

## 5. Estudos de Casos

Para avaliar o desempenho dos modelos de RNAs definidos neste trabalho, foram criados vários casos de testes com diversas simulações de falta. O desempenho da rede, no conjunto de testes é uma boa indicação da sua capacidade de generalização.

Na apresentação dos resultados para o conjunto de casos testes utilizou-se as métricas RMSE (“Root Mean Square Error”) mostrada na Equação 17, que penaliza os erros maiores, e o MAPE (“Mean Absolute Percentage Error”) mostrada na Equação 18, que apresenta o valor médio percentual das respostas. Os erros absolutos e percentuais também são utilizados em alguns gráficos e tabelas, onde se pode observar a localização real e a resposta da rede de uma maneira individual. Os valores dos erros RMSE e o MAPE são apresentados levando em consideração a localização da falta em valores percentuais da LT.

Nos resultados da identificação do tipo de falta o erro absoluto foi utilizado por ser mais apropriado, pois só são consideradas as respostas apresentadas pelos elementos processadores da camada de saída que estão dentro de dois intervalos, ou seja, as respostas da RNA que estão dentro do intervalo fechado 0 a 0,3 são consideradas como “0” e as respostas que estão dentro do intervalo fechado 0,7 a 1 são consideradas como “1”. Como os valores esperados são “0” e “1”, então os resultados da rede de identificação que apresentam erros absolutos inferiores a 0,3 são considerados como respostas corretas da rede, conforme descrito na seção 4.2.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \left| \frac{D_k - S_k}{D_k} \right|^2}{N}}$$

Equação 17- Erro RMSE

$$MAPE = \frac{\sum_{k=1}^N \left| \frac{D_k - S_k}{D_k} \right|}{N} \times 100\%$$

Equação 18 - Erro Médio Absoluto (MAPE)

- N= Número de Dados.
- $D_k$ =Resposta Real (Desejada)
- $S_k$ =Resposta Calculada

A Tabela 9 apresenta um índice percentual para os tipos de curto-circuito, do ano de 1998 a 2001, ocorridos no Sistema Furnas (Fonte ONS/Furnas). As faltas que envolvem uma fase à terra são responsáveis pela maioria dos desligamentos das LTs. O menor índice de ocorrência refere-se à falta trifásica, que envolve as três fases. Por este motivo o resultado referentes às faltas monofásicas (fase à terra) será mais explorado.

	1998	1999	2000	2001	MEDIA
Monofásica	69,05%	74,14%	83,13%	75,82%	76,17%
Bifásica	9,93%	13,91%	6,69%	11,81%	10,60%
Bifásica-Terra	12,70%	8,02%	7,29%	6,12%	8,11%
Trifásica	8,31%	3,93%	2,89%	6,26%	5,11%
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

Tabela 9 - Distribuição Percentual de Faltas no Sistema Elétrico de Furnas (1998-2001)

## 5.1. Testes com Casos Simulados

No caso da rede de identificação do tipo de falta, o conjunto de casos de teste utilizados para determinar o desempenho da rede é composto de 720 dados obtidos do sistema de simulação. Abaixo estão todos os parâmetros utilizados na simulação.

- Tipo de falta- AT, BT, CT ,AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC (10)
- Impedância do Sistema Equivalente –  $Z_{eqA_F}$ – $Z_{eqB_F}$  e  $Z_{eqA_f}$ – $Z_{eqB_f}$  (2)
- Impedância de falta – 17, 35, e 64 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 – 100 e 420 MW (2)
- Posição do curto-circuito – 6, 25, 44, 72, 88 e 97 % (6)

Para compor o conjunto de testes para a rede de localização de falta foram variados os parâmetros da simulação compondo um conjunto de 480 padrões, que foram divididos em 120 casos para faltas monofásicas (AT), 120 para faltas bifásicas (AB), 120 casos para faltas bifásicas-terra (ABT) e 120 casos para faltas trifásicas (ABC), conforme a seguir.

