

4. Módulos de Identificação e Localização de Falta com RNA

Neste capítulo são mostrados todos os passos utilizados para implementar os módulos de identificação e localização de faltas, descrevendo os sistemas de redes neurais, com suas topologias e entradas escolhidas.

Como já visto anteriormente, a idéia é definir modelos de identificação e localização, para serem utilizados no sistema de localização de faltas de Furnas, conforme ilustrado na Figura 29. A rede neural artificial neste caso deve aumentar a confiança das respostas obtidas com os métodos tradicionais ou substituí-lo quando não se obtém um desempenho satisfatório para uma determinada LT.

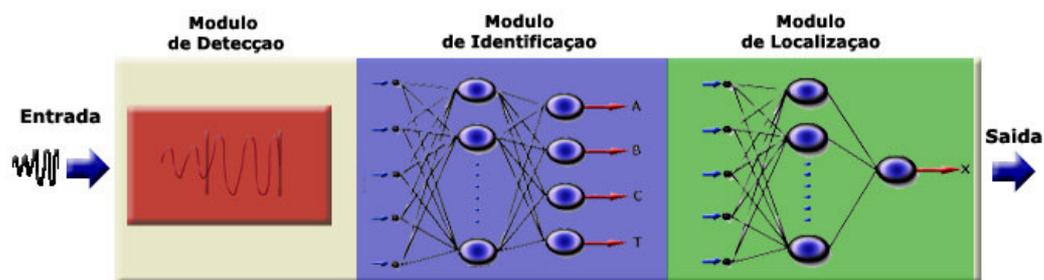


Figura 29 – Módulo de Detecção mais Módulos de Identificação e Localização de Falta com RNA

Todos os estudos de treinamento e testes foram realizados com o programa MATLAB, utilizando suas sub-rotinas especializadas em redes neurais - “Neural Network Toolbox”, e usando um microcomputador Pentium III 750 MHz com 256 Mbytes de memória RAM.

A partir dos dados apresentados pelo módulo de detecção de falta, a RNA definida para a identificação do tipo de falta deve ser capaz de distinguir que fases foram envolvidas (A, B, C e T) no curto-circuito e conseqüentemente identificar o tipo de falta ocorrida. O módulo de localização de falta da Figura 29 foi separado em quatro módulos, com uma RNA para cada tipo de curto-circuito, conforme abaixo:

- RNA para localização de Faltas Monofásicas
- RNA para localização de Faltas Bifásicas

- RNA para localização de Falta Bifásica-Terra
- RNA para localização de Falta Trifásicas

A resposta do módulo de identificação determina qual o módulo de localização de falta que será empregado no último passo. A Figura 30 mostra a relação entre os módulos de identificação e localização de faltas..

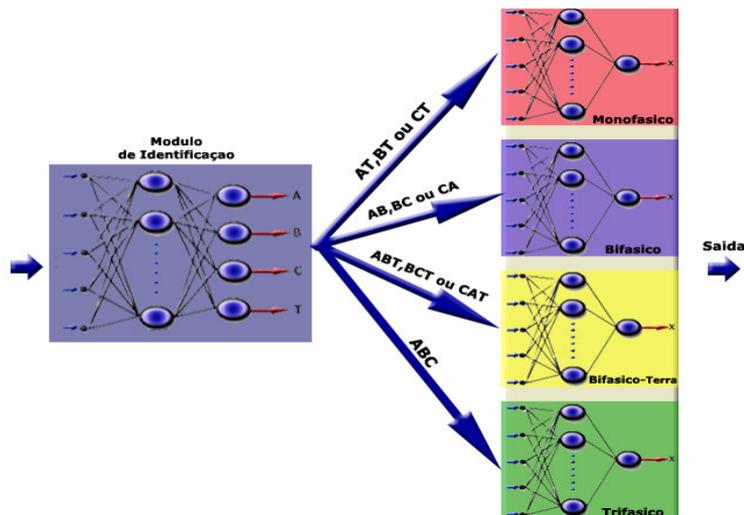


Figura 30 - Localização a partir da Identificação da Falta

4.1. Definição e Preparação dos Padrões de Treinamento

A Figura 31 mostra o diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado para obtenção dos dados (padrões). O sistema representa uma linha de transmissão real de Furnas, que neste trabalho será denominada Linha 1. Os dois sistemas equivalentes foram obtidos com o programa de curto-circuito ANAFAS utilizando o caso base do Sistema Elétrico Brasileiro, configuração Dezembro / 2002 (Fonte ONS).

Características básicas da Linha 1:

Tensão de operação: 345 kV

Comprimento da LT: 182 Km

Tipo de circuito: Simples

Nº de cabos por feixe condutor: 3

Cabo Para-raio: Aterrado

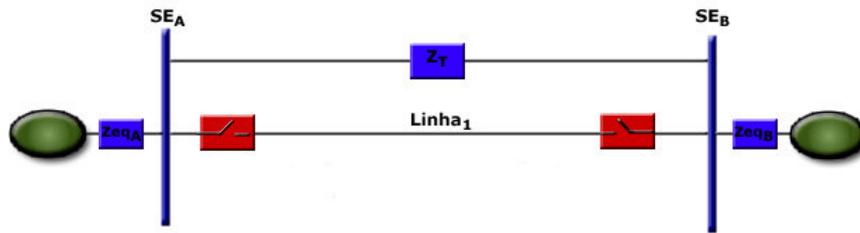


Figura 31 – Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico

Na simulação foram considerados 3 valores para o carregamento da LT. Para o cálculo do Z_{eqA} e Z_{eqB} o caso base utilizado considera que todos os geradores e LTs do sistema elétrico estão em operação, ou seja, sistema completo. Para representação da LT em sistemas com características diferentes, foi utilizado um fator 5 para multiplicar os valores de impedância equivalente dos dois sistemas, onde se podem obter as seguintes representações:

Sistema “A” Forte – Sistema “B” Forte $\rightarrow Z_{eqA}_F - Z_{eqB}_F$

Sistema “A” Fraco – Sistema “B” Forte $\rightarrow Z_{eqA}_f - Z_{eqB}_F$

Sistema “A” Forte – Sistema “B” Fraco $\rightarrow Z_{eqA}_F - Z_{eqB}_f$

As combinações de todos os parâmetros utilizados para geração dos dados de treinamento totalizam 3150 registros. Abaixo estão relacionados todos os parâmetros utilizados na simulação.

- Tipo de falta- AT, BT, CT ,AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC (10)
- Impedância do Sistema Equivalente – $Z_{eqA}_F - Z_{eqB}_F$, $Z_{eqA}_F - Z_{eqB}_f$ e $Z_{eqA}_f - Z_{eqB}_F$ (3)
- Impedância de falta – 4, 12, 30, 60 e 100 ohms (5)
- Seqüência de abertura – 4 - 5 ciclos (1)
- Ângulo de incidência de falta – 90 graus (1)
- Comprimento da LT – 182 Km (1)
- Carregamento da LT – 30, 300 e 900 MW (3)
- Posição do curto-circuito – 2, 10, 30, 50, 70, 90, 98 % (7)

Para validar a rede neural, uma nova simulação foi feita com diferentes valores dos parâmetros, totalizando 720 dados, conforme abaixo:

- Tipo de falta- AT, BT, CT ,AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC (10)

- Impedância do Sistema Equivalente – Z_{eqA_F} – Z_{eqB_F} e $Z_{eqA_{F-}}$ – $Z_{eqB_{F-}}$ (2)
- Impedância de falta – 20, 40, e 80 ohms (3)
- Seqüência de abertura – 6-4 ciclos (1)
- Ângulo de incidência de falta = 45 graus (1)
- Comprimento da LT – 182 Km (1)
- Carregamento da LT – 150 e 600 MW (2)
- Posição do curto-circuito – 5, 20, 40, 60, 80 e 95 % (6)

Os valores de seqüência de abertura representam o tempo de abertura dos terminais “A” e “B” respectivamente, ou seja, o terminal “A” abre em 4 ciclos (± 65 msec) e o terminal “B” em 5 ciclos (± 80 msec). Este tempo é o que se observa na prática e representa o tempo de atuação da proteção (± 2 ciclos) e o tempo de abertura do disjuntor (± 3 ciclos) para o nível de tensão de 345 kV. Para os dados de validação os valores da seqüência de abertura utilizados garantem que o terminal B abre primeiro que o terminal A, ou seja, os valores de curtos-circuitos utilizados para validação não levam em consideração a contribuição do terminal B.

Como já visto no capítulo 3 os valores dos padrões são representados por fasores de 60 Hz, calculados no período da falta utilizando a TDF para janela de 1 ciclo. Após todas as simulações, o módulo de detecção de falta disponibilizará os fasores de tensão e corrente de todas as fases (A, B e C) e terra (T).

Na Tabela 1 vemos um exemplo dos dados disponibilizados pelo módulo de detecção da falta. Todos os dados são apresentados com valores primários fase-terra.

Valores em KV, A e Graus Elétricos															
VA	θ_A	VB	θ_B	VC	θ_C	VR	θ_R	IA	θ_A	IB	θ_B	IC	θ_C	IR	θ_R
149,2	-4	202,9	-122	204,4	105	63,6	148	5249	-76	92,6	-80	91,9	-79	5498	-76
142,9	-18	141,4	-106	202,2	120	0,0	168,	7291	-52	7290	128	0,0	61	0,0	93
129,4	-12	129,4	-115	204,4	120	53,7	130	7707,	-66	7106	143	67,2	223	3913,	-133,
118,8	-6	118,8	-125	119,5	115	0,0	223,	8509	-80	8540,	160	8517	40,	0,0	93

Tabela 1 - Exemplo de valores disponibilizados pelo módulo de detecção da Falta

Para obter os padrões finais optou-se por utilizar valores por unidade (p.u.). O valor por unidade de qualquer grandeza (Equação 16) é definido como a relação entre o valor da grandeza e a base [15]. A utilização de p.u. neste módulo visa generalizar a RNA para diferentes Linhas de Transmissão e níveis de tensão.

$$Valor_{pu} = \frac{Grandeza}{Base(referência)}$$

Equação 16 – Valor p.u.

No caso de V_b = Tensão base e S_b = Potência base, tem-se, para Impedância base (Z_b) e Corrente base (I_b), os seguintes valores:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$$

$$I_b = \frac{S_b}{V_b}$$

Dividindo todos os valores medidos pelos valores bases para cada nível de tensão terão:

$$V_{pu} = \frac{V_{medido}}{V_b} \quad I_{pu} = \frac{I_{medido}}{I_b} \quad Z_{pu} = \frac{Z_{medido}}{Z_b}$$

Todos os padrões utilizados no treinamento e validação da rede neural estão em valores p.u. dos módulos de tensão e corrente, ou seja, as respostas da simulação são divididas pelo seu valor base correspondente de tensão e corrente.

Na Tabela 2 pode-se ver os dados utilizados no treinamento da rede neural para identificação da falta, com valores dos módulos de tensão e corrente em p.u. e ângulo em graus elétricos, que neste caso foi acrescido das respostas esperadas para compor os possíveis pares de treinamento.

