de distância convencional, sem restringir a utilização do algoritmo desenvolvido a uma única linha de transmissão. Para explicar o algoritmo proposto, todos os estágios apresentados na Figura 1 são detalhados a seguir.

2.1 Estágio das Redes Neurais Artificiais

A etapa das RNA é o núcleo do algoritmo desenvolvido e consta, basicamente, de redes previamente treinadas para aproximar funções. No presente trabalho, são utilizados dois tipos de redes neurais: a primeira treinada para determinar o valor da resistência (rede R); a segunda treinada para determinar o valor de reatância (rede X). Estas duas redes determinam esses valores a partir das amostras de tensão e corrente, aplicadas nas suas entradas, por intermédio dos seus respectivos vetores de entrada. Os vetores de entrada utilizados nas RNA, presentes em cada elemento de medição, são obtidos através de um conveniente equacionamento do modelo simplificado para uma linha de transmissão trifásica, mostrado na Figura 2 (4). Tal procedimento conduz as expressões 1 - 6, capazes de representar qualquer defeito sólido no modelo adotado.

Os parâmetros R_n e L_n representam a impedância do caminho de retorno, percorrido pela corrente i_n .

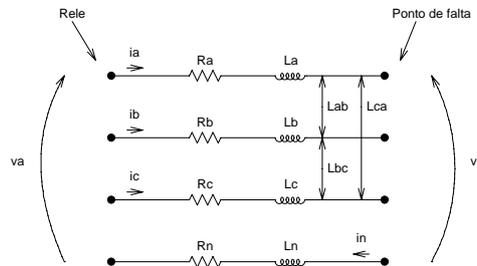


FIGURA 2 – Modelo adotado para deduzir os vetores de entrada das RNA

1- Fase **A** em curto-circuito com a terra

$$v_a' = 0 \quad \Rightarrow \quad v_a = R^1 \cdot i_{ar} + L^1 \cdot \frac{d}{dt} i_{ax} \quad (1)$$

2- Fase **B** em curto-circuito com a terra

$$v_b' = 0 \quad \Rightarrow \quad v_b = R^1 \cdot i_{br} + L^1 \cdot \frac{d}{dt} i_{bx} \quad (2)$$

3- Fase **C** em curto-circuito com a terra

$$v_c' = 0 \quad \Rightarrow \quad v_c = R^1 \cdot i_{cr} + L^1 \cdot \frac{d}{dt} i_{cx} \quad (3)$$

4- Curto-circuito entre as fases **A** e **B** (AB ou ABN)

$$v_{ab} = R^1 \cdot (i_a - i_b) + L^1 \cdot \frac{d}{dt} (i_a - i_b) \quad (4)$$

5- Curto-circuito entre as fases **B** e **C** (BC ou BCN)

$$v_{bc} = R^1 \cdot (i_b - i_c) + L^1 \cdot \frac{d}{dt} (i_b - i_c) \quad (5)$$

6- Curto-circuito entre as fases **C** e **A** (CA ou CAN)

$$v_{ca} = R^1 \cdot (i_c - i_a) + L^1 \cdot \frac{d}{dt}(i_c - i_a) \quad (6)$$

onde:

$$i_{ar} = i_a + Kr \cdot i^o \quad (7) \quad i_{ax} = i_a + Kx \cdot i^o \quad (8) \quad i_{br} = i_b + Kr \cdot i^o \quad (9)$$

$$i_{bx} = i_b + Kx \cdot i^o \quad (10) \quad i_{cr} = i_c + Kr \cdot i^o \quad (11) \quad i_{cx} = i_c + Kx \cdot i^o \quad (12)$$

sendo,

$$Kr = \frac{R^0 - R^1}{R^1} = \frac{r^0 - r^1}{r^1} \quad (13) \quad Kx = \frac{L^0 - L^1}{L^1} = \frac{l^0 - l^1}{l^1} \quad (14)$$

R^1, R^0 = Resistências de seqüência positiva e zero do trecho com defeito (Ohms);

r^1, r^0 = Resistências de seqüência positiva e zero da linha (Ohms/km)

L^0, L^1 = Indutâncias de seqüência positiva e zero do trecho com defeito (Ohms);

l^0, l^1 = Indutâncias de seqüência positiva e zero da linha (Ohms/km);

v_a, v_b e v_c = Tensão nas fases **A**, **B** e **C** no local do relé;

v'_a, v'_b e v'_c = Tensão nas fases **A**, **B** e **C** no local da falta;

i_a, i_b e i_c = Corrente de linha nas fases **A**, **B** e **C**;

i^0 = Corrente de seqüência zero;

Kr e Kx = Fator de compensação.