- 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, 23, e 56 ohms (3)
- Seqüência de abertura – 4 - 5 ciclos e 8 - 4 ciclos (2)
- Ângulo de incidência de falta – 90 graus (1)
- Comprimento da LT – 182 Km (1)
- Carregamento da LT – 100 MW (1)
- Posição do curto-circuito – 8, 12, 23, 32, 48, 57, 63, 74, 89 e 94 % (10)

### 5.1.1. Rede de Identificação de Falta

Utilizando a RNA para identificação do tipo de falta, pode-se ver no Gráfico 32 os erros absolutos referentes aos 720 casos do conjunto de testes, onde nenhuma saída da rede foi superior a 0.3, que é o maior erro absoluto permitido para uma classificação correta. Este fato mostra que a rede foi capaz de discriminar as fases envolvidas nas faltas em 100% dos casos. O erro RMSE encontrado para o conjunto de testes foi de 5.058 E-4.

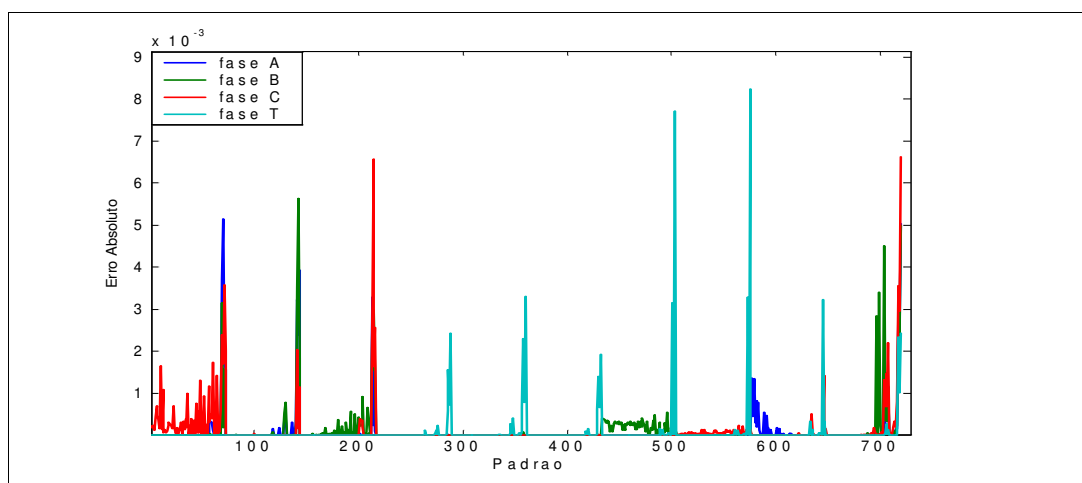


Gráfico 32 - Erro Absoluto (Identificação de Falta)

A facilidade da RNA em reconhecer as fases envolvidas na falta, conforme observado no Gráfico 32, estimulou um teste maior na rede de identificação de falta, ou seja, explorar uma gama maior de casos. Foi então simulado um novo conjunto de teste com 8102 dados envolvendo três outras LTs de 345 kV ligadas à mesma Subestação. Nestes casos as características da LT como: comprimento e impedância própria, são diferentes da LT utilizada no treinamento, ver seção 3.1. Os outros parâmetros foram combinados obtendo diversas situações de faltas.

O Gráfico 33 abaixo mostra o erro absoluto entre a resposta da RNA e a resposta desejada. O resultado da rede foi 100% correto para o conjunto de casos testes, onde todos os casos apresentaram os erros absolutos inferiores a 0,3, apesar de alguns casos apresentarem valores próximos. Todos os dados que apresentaram erros absolutos maiores que 0,05 tinham duas características comuns entre eles, ou seja, localização da falta próxima ao terminal remoto (98%) e alto valor da impedância de falta (90 ohms). O erro RMSE obtido sobre o conjunto de casos teste foi de  $5,800 \text{ E-}3$ .