Valores dos módulos (pu) e Ângulos (graus)																Tipo da falta			
VA	θA	VB	θB	VC	θC	VR	θR	IA	θA	IB	θB	IC	θC	IR	θR	A	B	C	T
0,75	-4	1,02	-122	1,03	105	0,32	148	18,1	-76	0,3	-80	0,3	-79	19,0	-76	1	0	0	1
0,75	-18	0,71	-106	1,02	120	0,00	168	25,2	-52	25,2	128	0,0	61	0,0	93	1	1	0	0
0,65	-12	0,65	-115	1,03	120	0,27	130	26,6	-66	24,5	143	0,2	223	13,5	-133	1	1	0	1
0,60	-6	0,60	-125	0,60	115	0,00	223	29,4	-80	29,5	160	29,4	40	0,0	93	1	1	1	0

Tabela 2 - Padrões para Identificação da Falta

Optou-se por utilizar quatro modelos de RNAs para localização de falta, com objetivo de se utilizar apenas os sinais mais representativos do curto-circuito ocorrido. Nas simulações para o treinamento da rede, foram utilizados apenas 4 tipos de curto-circuito (AT, AB, ABT e ABC) que representam seus respectivos modelos de RNA.

A seguir são apresentadas as opções de entrada utilizadas para definir a topologia de rede final a ser implementada para cada tipo de curto-circuito.

Curto-circuito Monofásico (Fase-Terra). Este tipo de curto-circuito envolve somente uma fase e a terra. Neste trabalho foram definidas três configurações de entrada, conforme abaixo:

- 4 Entradas – Somente os valores dos módulos de tensão (V_a) e corrente (I_a) da fase faltosa e tensão (V_r) e corrente (I_r) residuais.

<i>Dados de Entrada da Rede</i>			
V_a	I_a	V_r	I_r

- 6 Entradas – Esta opção utiliza os valores de tensão e corrente, acrescidos dos valores da defasagem angular entre a tensão e corrente de fase e a defasagem angular entre a tensão e corrente residual.

<i>Dados de Entrada da Rede</i>					
V_a	I_a	$\theta_{V_a-\theta_{I_a}}$	V_r	I_r	$\theta_{V_r-\theta_{I_r}}$

- 8 Entradas – Neste caso as entradas da rede são compostas dos valores dos módulos e ângulos das tensões e correntes (fase e residual).

<i>Dados de Entrada da Rede</i>							
V_a	θ_{V_a}	I_a	θ_{I_a}	V_r	θ_{V_r}	I_r	θ_{I_r}

Curto-circuito Bifásico (Fase-Fase). Este tipo de curto-circuito apresenta envolvimento de duas das três fases do sistema elétrico. Neste trabalho foram definidas três configurações de entrada, detalhadas a seguir:

- 4 Entradas – Utiliza somente os sinais de tensão e corrente das fases faltosas, em módulo.

<i>Dados de Entrada da Rede</i>			
V_a	V_b	I_a	I_b

- 6 Entradas – Utiliza somente os módulos de tensão e corrente das fases faltosas e a diferença angular entre a tensão e corrente de cada fase.

<i>Dados de Entrada da Rede</i>					
V_a	I_a	$\theta_{V_a-\theta_{I_a}}$	V_b	I_b	$\theta_{V_b-\theta_{I_b}}$

- 8 Entradas – Utiliza somente os módulos e ângulos de tensão e corrente das fases faltosas

Dados de Entrada da Rede							
Va	θVa	Vb	θVb	Ia	θIa	Ib	θIb

Curto-circuito Bifásico-Terra (Fase-Fase-Terra). Este curto-circuito envolve duas das três fases do sistema elétrico mais a terra. Para este trabalho foram definidas duas configurações diferentes de entrada, conforme abaixo:

- 6 Entradas – Utiliza somente os módulos de tensão e corrente das fases faltosas e residuais.

Dados de Entrada da Rede					
Va	Vb	Vr	Ia	Ib	Ir

- 12 Entradas – Utiliza os módulos e ângulos de tensão e corrente das fases faltosas e residuais.

Dados de Entrada da Rede											
Va	θVa	Vb	θVb	Vr	θVr	Ia	θIa	Ib	θIb	Ir	θIr

Curto-circuito Trifásico (Fase-Fase-Fase). Neste curto-circuito há envolvimento de todas as três fases do sistema elétrico. Para o trabalho foram definidas duas configurações de entrada, conforme abaixo:

- 6 Entradas – Utiliza os módulos de tensão e corrente das três fases.

Dados de Entrada da Rede					
Va	Vb	Vc	Ia	Ib	Ic

- 12 Entradas – Utiliza os módulos e ângulos de tensão e corrente das três fases..

Dados de Entrada da Rede											
Va	θVa	Vb	θVb	Vc	θVc	Ia	θIa	Ib	θIb	Ic	θIc

A Tabela 3 abaixo mostra um exemplo de padrão disponível no treinamento das redes neurais artificiais para localização de falta, acrescido da resposta desejada, expressa em valor percentual da LT a partir de uma subestação de

referência. Os dados são filtrados (número de entradas) em função do tipo de curto-circuito.

Valores de módulo e ângulos (Dados de Entrada da Rede)															Loc.Falta (Saída)	
VA	θ_A	VB	θ_B	VC	θ_C	VR	θ_R	IA	θ_A	IB	θ_B	IC	θ_C	IR	θ_R	%
0,75	-4	1,02	-122	1,03	105	0,32	148	18,1	-76	0,3	-80	0,3	-79	19,0	-76	25

Tabela 3 - Padrões para Localização de Falta

Para treinamento das RNAs na localização de falta são combinados parâmetros utilizados para geração dos dados que totalizam 3840 registros, em 4 grupos de 960 dados para cada tipo de falta. Abaixo se encontram todos os parâmetros utilizados na simulação.

- Tipo de falta- AT ,AB, ABT e ABC (4)
- Impedância do Sistema Equivalente – Z_{eqA_F} – Z_{eqB_F} e Z_{eqA_f} – Z_{eqB_F} (2)
- Impedância de falta – 4, 12, 30, 60 e 100 ohms (5)
- Seqüência de abertura – 4 - 5 ciclos, 6 – 4 ciclos (2)
- Ângulo de incidência de falta – 90 graus (1)
- Comprimento da LT – 182 Km (1)
- Carregamento da LT – 30, 300 e 600 MW (3)
- Posição do curto-circuito – 02, 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 e 99 % (16)

Para validar a rede neural, uma nova simulação foi feita com diferentes valores de parâmetros, totalizando 960 dados, sendo 240 padrões para cada tipo de falta, conforme abaixo:

- Tipo de falta- AT, AB, ABT e ABC (4)
- Impedância do Sistema Equivalente – Z_{eqA_F} – Z_{eqB_F} e Z_{eqA_f} – Z_{eqB_F} (2)
- Impedância de falta – 08, 22, e 70 ohms (3)
- Seqüência de abertura – 4 - 5 ciclos, 6 – 4 ciclos (2)
- Ângulo de incidência de falta – 90 graus (1)
- Comprimento da LT – 182 Km (1)
- Carregamento da LT – 100 e 200 MW (2)
- Posição do curto-circuito – 04, 12, 23, 38, 44, 57, 62, 79, 81 e 94% (10)

4.2. Módulo para Identificação de Falta Utilizando RNA

A partir dos dados de treinamento a rede neural artificial deve reconhecer as fases envolvidas no curto-circuito. Por exemplo, para uma falta monofásica, as possíveis identificações são: “AT”, “BT” ou “CT”; para falta bifásica podemos ter: “AB”, “BC” ou “CA”; para faltas bifásicas com envolvimento de terra temos “ABT”, “BCT” ou “CAT”; e para faltas trifásicas temos as três fases “ABC” como resposta de saída da rede neural.

No treinamento da RNA utilizamos o algoritmo de treinamento Back Propagation em redes MLP, mas com a heurística 2 (item 2.5), onde a taxa de aprendizado pode variar a cada iteração. Para cada ciclo, se o desempenho decresce em direção ao objetivo, a taxa de aprendizado é aumentada por um fator de incremento. Se o desempenho aumentar mais que um fator que mede a máxima relação entre o desempenho atual e o anterior, a taxa de aprendizado é ajustada por um fator de decremento e trocada, se o desempenho aumentar mas não ultrapassar o valor do fator de relação entre o desempenho atual e o anterior, não se troca a taxa de aprendizado. O uso desta técnica diminui o tempo de convergência da rede, que em alguns casos testados neste trabalho foi inferior a 4 vezes o tempo quando se utilizou o algoritmo de Back Propagation com gradiente descendente com parâmetros fixos, ou seja, taxa de aprendizagem e momentum.

O treinamento foi realizado com 3150 padrões para treinamento e 720 padrões de validação. Foram utilizados somente os valores dos módulos de tensão (V_a , V_b , V_c e V_r) e corrente (I_a , I_b , I_c e I_r), ou seja, 8 entradas para RNA. Em todos os modelos testados utilizou-se a aprendizagem supervisionada e a correção dos pesos sinápticos feita após todas os padrões de treinamento serem apresentados à rede, isto é, utilizou-se o modo “batch” de treinamento.

O conjunto de validação representa aproximadamente 20% do conjunto de treinamento (Keans, 1996). A obtenção do conjunto de validação foi realizado em simulações com dados diferentes de localização da falta, impedância de falta, carregamento da LT, impedância equivalente e ângulo de incidência de falta, conforme descrito na seção 4.1.

4.2.1. Definição do Nível de Saída

Convencionou-se para saída da rede as fases envolvidas no curto-circuito (A, B e C) e a seqüência zero (T), que representa o envolvimento a terra, por exemplo: faltas monofásicas e bifásicas-terra.

Na Tabela 4 apresentamos os 10 possíveis tipos de curto-circuito, e a resposta esperada para as camadas de saída da RNA, que possui 4 elementos processadores e função de ativação logsigmóide.

Faltas	Saída Esperada			
	A	B	C	T
AT	1	0	0	1
BT	0	1	0	1
CT	0	0	1	1
AB	1	1	0	0
BC	0	1	1	0
CA	1	0	1	0
ABT	1	1	0	1
BCT	0	1	1	1
CAT	1	0	1	1
ABC	1	1	1	0

Tabela 4 - Tabela de Falta e Saída Esperada da RNA

Para determinar o envolvimento de uma fase na falta convencionou-se que se a saída da rede estiver no intervalo fechado de 0,7 a 1,0, a resposta será considerada como “1”, caso a resposta de alguma saída esteja no intervalo fechado entre 0 a 0,3, considera-se que não houve envolvimento da fase correspondente à saída e a resposta será considerada com “0”. No caso da rede apresentar alguma saída no intervalo aberto entre 0,3 a 0,7, a falta não será classificada, e neste caso os dados não serão apresentados ao próximo módulo (Localização da Falta).