É importante observar nas expressões 1 - 6 que os parâmetros de seqüência positiva da linha de transmissão estão sempre relacionados com as grandezas derivadas dos sinais de tensão e corrente, que são utilizados como entrada das RNA. Assim, por exemplo, as expressões 1 - 3 são utilizadas para gerar os sinais que formam os vetores de entrada dos elementos de terra, enquanto que as expressões 4 - 6 são utilizadas para gerar os sinais que formam os vetores de entrada dos elementos de fase. Isso significa que a expressão 4 define o vetor de entrada do elemento AB e, portanto, que as Redes R e X deste elemento recebem simultaneamente janelas de dados com M amostras dos sinais v_{ab} e i_{ab} e estimam continuamente os valores de resistência (R^1) e reatância (X^1) "vistas" pelo relé. A Figura 3 apresenta as RNA dos elementos de medição AB, para uma janela de dados de M amostras. As duas redes possuem estruturas exatamente iguais, diferindo apenas nos seus pesos, uma vez que uma das redes é treinada para estimar o valor de resistência e a outra para estimar o valor de reatância.

Conforme observado na Figura 3, tanto os valores de entrada, como os valores de saída da rede neural, encontram-se no sistema p.u.. A utilização de RNA que respondem a sinais no sistema p.u. se deve a dois fatores: a-) Imposição da função de ativação utilizada nos neurônios das RNA (tangente hiperbólica, -1 a $+1$); b-) Parte do esquema para proporcionar um funcionamento genérico do algoritmo, ficando este independente do nível de tensão da linha de transmissão protegida.

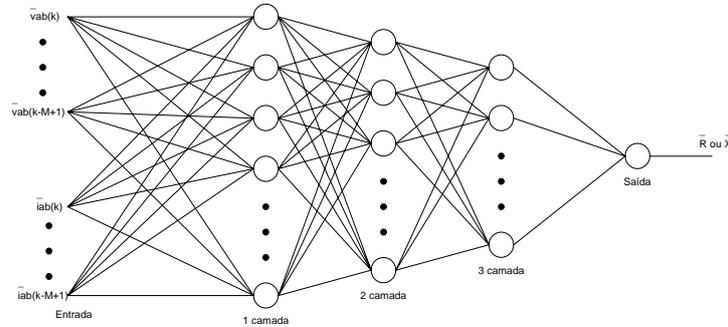


FIGURA 3 – Redes R e X do elemento de fase AB

2.2 Estágio do Pré-Processamento

Conforme observado na Figura 1, este estágio recebe amostras de tensão e corrente provenientes dos TP e TC conectados nas três fases da linha de transmissão, permitindo que sejam gerados os sinais convenientes para formar os vetores de entrada das RNA presentes em cada elemento de medição, segundo as expressões 1 - 6. Além disso, este estágio também aplica o sistema p.u. nas janelas de dados de tensão e corrente, que formam os vetores de entrada das RNA. A aplicação do sistema p.u. a uma janela de dados é realizada a partir da divisão de todos os seus elementos (amostras), pelo elemento de maior valor absoluto. Quando este procedimento é realizado numa janela de dados de tensão, o maior elemento da janela é chamado de V_b (tensão de base da janela). Já quando o procedimento ocorre numa janela de dados de corrente, o maior elemento é chamado de I_b (corrente de base da janela). A cada nova janela de dados a relação entre V_b e I_b gera Z_b , denominado de impedância de base da janela de dados. Esse procedimento é retratado nos pontos (1 - 5) descritos na seqüência, para uma janela de M amostras se deslocando sobre os sinais v_{ab} e i_{ab} (sinais de entrada do elemento de fase AB). O índice k indica a amostra mais recente da janela de dados.