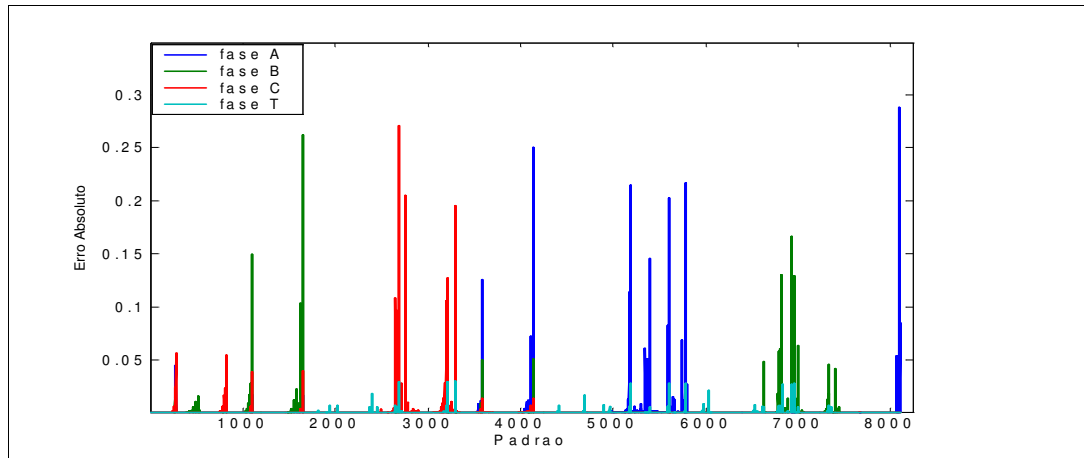


Gráfico 33 - Erro Absoluto para Identificação de Falta (Diferentes LTs de 345 kV)

Um outro conjunto de casos testes foi realizado com simulações referente a uma LT de 230 kV com 240 Km de comprimento, neste caso até o nível de tensão foi diferente da LT utilizada no treinamento da RNA. O total de casos foi de 168 dados referentes somente a faltas monofásicas onde os padrões 1 a 56 representam a resposta para falta fase AT, os padrões 57 a 112 representam as respostas da fase BT e os padrões 113 a 168 representam as respostas da fase CT. O Gráfico 34 mostra o erro absoluto da saída da RNA, onde observa-se que a rede de

identificação também obteve um acerto de 100% no conjunto de testes, sendo o maior valor do erro absoluto em torno de 0.08, bem inferior a 0.3. O erro RMSE obtido sobre o conjunto de testes foi de  $1,15 \text{ E-}2$ .