4.2.2. Topologia e Parâmetros

No módulo de identificação de falta a RNA contém 8 entradas, sendo que as 4 primeiras entradas apresentam os sinais das tensões V_A , V_B , V_C e V_R e as 4 últimas entradas representam os sinais das correntes I_A , I_B , I_C e I_R , respectivamente. A camada de saída possui 4 elementos processadores. Os três primeiros estão referidos às fases A, B, C e o último elemento processador representa a Terra (T).

Para determinar a topologia da RNA “Multi Layer Perceptron”, ilustrada na Figura 32, com 1 camada escondida e treinada com o algoritmo de treinamento Back Propagation, utilizou-se o aprendizado supervisionado (pares de treinamento) em modo batch de treinamento.

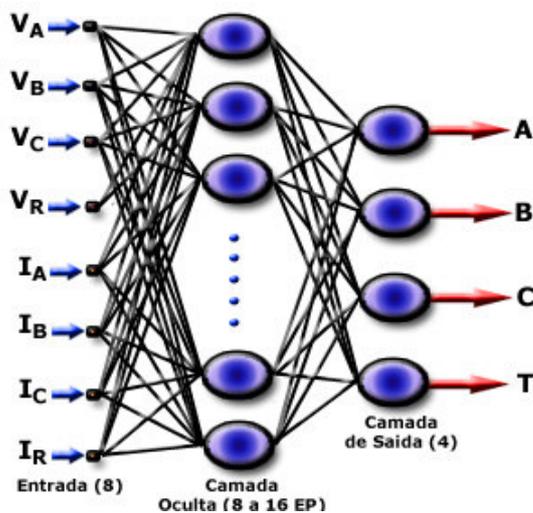


Figura 32 - RNA Identificação (8-X-4)

Para obter os pares de treinamento foram acrescentados 4 campos nos dados de treinamento e validação, identificando cada simulação gerada. Quando a fase estiver envolvida no curto-circuito o valor esperado será “1” caso contrário será “0”. Conforme apresentado na Tabela 4.

Para a camada de saída foi utilizada a função de transferência logsigmóide, limitando a resposta entre 0 e 1, conforme desejado. Na camada intermediária, utilizou-se a função tangente hiperbólica sigmoidal, que apresenta resposta no intervalo de “-1” a “+1”. Os dados de entrada foram normalizados entre “-1” a “+1”, utilizando uma ferramenta do Matlab. Este pré-processamento torna o

treinamento da rede mais eficiente, mas para recuperação da saída da rede é necessário guardar os valores de máximo e mínimo da entrada em vetores.

No processo de treinamento da rede foi utilizado o algoritmo de treinamento Back Propagation com taxa de aprendizado adaptativa sendo seu valor inicial igual a 0,7 e valor mínimo de 0,001, fator de incremento de 1,05 e decremento de 0,7 para taxa de aprendizado e termo momentum com valor constante de 0,9. O fator máximo que mede a relação entre o desempenho do treinamento a cada iteração foi de 1,04.

Para obtenção da topologia da rede, foram considerados alguns pontos que propiciam uma boa generalização. A partir da definição do número de entradas e quantidade de padrões de treinamento foi definido que a rede deveria ter, no mínimo, o número de elementos processadores na camada escondida igual ao número de entradas e, no máximo 2 vezes o número de entradas. Com isto foram testadas várias arquiteturas de rede, variando o número de elementos processadores de 8 a 16, para 1 camada escondida.

O conjunto de validação foi utilizado para validar a topologia da rede, evitando que haja um excesso de ajuste da RNA na fase de treinamento, este método conhecido como validação cruzada está descrito na seção 2.6. Para determinar qual a topologia da rede, foi escolhida a rede que obteve o menor Erro RMSE (Root Mean Square Error) nos dados de validação.

Como critério de parada, a primeira opção foi utilizar o “Método de Parada Antecipada” da validação cruzada. Quando a curva do desempenho da validação crescer a partir de um ponto mínimo alcançado, este ponto determina o melhor momento de parar o treinamento da rede, garantindo uma boa generalização. No Gráfico 1 pode-se ver que a curva da validação apresenta erro RMSE menor que a curva do erro do treinamento, mostrando que neste caso, para a rede (8-14-4) o aprendizado é fácil para este tipo de aplicação. Este caso identifica um comportamento assintótico, onde o treinamento exaustivo é satisfatório [2].

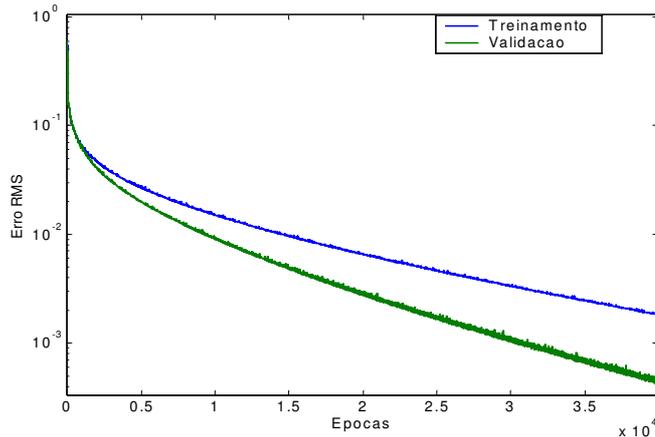


Gráfico 1 - Erro RMSE do Treinamento e Validação da RNA para Identificação

O Gráfico 2 apresenta o erro da validação e treinamento da rede em função do número de elementos processadores na camada escondida, fixando o número de épocas em 40.000.

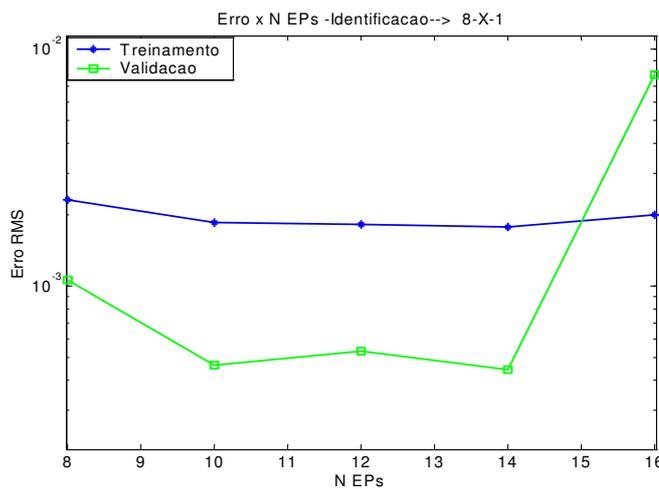


Gráfico 2 - Erro RMSE x Número de EP da RNA para Identificação (8-X-4)

Foram executados 5 treinamentos para avaliar o desempenho de cada rede, sendo que a rede neural com 14 elementos na camada escondida apresentou melhor desempenho na maioria das vezes, apesar de todas as redes treinadas apresentarem um erro menor que o desejado para os dados de validação, que é de 0,01.

Após todos os testes realizados com diversas topologias de rede neurais, foi escolhida a RNA Perceptron Multicamadas com 8 entradas, 14 elementos processadores na camada intermediária e 4 elementos na camada de saída. Esta topologia foi treinada para se obter os pesos e bias finais e utilizar a RNA apenas no seu modo de execução (Feed-Forward). Em função da facilidade da rede em

reconhecer o tipo de falta foi alterado o critério de parada para um erro (RMSE) de 0,001 ou treinamento com 30.000 épocas, o que ocorrer primeiro. O tempo aproximado para treinar a RNA foi em média de 2:30h para o número de padrões de treinamento e padrões de validação utilizados, quando o critério de parada foi o número fixo de ciclos de 30.000.

4.3. Módulos para Localização de Falta Utilizando RNA

Este módulo foi separado em quatro módulos específicos, ou seja, uma RNA para cada tipo de falta ocorrida: Falta Monofásica; Falta Bifásica; Falta Bifásica-Terra e Trifásica. Cada RNA para localização é ativada em função do módulo de identificação da falta, que determina o tipo de curto-circuito ocorrido na LT.

A RNA para localização fornece a distância da falta, tendo como referência o terminal da LT onde foram adquiridos os sinais de tensão e corrente. A camada de saída de todas as RNAs possui somente um elemento processador, utilizando a função de transferência log-sigmóide, onde a resposta está limitada entre “0” e “1”.

Para compor os pares de treinamento dos padrões de entrada, o sistema de simulação fornece a distância da falta em porcentual. Com isto a normalização da resposta desejada foi simples, utilizou-se o valor por unidade dividindo a resposta por cem, mantendo o intervalo]0,1[. A RNA só responde a curto-circuito interno a LT, excluindo-se os valores extremos (0% e 100%), para obter os dados de treinamento foram simuladas faltas que abrangem a totalidade da LT, neste caso o intervalo utilizado foi de 1% a 99%.

Neste trabalho não são consideradas as aberturas indevidas da LT, como por exemplo um curto-circuito externo mostrado na Figura 33, onde sua localização apresenta um valor fora da região de treinamento.

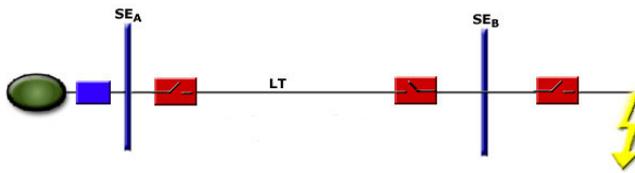


Figura 33 - Curto-circuito Externo

4.3.1. Topologia e Parâmetros

Em todos os treinamentos das RNAs para localização de falta foram utilizados Redes Perceptron Multicamadas, com algoritmo treinamento Back Propagation, taxa de aprendizado adaptativa e termo momentum fixo. Quanto ao modo de aprendizado, também foi utilizado o modo “batch” que tem uma melhor estimativa do vetor gradiente e torna o treinamento mais estável.

Nos modelos de RNAs para localização, utilizaram-se os mesmos valores de parâmetros usados no treinamento da RNA para identificação de falta, conforme a seguir:

- Taxa de aprendizagem inicial de 0,7 com fator de incremento de 1,05 e decremento de 0,7;
- Taxa de aprendizagem mínima de 0,001;
- Termo momentum fixo em 0,9;
- Fator máximo de desempenho de 1,04.

Para as camadas intermediárias utilizou-se a função de transferência tangente hiperbólica sigmoidal, também se definiu a normalização dos dados de entrada da rede no intervalo “-1” a “+1”. Na camada de saída utilizou-se a função de transferência log-sigmóide.