1- Sinais de entrada para o elemento AB

$$v_{ab} = [v_{ab(k)} \quad \dots \quad v_{ab(k-M+1)}]$$

$$i_{ab} = [i_{ab(k)} \quad \dots \quad i_{ab(k-M+1)}]$$

2- Determina os valores de base das janelas de tensão (v_{ab}) e corrente (i_{ab}) para o instante da amostra k

$$Vb_{ab(k)} = \max [|v_{ab(k)}| \quad \dots \quad |v_{ab(k-M+1)}|]$$

$$Ib_{ab(k)} = \max [|i_{ab(k)}| \quad \dots \quad |i_{ab(k-M+1)}|]$$

3- Determina a impedância de base para o instante da amostra k

$$Zb_{ab(k)} = \frac{Vb_{ab(k)}}{Ib_{ab(k)}} \quad (15)$$

4- Aplica p.u. nas janelas de dados de tensão e corrente

$$\bar{v}_{ab} = \frac{v_{ab}}{Vb_{ab(k)}} = [\bar{v}_{ab(k)} \quad \dots \quad \bar{v}_{ab(k-M+1)}]$$

$$\bar{i}_{ab} = \frac{i_{ab}}{Ib_{ab(k)}} = [\bar{i}_{ab(k)} \quad \dots \quad \bar{i}_{ab(k-M+1)}]$$

5- Forma os vetores de entrada das RNA

$$\text{Vetor de entrada}(AB) = \begin{bmatrix} \bar{v}_{ab} \\ \bar{i}_{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{ab(k)} \\ \vdots \\ \bar{v}_{ab(k-M+1)} \\ \bar{i}_{ab(k)} \\ \vdots \\ \bar{i}_{ab(k-M+1)} \end{bmatrix}$$

Convém salientar que tal processo de aplicação do sistema p.u. não consta somente da adequação dos valores de entrada das RNA, visto que este gera uma impedância de base Zb que possibilita a transformação dos valores de resistência e reatância de p.u. para Ohms, conforme discutido no estágio de pós-processamento – próximo item.

2.3 Estágio de Pós-Processamento

Este estágio transforma em Ohms, os valores de resistência e reatância (em p.u.) presentes nas saídas das RNA. Essa transformação consiste simplesmente em multiplicar a saída da rede (resistência ou reatância em p.u.) pelo valor de Zb , (impedância de base) calculado através dos valores de Vb (tensão de base) e Ib (corrente de base), definidos para cada janela de dados de tensão e corrente que formam o vetor de entrada (vide expressão 15). A partir dos valores de resistência e reatância em Ohms e da característica de atuação ajustada para o elemento de fase 21 ou para o elemento de terra 21N, o relé pode gerar ou não o sinal de *trip*. Este processo é ilustrado na Figura 4.

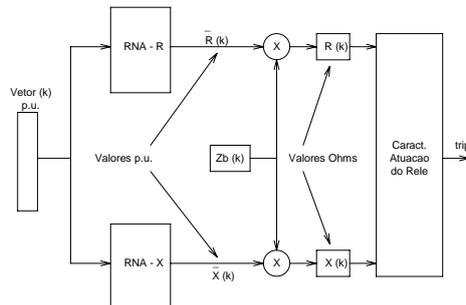


FIGURA 4 – Estágio de Pós-Processamento – transformação de R e X (p.u.) para Ohms

Este procedimento é similar à obtenção dos valores em Ohms quando se trabalha com o sistema p.u. convencional, a menos de que, neste caso, os valores de base e, portanto, em Ohms são recalculados a cada nova amostra que entra nas janelas de dados de tensão e corrente. Sendo assim, o processo apresentado pode ser entendido como um sistema p.u. “dinâmico”.

2.4 Implementação dos Elementos de Medição

Depois de discutidos todos os estágios que constituem um elemento de medição genérico (Figura 1), neste item são apresentados, a título de exemplo, as implementações dos elementos de fase AB e de terra AN. É importante salientar que todos os elementos de fase possuem a estrutura apresentada na Figura 5, diferindo apenas nos sinais de entrada utilizados, neste caso relativos ao elemento de fase AB. Analogamente, todos os elementos de terra possuem a estrutura apresentada na Figura 6, com exceção dos sinais de entrada utilizados, neste caso relativos ao elemento de terra AN. Os dois elementos de medição são apresentados supondo uma janela de M amostras.