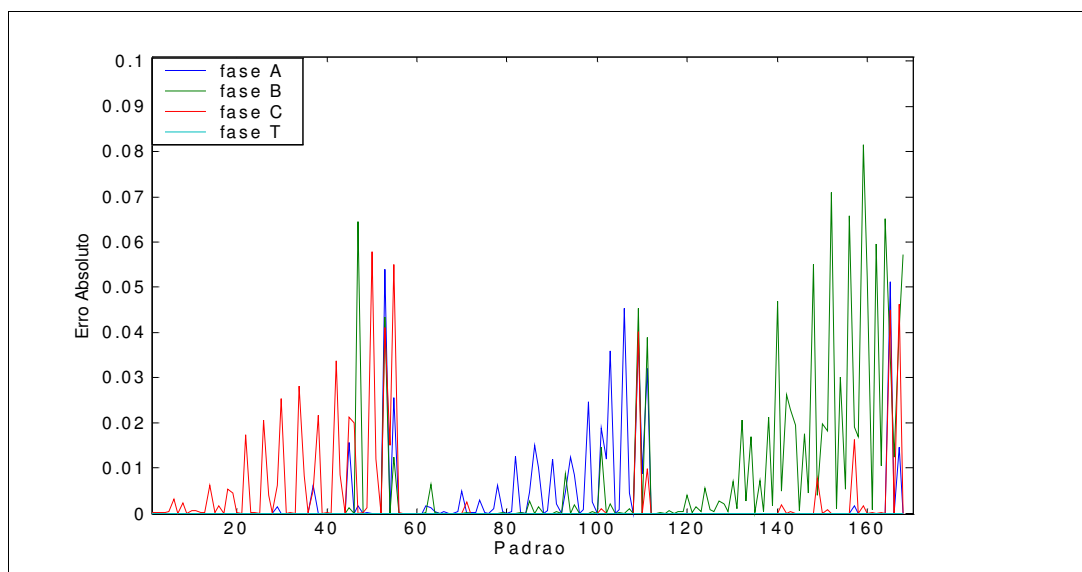


Gráfico 34- Erro Absoluto para Identificação de Falta (LT 230kV)

Para melhor avaliar o desempenho da RNA em linhas de transmissões com tensão base diferente da tensão base utilizada no treinamento, um novo caso teste foi gerado com parâmetros de uma LT de 500kV com 171 Km de extensão. Neste caso, como no anterior para LT de 230 kV, foram representados somente os curtos monofásicos. O índice de acerto na identificação das fases também foi de 100 %, o que pode ser observado no Gráfico 35, onde todos os erros absolutos foram inferiores a 0,0012. Os padrões 1 a 56 representam a resposta para falta fase AT, 57 a 112 os padrões da fase BT e de 113 a 168 os padrões fase CT. O erro RMSE encontrado para o conjunto teste da LT de 500kV foi de  $8,094 \text{ E-}4$ .

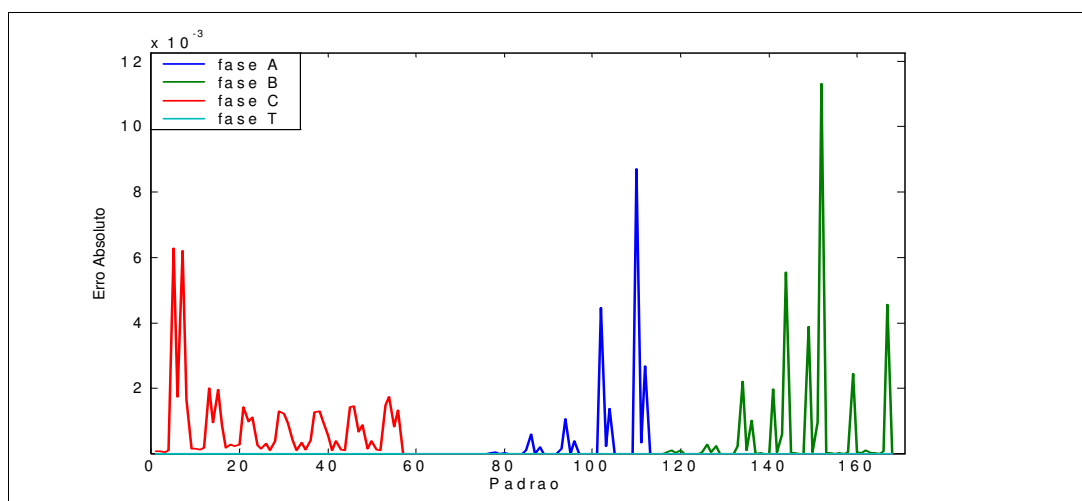


Gráfico 35 - Erro Absoluto para Identificação de Falta ( LT 500kV)

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos em todos os casos testados com a rede de identificação de falta. Observa-se que todos os casos testados obtiveram um acerto de 100% na discriminação da fase envolvida na falta, demonstrando a boa capacidade de generalização da rede.