Em virtude da subdivisão do módulo de localização, em 4 módulos, foram testadas várias topologias de redes neurais em função do tipo de curto-circuito e configuração do número de entradas escolhidas, que serão apresentados nas seções seguintes. Por exemplo, as RNAs para faltas monofásicas foram testadas redes com 4, 6 e 8 entradas, com uma ou duas camadas escondidas. A utilização de duas camadas escondidas visa melhorar a precisão da RNA, já que o objetivo é fornecer resultados de localização com maior precisão. Para isto deve-se ter cuidado, já que há um compromisso entre a generalização e a precisão. O número de Elementos Processadores (EP) ou neurônios artificiais, em cada camada,

seguiu o mesmo critério utilizado na RNA para identificação da falta, ou seja, o número máximo de EP igual a dobro do número de entradas e número mínimo igual ao número de entradas utilizado. Para rede com duas camadas, duplicou-se a primeira camada para avaliar o desempenho da RNA.

Para obtenção das RNAs para os quatro tipos de falta foram testadas 92 arquiteturas diferentes, efetuando 4 treinamentos para cada, totalizando 368 testes. O critério de escolha foi a RNA que apresentasse um menor erro RMSE nos dados de validação, para um número de 50.000 ciclos.

O conjunto de treinamento é composto de 960 padrões para cada tipo de curto-circuito e 240 padrões para validar cada modelo de RNA, que equivale a 25% dos padrões de treinamento. No total foram simulados 3840 padrões de treinamento (AT, AB, ABT e ABC) e 960 padrões de validação.

4.3.2. RNA para Falta Monofásica

Para este tipo de falta, que envolve uma fase e a terra, podemos ter falta fase A Terra, fase B terra e fase C terra, porém para escolha da topologia de rede foram testadas RNAs com curto-circuito fase A Terra. Como a topologia final depende do número de entradas, testou-se 3 tipos de configurações de entrada para treinar as redes, sendo utilizado somente os dados das fases envolvidas na falta, conforme a seguir:

RNA com 4 Entradas. Neste caso os padrões de treinamento utilizados foram os módulos da tensão e corrente da fase A e terra. Para quatro treinamentos efetuados, a RNA que obteve melhor desempenho nos dados de validação foi a RNA com 8 EPs para uma camada intermediária. Para a rede com duas camadas, a que obteve a melhor desempenho foi a com 8 EPs em cada camada. O Gráfico 3 apresenta o erro RMSE de treinamento e validação para a RNA com uma camada escondida e o Gráfico 4 apresenta o erro RMSE para a RNA com duas camadas escondidas, lembrando que o número de EPs são iguais para cada camada escondida.

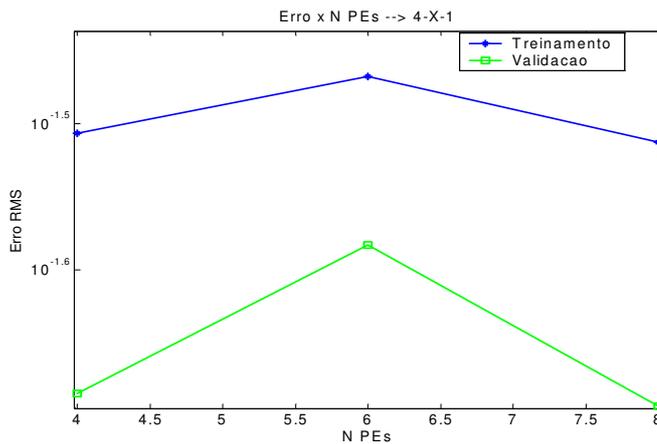


Gráfico 3 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Monofásica (4-X-1)

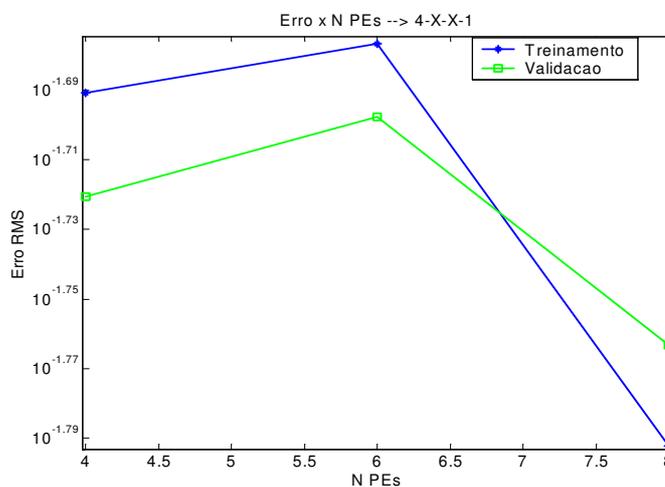


Gráfico 4 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Monofásica (4-X-X-1)

RNA com 6 Entradas. Os padrões de entrada são os módulos de tensão e corrente da fase A e terra mais as defasagens angulares entre as tensões e correntes. Foram treinadas RNAs com 6 a 12 EPs com 1 camada intermediária, para 2 camadas intermediárias foram duplicados os números de EPs dividindo-os em cada camada. Os gráficos 5 e 6 apresentam os erros RMSE obtidos no conjunto de validação e treinamento em função do número de EPs, para 1 e 2 camadas respectivamente. Neste treinamento obteve-se o melhor desempenho para a RNA com duas camadas intermediárias, composta de 8 EPs em cada camada. Na RNA com 1 camada intermediária a que obteve a melhor resposta foi a rede com 10 EPs.

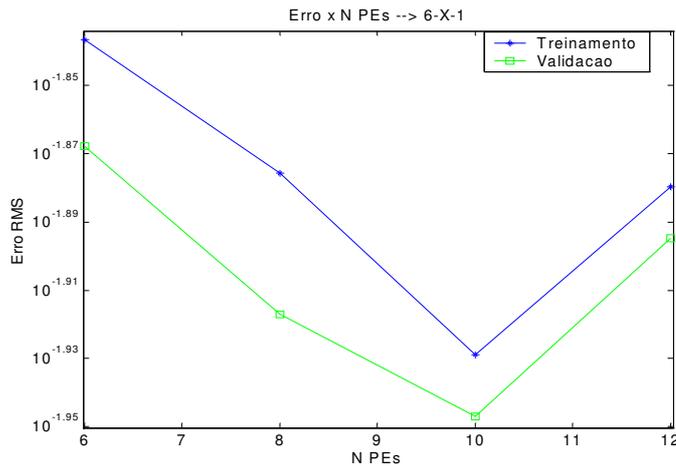


Gráfico 5 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Monofásica (6-X-1)

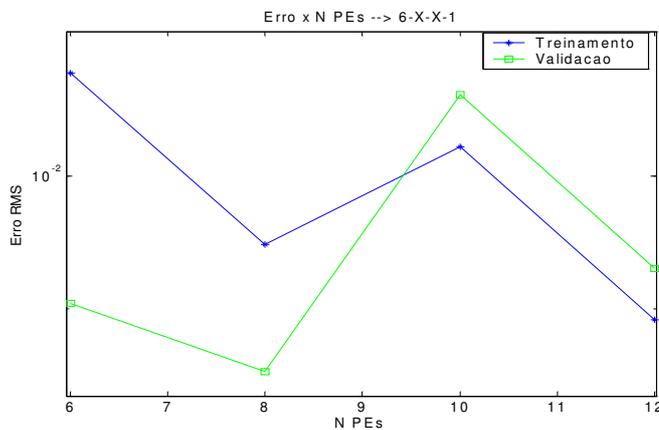


Gráfico 6 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Monofásica (6-X-X-1)

RNA com 8 Entradas. Os dados de entrada utilizados foram os módulos de tensão e corrente da fase A e terra com seus respectivos ângulos. Para este número de entradas foram treinadas redes com 8 a 16 EPs, com uma camada intermediária e duas camadas intermediária. A RNA com 8 entradas apresentou melhor desempenho que as redes com 4 e 6 entradas. Neste caso também as redes com duas camadas intermediárias apresentaram erros RMSE para validação e treinamento menores que as redes com 1 camada, considerando um número de ciclos igual a 50.000. Para 1 camada intermediária, podemos ver pelo Gráfico 7 que a RNA com 12 EPs obteve melhor desempenho. O Gráfico 8 apresenta o erro RMSE em função do número de EPs para RNA com duas camadas intermediárias onde a RNA com 12 EP em cada camada obteve a melhor desempenho.

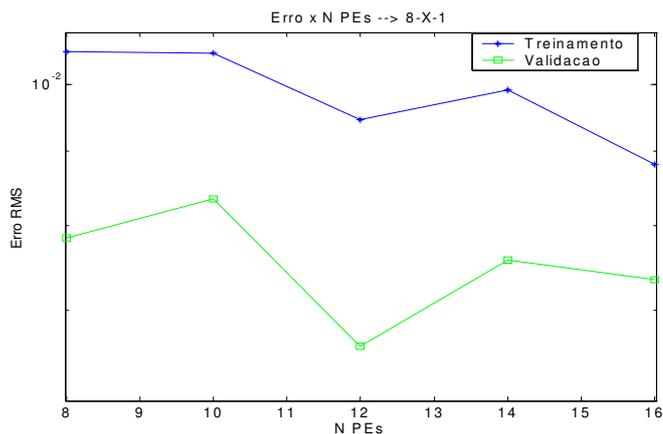


Gráfico 7 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Monofásica (8-X-1)

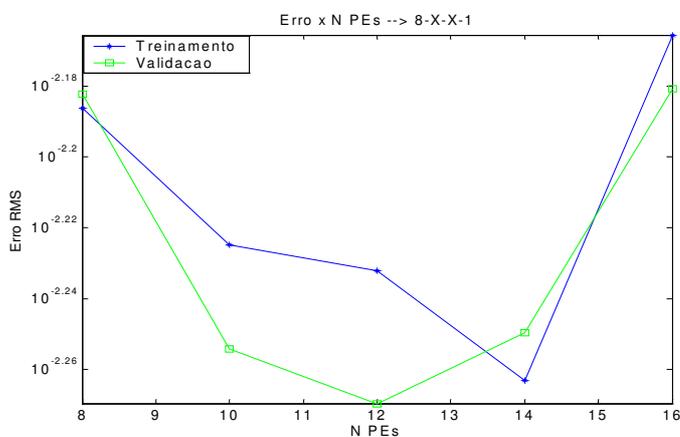


Gráfico 8 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Monofásica (8-X-X-1)

A Tabela 5 apresenta os erros RMSE da validação e treinamento, obtidos nos testes das RNAs que obtiveram as melhores desempenhos para 1 e 2 camadas escondidas, com o número de 50.000 épocas.

Tipo de Falta	Topologia	Entrada	Erro RMSE Validação	Erro RMSE Treinamento
M O N O F Á S I C A	4 - 8 - 1	Módulos V e I	0,0203	0,0307
	4 - 8 - 8 - 1		0,0173	0,0161
	6 - 10 - 1	Módulos e Defasagens Angulares entre V e I	0,0113	0,0118
	6 - 8 - 8 - 1		0,0086	0,0095
	8 - 12 - 1	Módulos e Ângulos de V e I	0,0066	0,0095
	8 - 12 - 12 - 1		0,0054	0,0059

Tabela 5 - Erro RMSE para as Topologias nas RNA para Falta Monofásica Testadas

No critério de parada pode-se ver pelos gráficos abaixo que o modo assintótico também ocorreu na RNA para falta monofásica, tanto para 1 camada intermediária quanto para duas camadas intermediárias, indicando que o treinamento exaustivo se adapta melhor a esse treinamento. A função de localização de falta necessita uma melhor precisão no resultado, não esquecendo da generalização, então o melhor critério de parada é acompanhar o erro, podendo parar quando este começar a diminuir muito lentamente. O Gráfico 9 mostra os erros RMSE obtidos com os dados de treinamento e validação para uma RNA de 12 EP em uma camada oculta, com treinamento de 300.000 ciclos. Observa-se que a partir de 200.000 ciclos o erro RMSE da validação diminui muito lentamente.