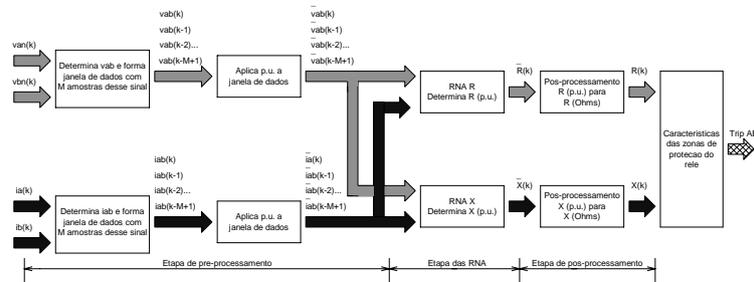


Figura 5 – Elemento de fase AB

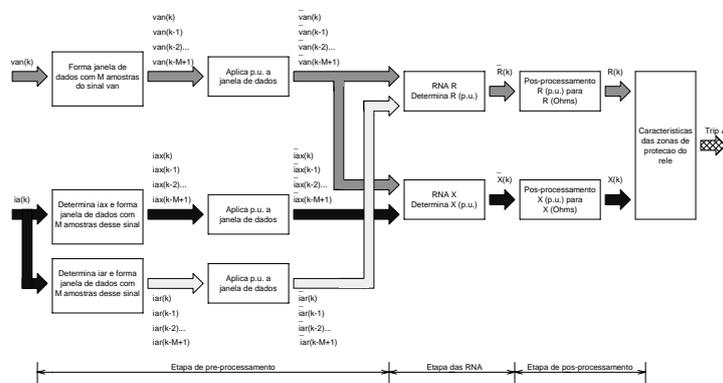


Figura 6 – Elemento de Terra AN

3.0 - METODOLOGIA DE TRAINAMENTO DAS RNA

Neste trabalho foram considerados dois métodos alternativos à modelagem do sistema trifásico completo para gerar os conjuntos de treinamento das RNA R e X, que são:

- Modelo monofásico de segunda ordem;
- Modelo monofásico de primeira ordem.

O primeiro modelo é o mais apropriado, pois representa todos os modos de oscilação do sistema. No entanto, as RNA treinadas com sinais provenientes desse modelo não apresentaram bons resultados. Já o segundo modelo, apesar de não representar todos os modos de oscilação do sistema, gerou conjuntos de treinamento que levaram as RNA aos resultados esperados (4). A utilização de um modelo monofásico de primeira ordem simplificou e agilizou significativamente o processo de treinamento das RNA, uma vez que evita a necessidade de modelagem do sistema trifásico completo para gerar os sinais de treinamento. Por outro lado, convém ressaltar que o referido modelo não contempla a situação de ondas trafegantes, comum em linhas longas com níveis de tensão elevados. A influência dessa restrição no desempenho das RNA operando num sistema trifásico real é discutida nos itens seguintes.

O sistema monofásico de primeira ordem utilizado para gerar os sinais de treinamento das RNA é mostrado na Figura 7. Esse sistema consta da tensão da barra A alimentando uma carga através de uma resistência e uma indutância, representando a impedância série de seqüência positiva de uma linha de transmissão. A condição de falta é simulada através do fechamento de uma chave K no instante $t = 0$.