<b>Descrição Resumida do Caso Teste</b>	<b>Número de Casos Simulados</b>	<b>Maior Erro Absoluto</b>	<b>Percentual de Identificação Correta</b>	<b>Erro RMSE</b>
LT de 345 kV com 182 Km. (Todos os tipos de faltas)	720	0,008	100 %	5,058 E-4
3 LTs de 345 kV (Todos os tipos de faltas)	8102	0,288	100 %	5,802 E-3
LT de 230 kV com 240 Km. (Falta Monofásica)	168	0,082	100 %	1,150 E-2
LT de 500 kV com 171 Km. (Falta Monofásica)	168	0,012	100 %	8,094 E-4

Tabela 10 – Análise dos Resultados Obtidos em Todos os Casos Simulados

O bom resultado apresentado acima é devido à utilização dos dados em p.u.. A representação em p.u. apresenta um bom indicativo para se obter uma rede única no que diz respeito à identificação da falta.

### **5.1.2. Rede de Localização de Falta**

Como a localização do ponto de falta é dependente da identificação correta das fases envolvidas, todo o conjunto de casos testes utilizados na avaliação do desempenho da rede para localização de falta foram previamente submetidos à rede de identificação de falta. Os gráficos 5, 6, 7 e 8 representados em 3D, apresentam os resultados para falta monofásica (AT), bifásica (AB), bifásica-terra (ABT) e trifásica (ABC), respectivamente. Nestes gráficos pode-se observar que a rede neural identificou corretamente todos os casos simulados.

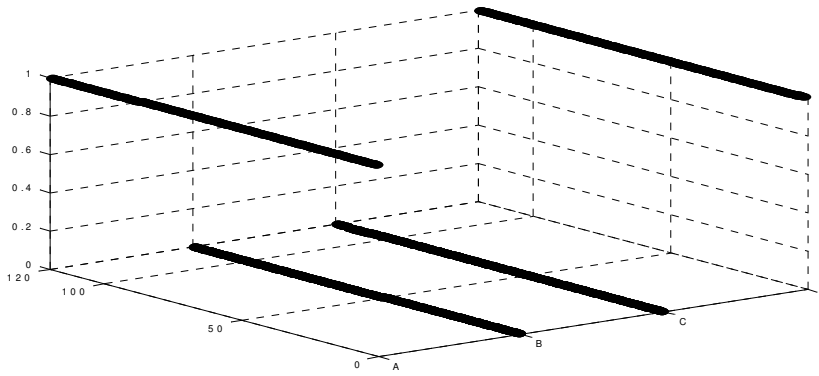


Gráfico 36 - Identificação de Falta (AT)

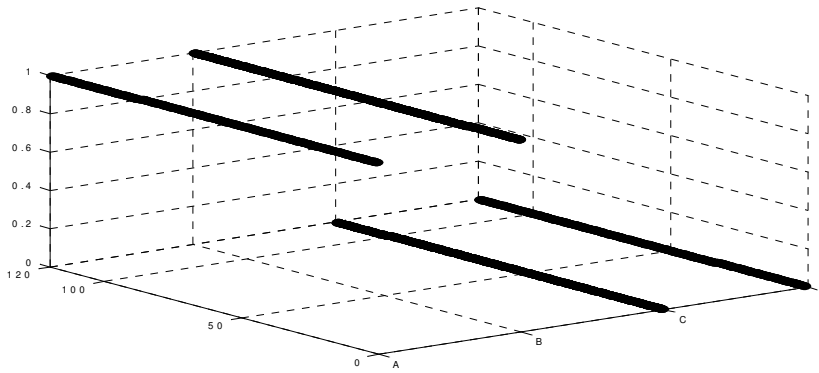


Gráfico 37 - Identificação de Falta (AB)

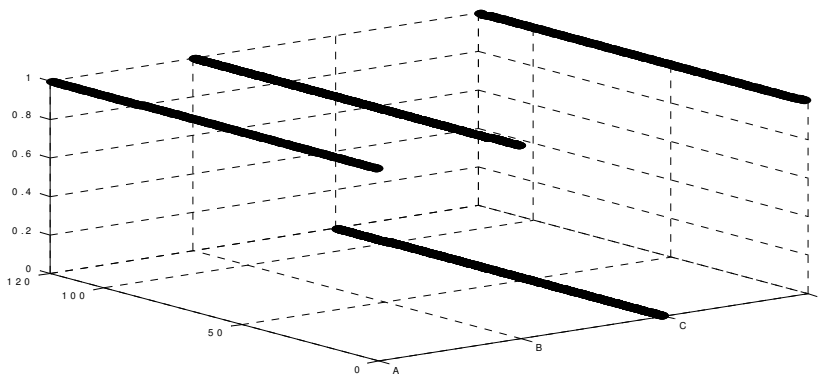


Gráfico 38 - Identificação de Falta (ABT)