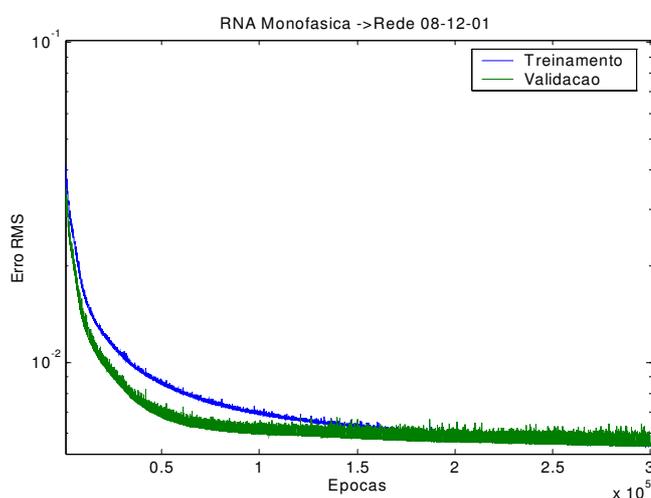


Gráfico 9 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Monofásica (8-12-1)

O Gráfico 10 mostra o erro RMSE para os dados de treinamento e validação, pode-se ver que para 200.000 ciclos, com um tempo médio de 16 horas, a RNA com duas camadas ocultas ainda apresenta capacidade de aprender sobre as características da falta monofásica sem perder a generalização. No Gráfico 11 observa-se que para o treinamento de 500.000 ciclos na RNA com duas camadas de 12 EP e tempo médio de 74 horas, o erro RMSE apresenta um ganho pequeno em relação a 200.000 ciclos.

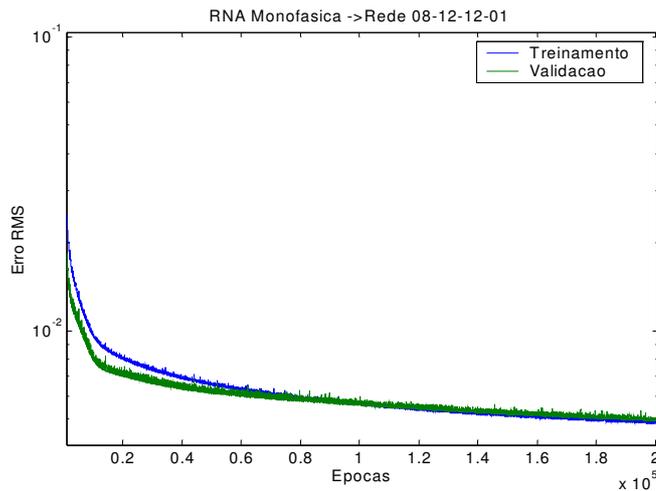


Gráfico 10 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Monofásica (8-12-12-1)

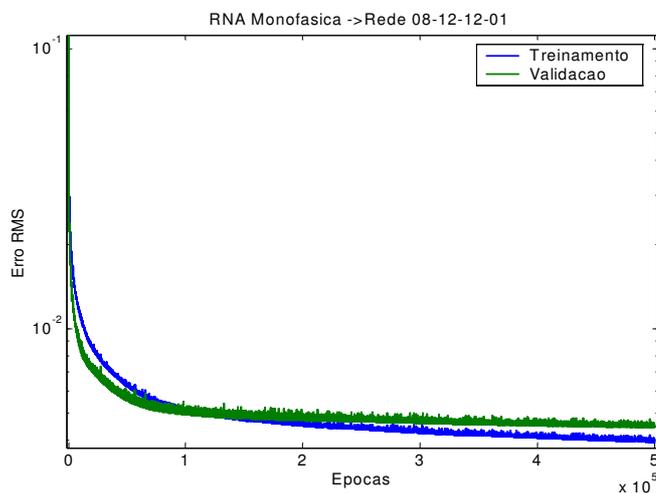


Gráfico 11 Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Monofásica (8-12-12-1) – 500.000 ciclos

Após 96 redes treinadas, onde foram executados 4 treinamentos para avaliar o desempenho de cada RNA, definiu-se a RNA para faltas monofásicas com 8 entradas, 12 elementos processadores nas duas camadas escondidas (oculta) e 1 elemento processador na camada de saída, conforme Figura 34. O critério de parada foi fixar o número de ciclos em 200.000.

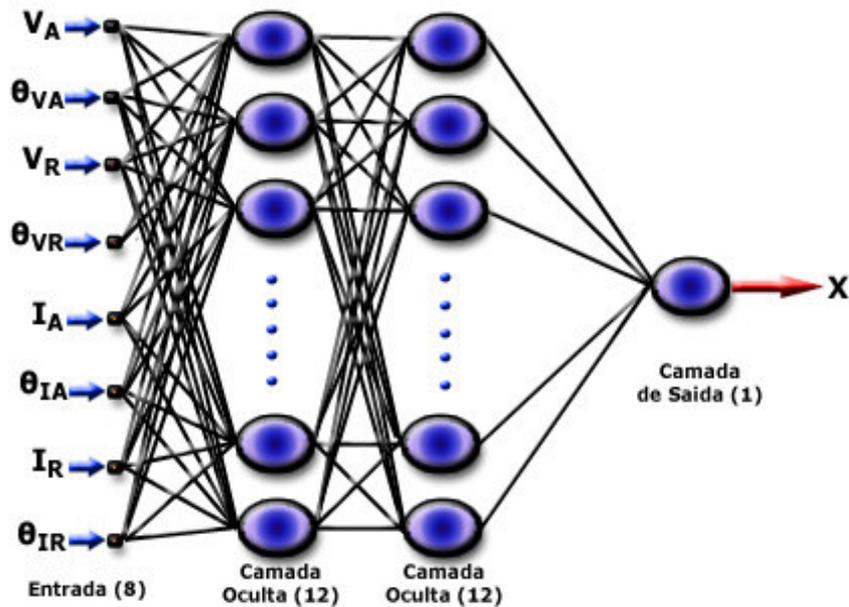


Figura 34 - Topologia da RNA para Falta Monofásica

4.3.3. RNA para Falta Bifásica

Para faltas bifásicas foram testadas várias topologias de RNA, até definir a topologia final. Em todos os testes utilizaram-se entradas com sinais de tensão e corrente das fases envolvidas no curto-circuito. Neste caso os testes foram executados com faltas bifásicas envolvendo as fases A e B. Para faltas bifásicas podemos ter curto-circuito envolvendo as fases A e B, fases B e C ou fases C e A. Foram definidos três conjuntos de padrões de entrada para avaliar a topologia da RNA, conforme a seguir:

RNA com 4 Entradas. Foram utilizados os valores dos módulos das tensões e correntes das fases A e B, como entrada da RNA. Os gráficos 12 e 13 apresentam os erros RMSE da validação e treinamento obtidos com os testes realizados variando o número de EPs entre 4 a 6 para uma ou duas camadas escondidas. Pode-se ver pelo Gráfico 13 que a RNA com 8 EPs em duas camadas ocultas obteve o melhor desempenho.

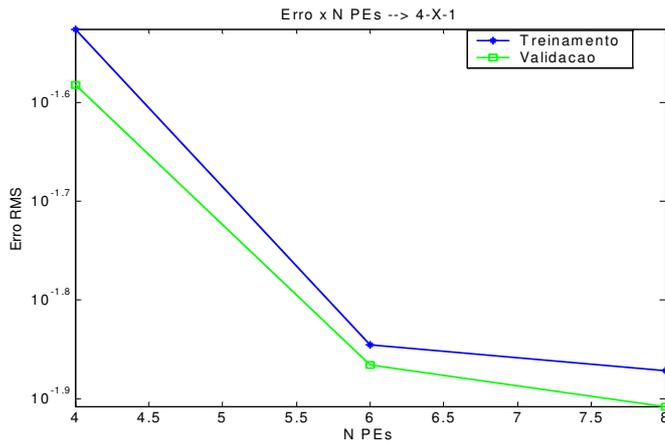


Gráfico 12 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica (4-X-1)

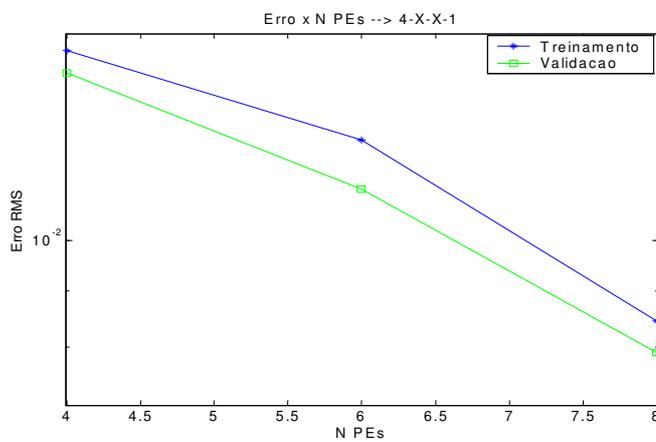


Gráfico 13 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica (4-X-X-1)

RNA com 6 Entradas. Neste caso utilizaram-se os valores dos módulos das tensões e correntes das fases A e B mais as defasagens angulares entre as tensões e correntes da fase A e B. Os gráficos 14 e 15 mostram os valores dos erros RMSE encontrados para validação e treinamento, variando o número de EPs entre 6 a 12 para 1 ou 2 camadas ocultas. Esta avaliação foi feita com um número de ciclos fixo de 50.000. Pode-se ver pelo Gráfico 15 que a RNA com 12 EPs em duas camadas ocultas obteve o melhor desempenho.