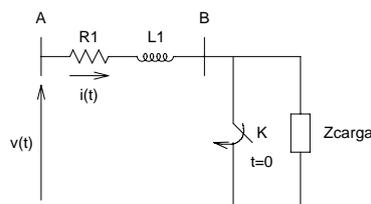


FIGURA 7 – Sistema monofásico de primeira ordem

Como ressaltado anteriormente, é necessário extrair dois conjuntos de treinamento do modelo adotado: um para treinar a rede que estima a resistência (rede R) e outro para treinar a rede que estima a reatância (rede X). Para gerar os conjuntos de treinamento das RNA, foram geradas equações, em linguagem Matlab, representativas das situações de pré-falta e falta do modelo considerado. As equações são executadas repetidas vezes, com diferentes valores de fator de potência da carga, constante de tempo de linha e instante do defeito, formando, após cada execução, janelas de dados de tensão e corrente, além de determinar os valores de resistência e reatância referentes a cada situação simulada. As equações são descritas para gerarem amostras de tensão, corrente, resistência e reatância em p.u., desvinculando o conjunto de treinamento de um nível de tensão específico, tornando o conjunto de treinamento genérico. Após um número pré-determinado de equações executadas, são formados os conjuntos de treinamento, constituídos por vetores de entrada e saída, conforme ilustrado na Figura 8. As matrizes apresentadas representam os conjuntos de treinamento das redes R e X. Estes conjuntos são formados por vetores de entrada com janelas de dados que contém M amostras dos sinais de tensão e corrente, além de vetores de saída com valores de resistência (R) e reatância (X). Para cada vetor de entrada existe um valor de R ou X associado, ou seja, o vetor de entrada P está associado aos valores R^P e X^P , enquanto que o vetor de entrada S , que está associado a R^S e X^S .

As RNA são MLP (*Multilayer Perceptron*) e utilizaram treinamento supervisionado com algoritmo *Backpropagation* (2) (4) (5). Tal opção é típica para a aplicação de RNA em sistemas de potência (7).

$$\begin{bmatrix} -P & -S \\ v_k & \dots & v_k \\ \vdots & & \vdots \\ -P & -S \\ v_{k-M+1} & v_{k-M+1} \\ -P & -S \\ i_k & i_k \\ \vdots & \vdots \\ -P & -S \\ i_{k-M+1} & \dots & i_{k-M+1} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \overline{R}^P & \dots & \overline{R}^S \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -P & -S \\ v_k & \dots & v_k \\ \vdots & & \vdots \\ -P & -S \\ v_{k-M+1} & v_{k-M+1} \\ -P & -S \\ i_k & i_k \\ \vdots & \vdots \\ -P & -S \\ i_{k-M+1} & \dots & i_{k-M+1} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \overline{X}^P & \dots & \overline{X}^S \end{bmatrix}$$

FIGURA 8 – Matrizes para o treinamento das Redes R e X – Valores em p.u.

4.0 - RESULTADOS DO ALGORITMO BASEADO EM RNA

Durante a fase de definição da arquitetura das RNA (R e X), foram avaliadas redes com diversos tamanhos de janelas de dados e taxas de amostragem. Os resultados alcançados no treinamento dessas redes indicam, após uma análise detalhada, que redes com janela de dados de 16 amostras e taxas de amostragem de 32 amostras por ciclo (60 Hz) são mais apropriadas para a implementação do algoritmo proposto (4). Tais redes receberam as denominações Rede-32-16-r e Rede-32-16-x em função da taxa de amostragem e da janela de dados utilizadas, além do tipo de resposta emitida por cada uma delas – resistência (r) ou reatância (x). Ambas as redes possuem quatro camadas com: 32 neurônios de entrada; 65 e 8 neurônios nas camadas ocultas e 1 neurônio na camada de saída. No processo de treinamento a Rede-32-16-r atingiu um erro de $6,42 \cdot 10^{-5}$ e a Rede-32-16-x atingiu um erro de $2,95 \cdot 10^{-5}$.

Neste item as referidas redes são avaliadas frente às condições reais de operação de uma linha de transmissão trifásica, possibilitando, inclusive, constatar a reação dessas redes frente às situações de defeito que resultam em ondas trafegantes, situações estas não contempladas no processo de treinamento das RNA, uma vez que se utilizou um modelo de primeira ordem para gerar os sinais de treinamento. Tal avaliação será realizada considerando os tempos de resposta do algoritmo, ou seja, os tempos de *trip* (*Ttrip*) e estabilização (*Testab*) do mesmo.

As linhas utilizadas para avaliar o algoritmo são típicas do sistema brasileiro nos níveis de 138kV, 230kV, 345kV, 500kV e 765kV, e possuem comprimento e carregamento compatíveis com esses níveis.