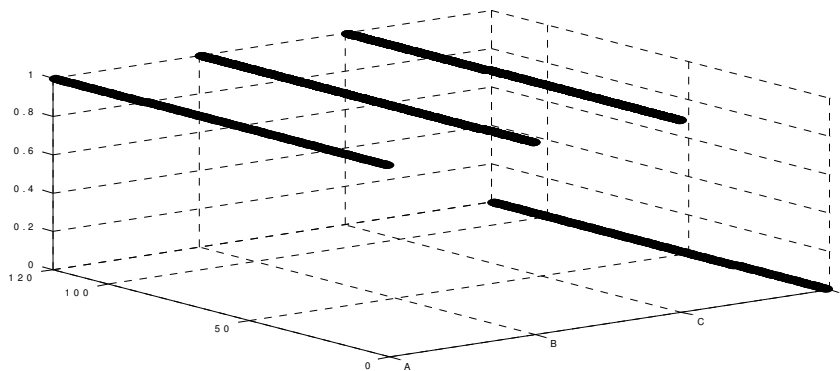


Gráfico 39 - Identificação de Falta (ABC)

Nos resultados de localização de falta apresentados a seguir, a falta monofásica será mais enfatizada devido ao seu grande índice de ocorrência se compararmos com os outros tipos de faltas.

Cabe ressaltar que os resultados da RNA para localização de falta são apresentados como porcentagem da LT. Quando o resultado da rede for 40%, significa que a falta ocorreu a 40 % da LT a partir do terminal local. Em função disso os erros absolutos apresentados nos resultados, representam erros em função do comprimento da LT. Por exemplo um erro absoluto de 2% representa um erro de 3,64 Km, já que a linha de transmissão utilizada nos testes e treinamento da RNA possui 182 Km. Do mesmo modo, os erros percentuais são apresentados em função das respostas da rede,então quando o resultado da rede for 12 % e sua localização real for 10% , o erro percentual considerado será de 20%. Esta explicação é necessária para evitar dificuldades de interpretação nos resultados apresentados a seguir. Na prática o erro percentual é o mais utilizado, mas para faltas próximas a subestação local pode-se ter erros altos que não traduzem o desempenho dos resultados, por esta razão também foi utilizado o erro absoluto que para esta aplicação se mostra mais apropriado.

#### ➤ *Falta Monofásica*

O Gráfico 40 mostra o erro absoluto em função de cada padrão de falta monofásica apresentada à rede. As faltas monofásicas são representadas pelas faltas fase A à terra. Observa-se que o erro absoluto não ultrapassa 2%, demonstrando a boa generalização e precisão obtida com RNA para faltas monofásicas.