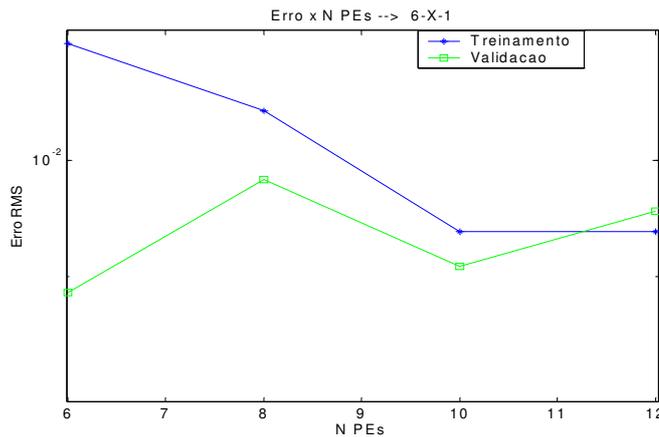


Gráfico 14 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica (6-X-1)

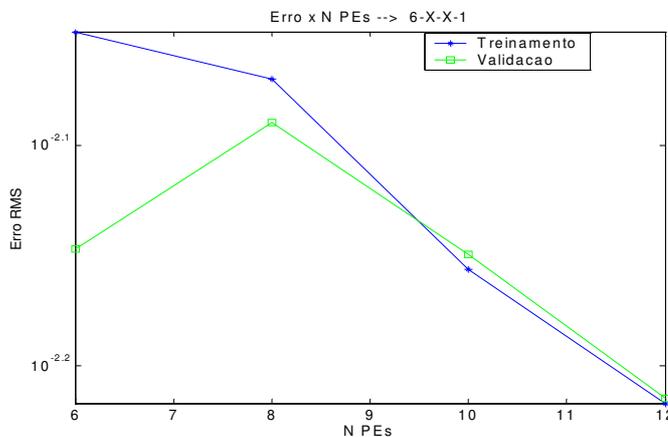


Gráfico 15 - Erro RMSE x Número de EP RNA Bifásica (6-X-X-1)

RNA com 8 Entradas. Para este caso os padrões de treinamento utilizados foram os módulos das tensões e correntes das fases A e B mais os respectivos valores dos ângulos, totalizando as oito entradas. Os gráficos 16 e 17 abaixo mostram os valores dos erros RMSE encontrados para validação e treinamento. Foi variado o número de EPs entre 8 a 16 para uma ou duas camadas ocultas. Como no caso da falta monofásica esta opção de entrada também apresentou um desempenho melhor quando comparada com as opções de 4 e 6 entradas. Pode-se ver pelo Gráfico 17 que a RNA com 12 EPs com duas camadas ocultas obteve melhor desempenho.

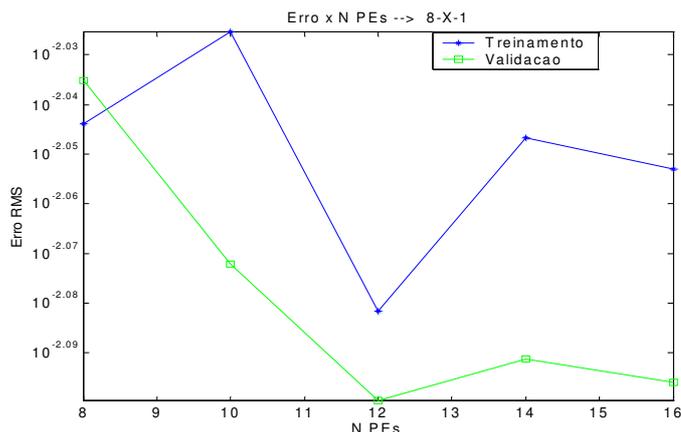


Gráfico 16 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica (8-X-1)

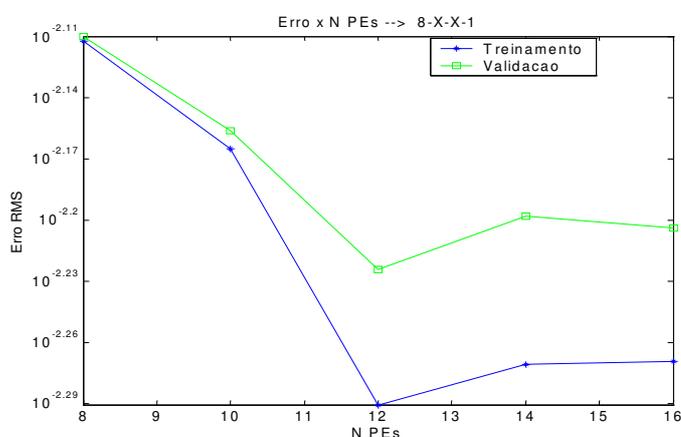


Gráfico 17 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica (8-X-X-1)

Após 96 treinamentos envolvendo várias topologias de redes observa-se que a falta bifásica apresenta, geralmente, erros RMSE menores comparando com a falta monofásica, ou seja, neste modelo de sistema elétrico a RNA responde melhor a faltas bifásicas. Na Tabela 6 abaixo apresentamos os erros RMSE das topologias de rede que apresentaram os melhores resultados.

Tipo de Falta	Topologia	Entrada	Erro RMSE Validação	Erro RMSE Treinamento
B I F Á S I C A	4 - 8 - 1	Módulos Ve I	0,0124	0,0135
	4 - 8 - 8 - 1		0,0079	0,0084
	6 - 6 - 1	Módulos e Defasagens Angulares entre V e I	0,0091	0,0094
	6 - 12 - 12 - 1		0,0061	0,0061
	8 - 12 - 1	Módulos e Ângulos de V e I	0,0079	0,0083
	8 - 12 - 12 - 1		0,0060	0,0051

Tabela 6 - Erro RMSE para as Topologias nas RNA para Falta Bifásica Testadas

O treinamento exaustivo também se mostrou vantajoso para este tipo de falta, conforme pode-se ver no Gráfico 18, onde os erros MSE da validação e do treinamento apresentam tendência de queda mesmo para um número de 200.000 ciclos, mas o erro da validação diminui muito lentamente após 180.000 ciclos.

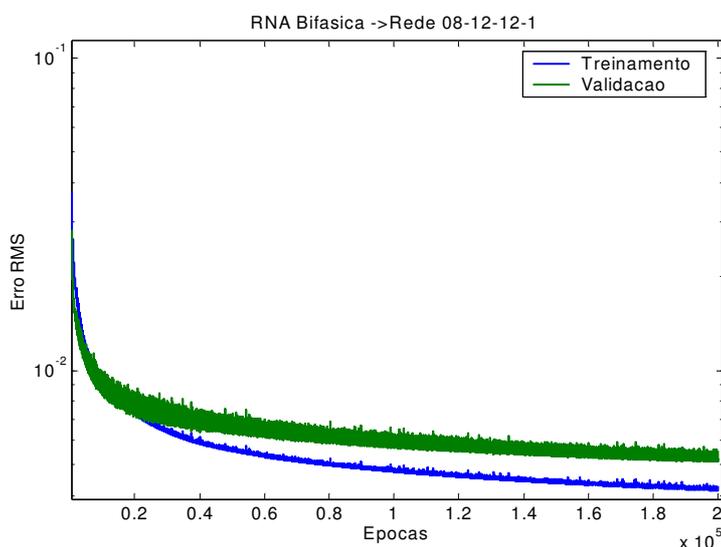


Gráfico 18 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Bifásica (8-12-12-1)

Definiu-se que a topologia final (Figura 35) para a RNA para faltas bifásicas é constituída de 8 entradas, 2 camadas escondidas com 12 elementos processadores em cada camada e 1 elemento processador na camada de saída. O critério de parada para esta RNA foi fixado em 190.000 ciclos.

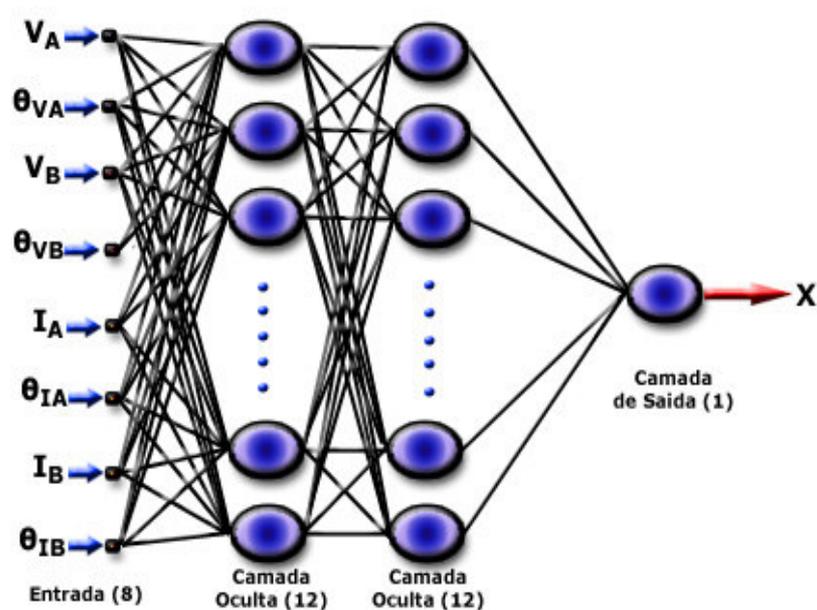


Figura 35 – Topologia da RNA para Falta Bifásica

4.3.4. RNA para Falta Bifásica-Terra

Para as RNAs que representam a falta bifásica-terra foram avaliados dois tipos de configurações de entradas, com os valores dos módulos das fases envolvidas mais o residual, e com o acréscimo dos seus respectivos valores de ângulos, conforme a seguir.

RNA com 6 Entradas. Neste caso utilizou-se dos valores em módulo das tensões e correntes das fases A e B mais o Residual (Terra) de corrente e tensão. Os gráficos 19 e 20 mostram os valores dos erros RMSE encontrados para validação e treinamento, variando o número de EPs entre 6 a 12 para 1 ou 2 camadas intermediárias. Pode-se ver pelo Gráfico 20 que a RNA com 12 EPs com duas camadas intermediárias obteve um melhor desempenho.

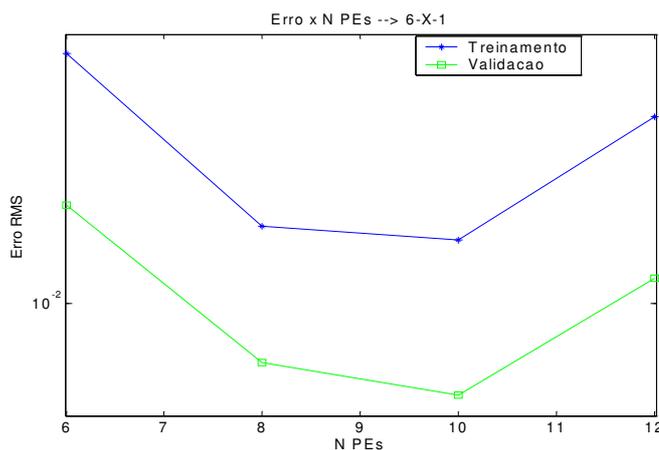


Gráfico 19 - Erro RMSE x Número de EP
RNA para Falta Bifásica-Terra (6-X-1)

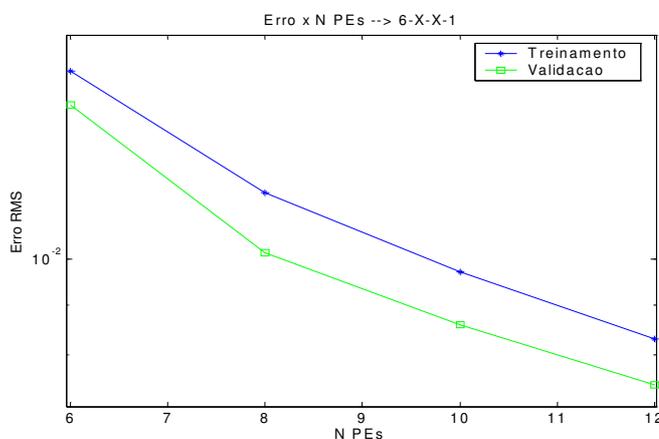


Gráfico 20 - Erro RMSE x Número de EP
RNA para Falta Bifásica-Terra (6-X-X-1)

RNA com 12 Entradas. Neste caso foram utilizados os valores dos módulos das tensões e correntes das fases A, B e Residual (Terra) mais as defasagens angulares entre as tensões e correntes das fases A e B, mais a defasagem angular entre a tensão residual e a corrente residual. Os gráficos 21 e 22 mostram os valores dos erros RMSE encontrados para validação e treinamento, variando o número de EPs entre 12 a 24 para 1 ou 2 camadas ocultas. Pode-se ver pelo Gráfico 22 que a RNA com 14 EPs com duas camadas intermediárias obteve melhor desempenho.