As situações operativas das linhas de transmissão adotadas foram geradas através do Simulink (*Power System Toolbox*), considerando as seguintes variações: tipo de defeito (fase-terra, dupla-fase, dupla-fase-terra e trifásico); distância do defeito (20%, 50% e 80% do comprimento da linha de transmissão); resistência de falta (0Ω, 10Ω e 20Ω); impedância do equivalente no terminal do relé (30%, 100% e 120% do valor real); ângulo da tensão no instante do defeito (0°, 45° e 90°); nível de tensão (138kV, 230kV, 345kV, 500kV e 765kV).

Após o algoritmo ser submetido à 12 situações operativas diferentes em cada nível de tensão considerado, a qualidade da resposta emitida por este é medida segundo dois indicadores principais (ver Figura 9):

Ttrip: Tempo para o algoritmo gerar três respostas consecutivas no interior da primeira zona de proteção do relé (Mho), ajustada para 85% da linha de transmissão.

Testab: Tempo para o algoritmo emitir respostas sucessivas com um erro menor do que 5%, com relação ao valor correto (Z_{cor}) da impedância de falta.

A Tabela 1 apresenta os tempos médios de *trip* e *estabilização* do algoritmo, frente a 12 situações operativas distintas, em cada nível de tensão considerado, portanto 60 casos de teste para o algoritmo.

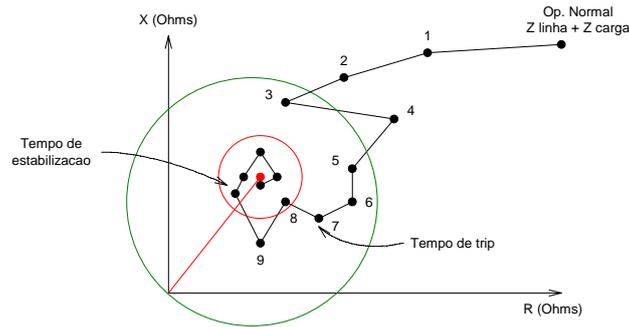


FIGURA 9 – Tempos de *trip* (T_{trip}) e estabilização (T_{estab}) do algoritmo

TABELA 1 – Tempos médios de estabilização e *trip* (ms)

Tensão (kV)	T_{estab}	T_{trip}
138	12,70	8,72
230	15,91	8,54
345	17,00	10,55
500	35,08	7,63
765	39,25	8,04
Tempo médio	23,99	8,69

A título de exemplo a Figura 10 apresenta, no plano R-X, a impedância calculada pelos elementos de medição do algoritmo proposto, frente a defeitos numa linha de transmissão de 345 kV e 145 km. Nos três casos apresentados o defeito ocorre no meio da linha de transmissão e o ângulo da tensão é de 45° . No primeiro caso, Figura 10A, os sinais *Trip* e *Testab* foram gerados, respectivamente, após 12,0 ms e 14,0 ms, para um defeito sólido entre as fases A e B. No segundo caso, Figura 10B, os sinais *Trip* e *Testab* foram gerados, respectivamente, após 9,5 ms e 13,5 ms, para um defeito monofásico (fase A) com resistência de falta de 10Ω . Já no terceiro caso, Figura 10C, os sinais *Trip* e *Testab* foram gerados, respectivamente, após 8,0 ms e 13,5 ms, para um defeito trifásico sólido.

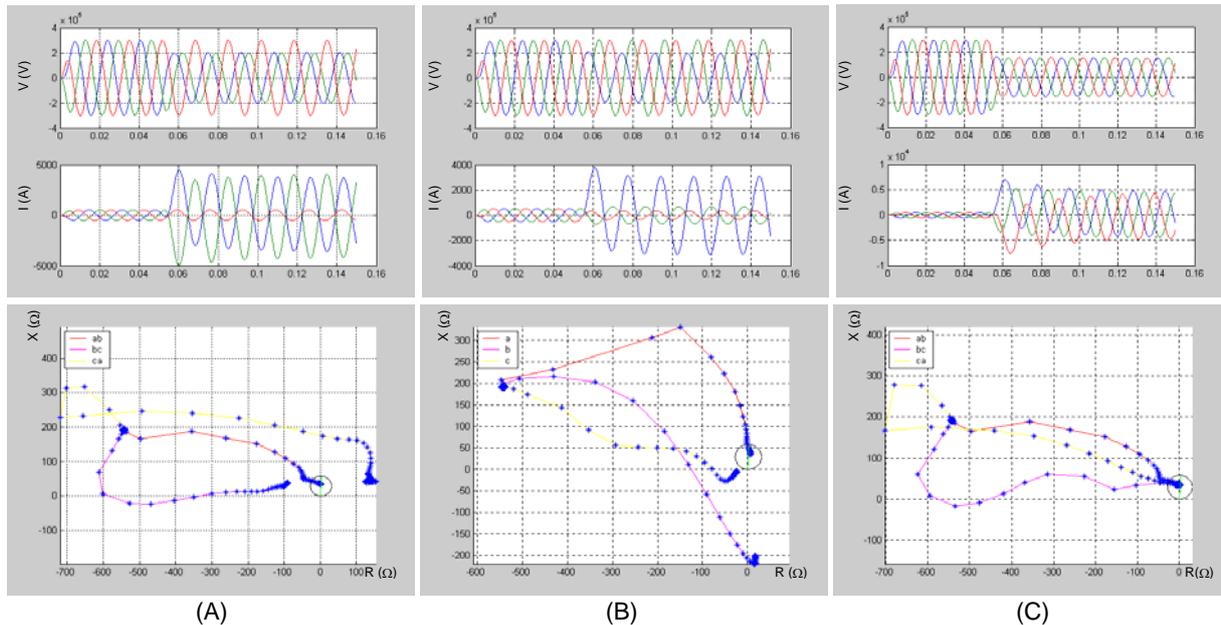


FIGURA 10 – Comportamento dos elementos de medição do algoritmo proposto

Na Figura 10, além dos sinais de tensão e corrente de defeito, referentes a cada situação operativa simulada, é possível visualizar o comportamento dos elementos de medição do algoritmo. No caso do defeito bifásico (A) somente o elemento de fase AB penetrou a zona de proteção do relé, enquanto que no caso do defeito trifásico (B) todos os três elementos de fase penetraram a zona de proteção do relé. Já no caso do defeito monofásico (C), somente o elemento de terra AN penetrou a zona de proteção do relé. Tal observação confirma que os esquemas propostos de pré-processamento, RNA e pós-processamento desempenharam a função desejada, visto que em todos os casos os elementos de medição calcularam, com precisão menor do que 5%, a impedância do defeito.

5.0 - COMPARAÇÃO ENTRE ALGORITMOS: RNA X FOURIER

Para mensurar a aplicabilidade do algoritmo proposto, este terá seu desempenho comparado com o desempenho de um algoritmo convencional utilizado na proteção de distância - Algoritmo de Fourier (5). Esta comparação

consta da análise das respostas de cada um desses algoritmos, frente a 480 simulações de possíveis condições operativas das linhas de transmissão consideradas no presente estudo. Tais condições operativas correspondem a 32 variações nos parâmetros de simulação do sistema elétrico (instante do defeito, tipo de defeito, resistência de falta, etc), além de três comprimentos de diferentes de linha de transmissão, em cada nível de tensão considerado (32 casos x 3 comprimentos x 5 níveis). A variação no comprimento das linhas de transmissão visa medir o comportamento do algoritmo proposto diante de linhas curtas, médias e longas.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os tempos médios de *trip* e estabilização dos algoritmos em teste nas seguintes condições: 32 casos simulados em cada um dos três comprimentos adotados para cada nível de tensão. O número entre parênteses representa a quantidade de vezes que o algoritmo desenvolvido respondeu mais rápido do que o algoritmo convencional.

Com relação à Tabela 2, constata-se que o algoritmo baseado em RNA possui melhor desempenho do que o algoritmo convencional, pois independentemente da linha de transmissão e do comprimento desta, o algoritmo desenvolvido possui tempos médios de *trip* significativamente mais baixos. Já com relação à Tabela 3, constata-se que até o nível de 345 kV o algoritmo baseado em RNA apresenta um desempenho ligeiramente superior ao algoritmo convencional. Entretanto, acima desse nível, o algoritmo de Fourier mostra-se mais adequado do que o baseado em RNA, que tem seu desempenho comprometido devido ao efeito das ondas trafegantes, presentes nas linhas mais longas. Tal limitação existe porque o treinamento das redes R e X do algoritmo foi realizado a partir de um modelo de primeira ordem (Figura 7), que não contempla as situações de ondas trafegantes.