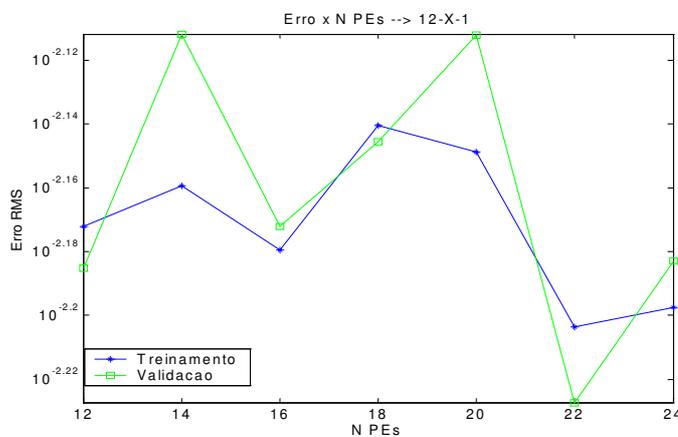


Gráfico 21 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica-Terra (12-X-1)

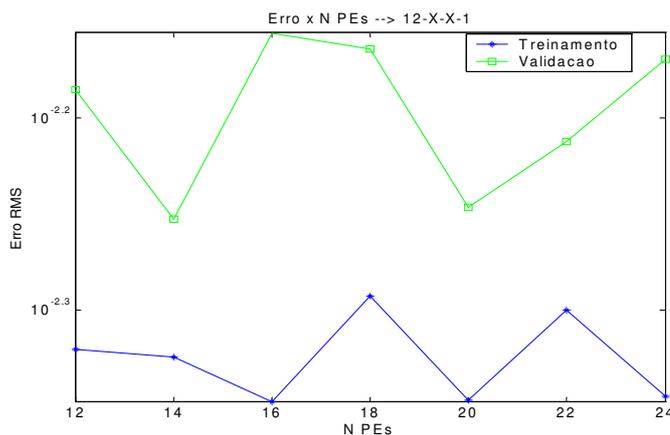


Gráfico 22 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Bifásica-Terra (12-X-X-1)

A Tabela 7 mostra os erros RMSE das topologias de RNA para faltas bifásicas-terra que apresentaram os melhores resultados. Observa-se que a RNA

com 12 entradas mostrou melhor desempenho na validação. Em relação ao número de camadas (1 ou 2) ambas apresentaram valores de desempenhos muito próximos, optou-se por utilizar a RNA com duas camadas e 14 elementos processadores em cada camada por apresentar o melhor desempenho.

Tipo de Falta	Topologia	Entrada	Erro RMSE Validação	Erro RMSE Treinamento
B I F Á S I C A TERRA	6 - 6 - 1	Módulos e Defasagens Angulares entre V e I	0.0092	0.0106
	6 - 12 - 12 - 1		0.0075	0.0083
	12 - 22 - 1	Módulos e Ângulos de V e I	0.0059	0.0063
	12 - 14 - 14 - 1		0.0056	0.0047

Tabela 7 - Erro RMSE para as Topologias nas RNA para Falta Bifásica-Terra Testadas

O Gráfico 23 que apresenta o erro RMSE para validação e treinamento, com a RNA escolhida contendo 12 entradas, 14 EPs em cada uma das duas camadas intermediárias e um 1 EP na camada de saída, pode-se observar que o erro da validação apresenta uma variação muito pequena a partir de 180.000 ciclos, similar ao curto bifásico, sendo portanto escolhido este número de ciclos como critério de parada. Para faltas bifásicas-terra o treinamento exaustivo também se mostrou vantajoso.

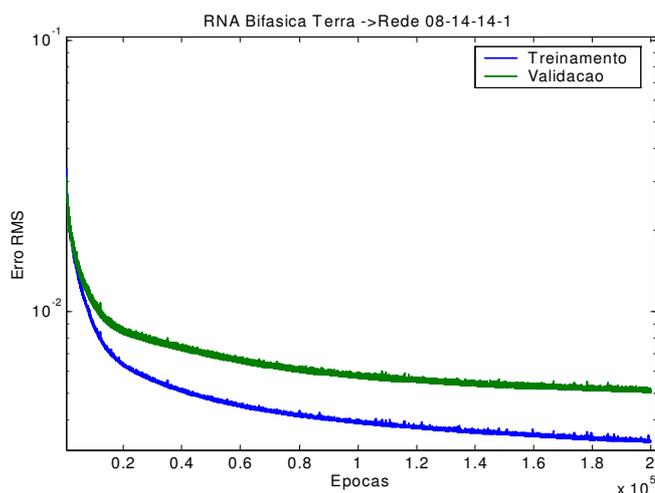


Gráfico 23 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Bifásica-Terra (8-14-14-1)

A Figura 36 mostra a topologia final escolhida após 88 treinamentos efetuados.

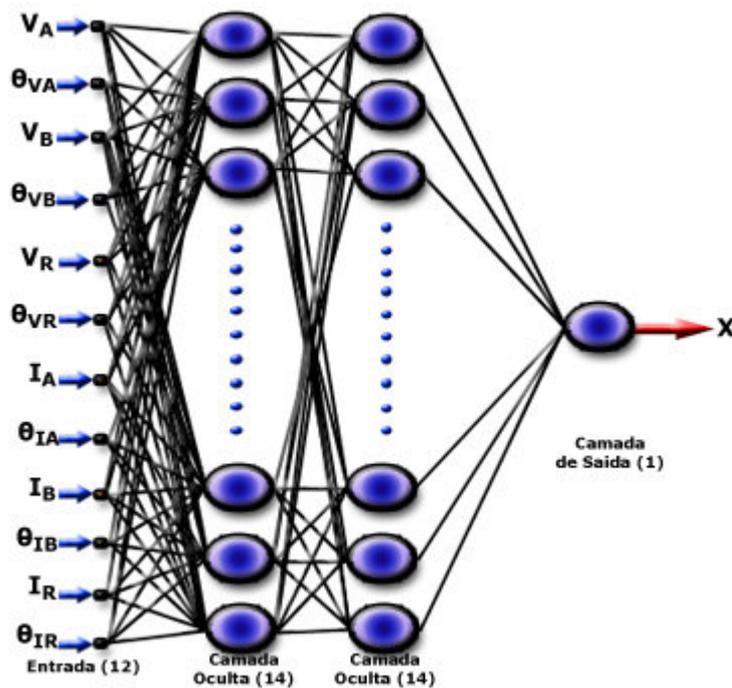


Figura 36 - Topologia da RNA para Falta Bifásica-Terra

4.3.5. RNA para Falta Trifásica

Para faltas trifásicas também foram avaliados dois tipos de configurações de entrada, ou seja, RNA com 6 e 12 entradas. Em nenhuma das RNAs foram utilizados os valores residuais de corrente e tensão, foram utilizados somente as informações das três fases da LT (A, B e C) como entrada da rede.

RNA com 6 Entradas. Neste caso foram utilizados os valores dos módulos das tensões e correntes das fases A, B e C. Os gráficos 24 e 25 mostram os valores dos erros RMSE encontrados para validação e treinamento, variando-se o número de EPs entre 6 a 12 para 1 ou 2 camadas intermediárias. Pode-se ver pelo Gráfico 25 que a RNA com 6 EPs em cada uma das duas camadas intermediárias obteve o melhor desempenho.

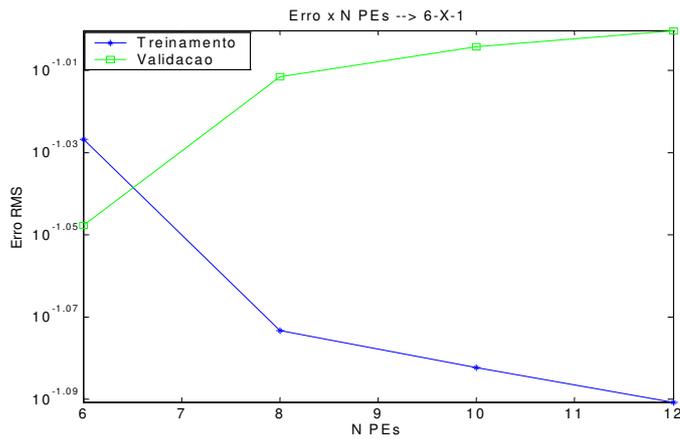


Gráfico 24 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Trifásica (6-X-1)

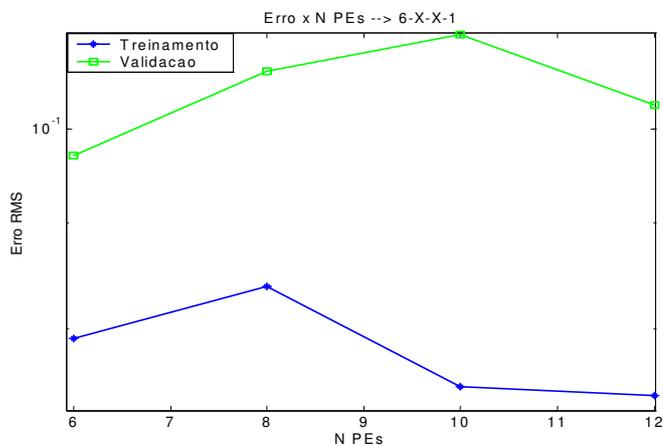


Gráfico 25 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Trifásica (6-X-X-1)

RNA com 12 Entradas. Para treinamento das RNAs com 12 entradas foram utilizados valores dos módulos das tensões e correntes das fases A, B e C e seus respectivos ângulos. Os gráficos 26 e 27 mostram os valores dos erros RMSE encontrados para validação e treinamento, variando o número de EPs entre 12 a 24 para 1 ou 2 camadas intermediárias. Pode-se ver pelo Gráfico 27, que a RNA com 14 EPs em cada uma das duas camadas intermediárias obteve o melhor desempenho.