TABELA 2 – Tempo médio de *trip* (ms)

Nível	Algoritmo	50 km	74 km	150 km
138kV	RNA	06,88 (97%)	08,16 (100%)	06,90 (100%)
	Fourier	14,20	15,63	13,7
		80 km	100 km	200 km
230kV	RNA	09,00 (93%)	08,83 (93%)	07,90 (87%)
	Fourier	13,30	13,03	12,67
		100 km	145 km	300 km
345kV	RNA	11,40 (100%)	10,55 (100%)	09,75 (100%)
	Fourier	16,70	16,20	15,40
		181 km	300 km	400 km
500kV	RNA	07,60 (97%)	06,77 (97%)	06,17 (97%)
	Fourier	13,06	12,43	12,56
		265 km	350 km	500 km
765kV	RNA	07,01 (100%)	06,75 (97%)	07,40 (87%)
	Fourier	13,46	13,10	12,93

TABELA 3 – Tempo médio de estabilização

Nível	Algoritmo	50 km	74 km	150 km
138kV	RNA	12,28 (94%)	13,65 (97%)	12,17 (100%)
	Fourier	17,97	18,75	18,12
		80 km	100 km	200 km
230kV	RNA	17,28 (72%)	17,04 (72%)	14,05 (88%)
	Fourier	17,22	17,18	17,59
		100 km	145 km	300 km
345kV	RNA	17,15 (75%)	17,57 (69%)	18,46 (72%)
	Fourier	19,50	18,30	18,53
		181 km	300 km	400 km
500kV	RNA	36,85 (41%)	35,03 (47%)	44,42 (38%)
	Fourier	16,93	17,00	16,93
		265 km	350 km	500 km
765kV	RNA	36,70 (41%)	35,54 (38%)	41,48 (44%)
	Fourier	17,65	17,59	20,53

6.0 - CONCLUSÃO

A principal contribuição do algoritmo apresentado é a possibilidade deste ser aplicável a qualquer linha de transmissão, independentemente das peculiaridades da mesma, sem a necessidade de ajustes adicionais nos parâmetros das RNA, ou seja, do retreinamento destas.

Os estágios de pré-processamento, RNA e pós-processamento possibilitam que o algoritmo proposto seja independente do nível de tensão da linha, além de proporcionar que as RNA sejam treinadas através de um sistema monofásico de primeira ordem, simplificando e agilizando o processo de geração dos conjuntos de treinamento.

Quanto aos tempos de respostas pode-se dizer que, em termos de tempo de *trip*, o algoritmo proposto leva vantagem sobre o algoritmo convencional. Já com relação ao tempo de estabilização o algoritmo proposto mostrou-se a melhor opção até o nível de 345 kV, enquanto nos níveis de 500 kV e 765 kV o algoritmo convencional teve o melhor desempenho.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Blackburn, J.L. (1998). *Protective Relaying – Principles and Applications*. New York, Marcel Dekker, 3 ed..
- (2) Demuth, H.; Beale, M. (1994). *Neural Network Toolbox – For Use With Matlab*. The Math Works, 3 ed..
- (3) Horowitz, S.H.; Phadke, A.G. (1996). *Power System Relaying*. England, Research Studies Press, 2 ed..
- (4) Santos, R.C.; Senger, E.C. (2004). *Algoritmo Baseado em Redes Neurais Artificiais para a Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. Tese de Doutorado, EPUSP.
- (5) Senger, E.C.; Santana, N.N. (1998). *Pré-Filtragem da Componente Aperiódica Exponencial para os Algoritmos Utilizados em Relés de Distância*. *Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*.
- (6) Wasserman, P.D. (1989). *Neural Computing – Theory and Practice*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- (7) JIALI, H. et al. "Distance Relay Protection Based on ANN". 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, p.515-520 Nov. 1997.