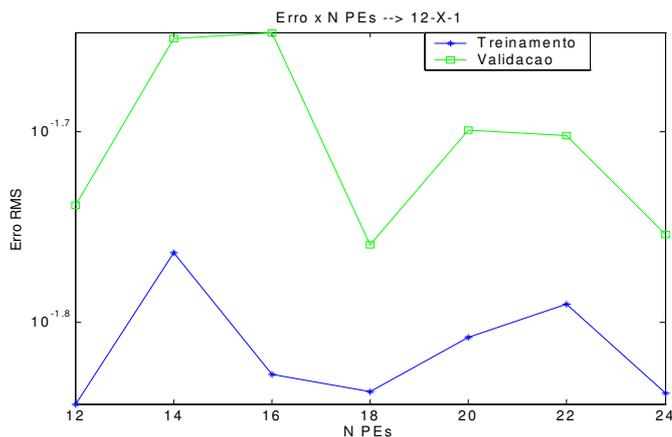


Gráfico 26 - Erro RMSE x Número de EP RNA para Falta Trifásica (12-X-1)

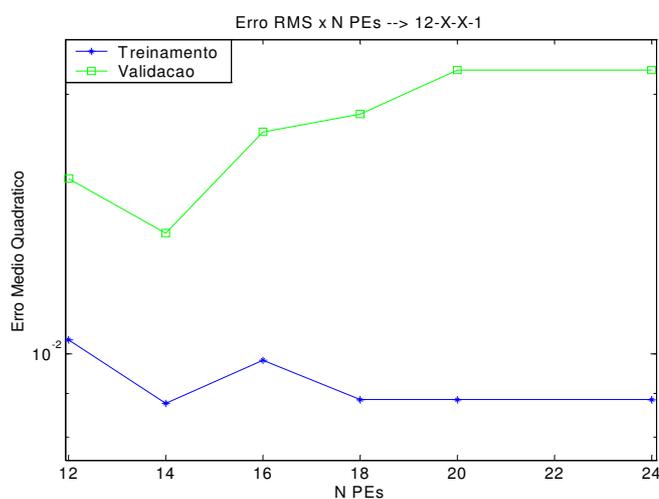


Gráfico 27 - Erro RMSE x Número de EP RNA Trifásica (12-X-X-1)

A Tabela 8 apresenta os menores erros RMSE obtidos das topologias de rede testadas, em função da configuração das entradas e o número de camadas intermediárias. No total foram testadas 88 RNAs.

Tipo de Falta	Topologia	Entrada	Erro RMSE Validação	Erro RMSE Treinamento
T R I F Á S I C A	6 - 6 - 1	Módulos e Defasagens Angulares entre V e I	0,0896	0,0940
	6 - 6 - 6 - 1		0,0971	0,0791
	12 - 18 - 1	Módulos e Ângulos de V e I	0,0174	0,0146
	12 - 14 - 14 - 1		0,0138	0,0088

Tabela 8 - Erro RMSE para as Topologias nas RNA para Falta Trifásica Testadas

O Gráfico 28 mostra o erro RMSE para o treinamento e validação da RNA para falta trifásica com 14 EPs em cada uma das duas camadas intermediárias, que apresentou o menor erro RMSE no conjunto de validação. Pode-se ver que este erro RMSE já apresenta pouca variação em torno de 48.000 ciclos.

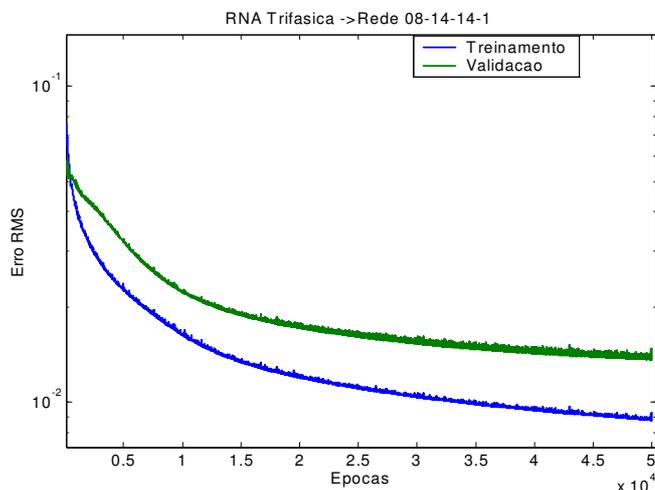


Gráfico 28 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Trifásica (8-14-14-1)

O Gráfico 29 apresenta o erro de validação e treinamento para 70.000 ciclos. Observa-se que a curva do erro RMSE dos dados da validação também apresenta pouca variação em torno do mesmo ponto do gráfico anterior.

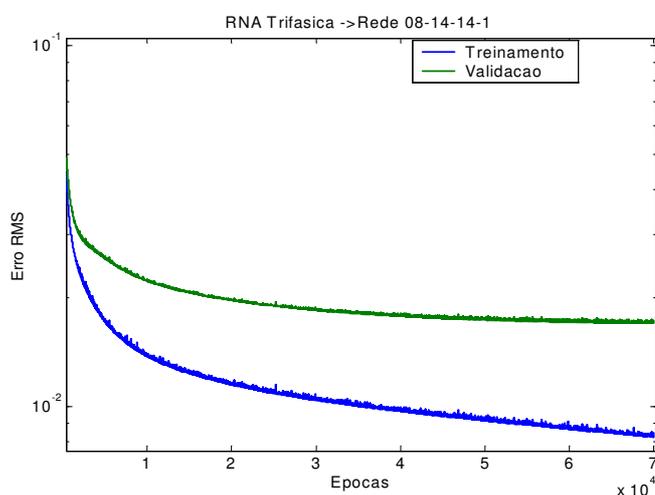


Gráfico 29 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Trifásica (8-14-14-1) – 70.000 ciclos

Numa nova tentativa de se estabelecer um critério de parada da RNA, visando definir o melhor ponto de parada, o comportamento do erro da validação apresentou um crescimento a partir de aproximadamente 30.000 ciclos. O Gráfico 30 abaixo apresenta o erro RMSE do conjunto de validação.

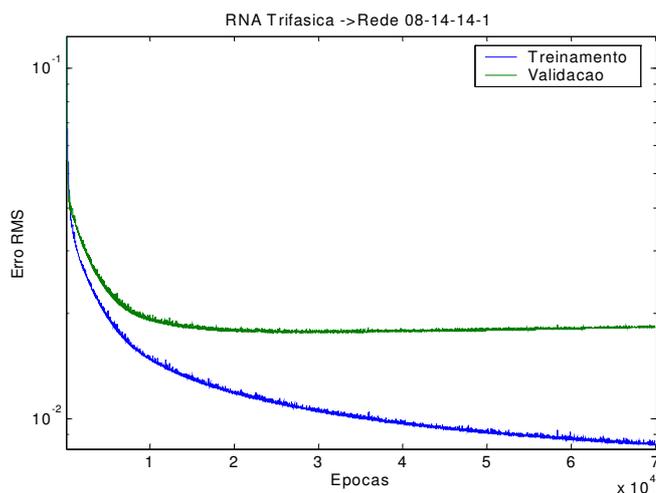


Gráfico 30 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Trifásica (8-14-14-1) – Parada Antecipada

O Gráfico 31 mostra uma aproximação do Gráfico 30, onde se confirma que em torno de 30.000 ciclos o erro RMSE do conjunto de validação começa a crescer, mostrando que para esta RNA o “Método de Parada Antecipada” também pode ser aplicado.

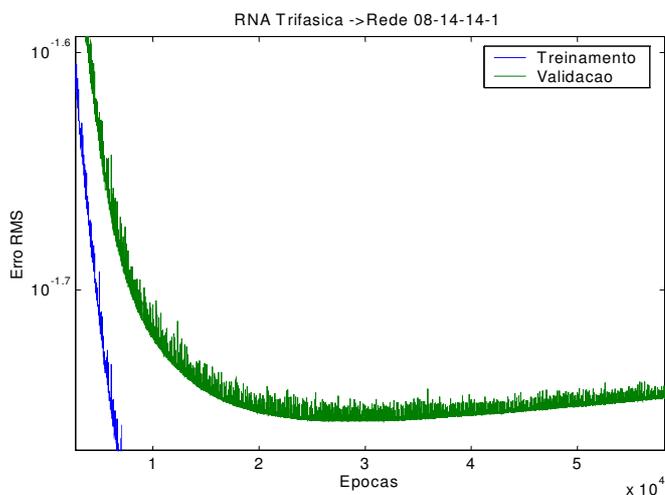


Gráfico 31 - Erro RMSE do Treinamento e Validação RNA para Falta Trifásica (8-14-14-1) – Pto Parada

Após as 88 RNAs testadas foi definida que a melhor topologia da rede é a constituída por 12 entradas, 14 EPs em cada uma das duas camadas escondidas e um 1 EP na camada de saída, representada na Figura 37. O critério de parada foi definido para um treinamento com 50.000 épocas ou o “Método de Parada Antecipada” com validação cruzada, o que ocorrer primeiro.

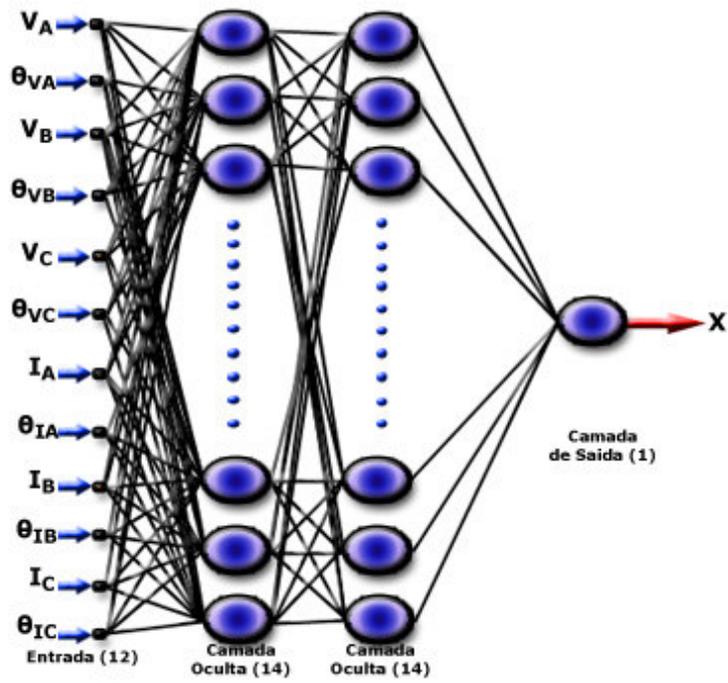


Figura 37 - Topologia da RNA para Falta Trifásica