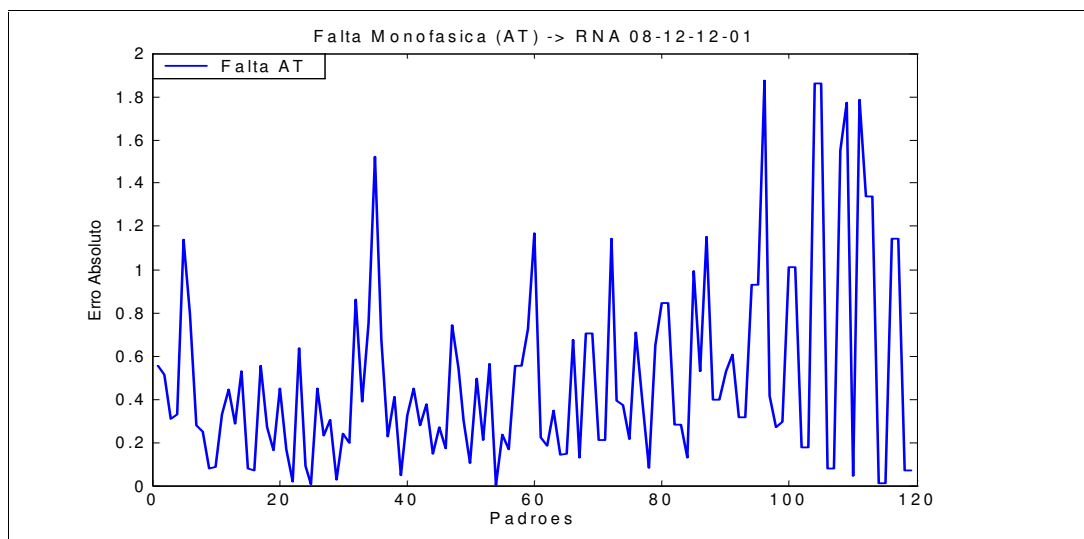


Gráfico 40 - Erro Absoluto para Falta Monofásica

No Gráfico 41 onde são apresentados os erros percentuais para todos os padrões, observa-se que estes erros são maiores para faltas próximas ao terminal local da LT, apesar do erro absoluto apresentar menores valores para a mesma faixa de comprimento, ou seja, em torno de 20% do comprimento da LT (padrões 1 ao 36). O maior erro percentual encontrado foi de 14,22%, sendo que em 94% dos casos testados os erros percentuais apresentam valores inferiores a 5%.

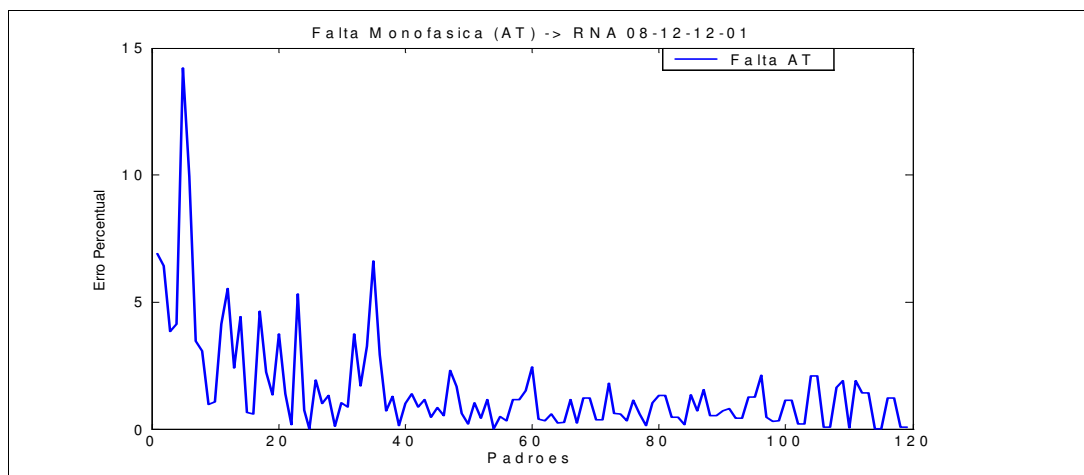


Gráfico 41 - Erro Percentual para Falta Monofásica

O Gráfico 42 apresenta a localização real da falta e a resposta da RNA para todos os testes realizados, onde também é apresentado a impedância de falta ( $Z_f$ ). Pode-se ver que o desempenho da rede para localização de falta monofásica apresenta ótimos resultados. Em relação à impedância de falta, a RNA também apresentou um bom desempenho quanto a localização, o que pode ser visto com mais detalhes no Gráfico 43, onde os padrões 37 a 48 representam faltas

localizadas a 32% da LT, mas com 3 valores de impedância de falta (08, 23 e 56 ohms).

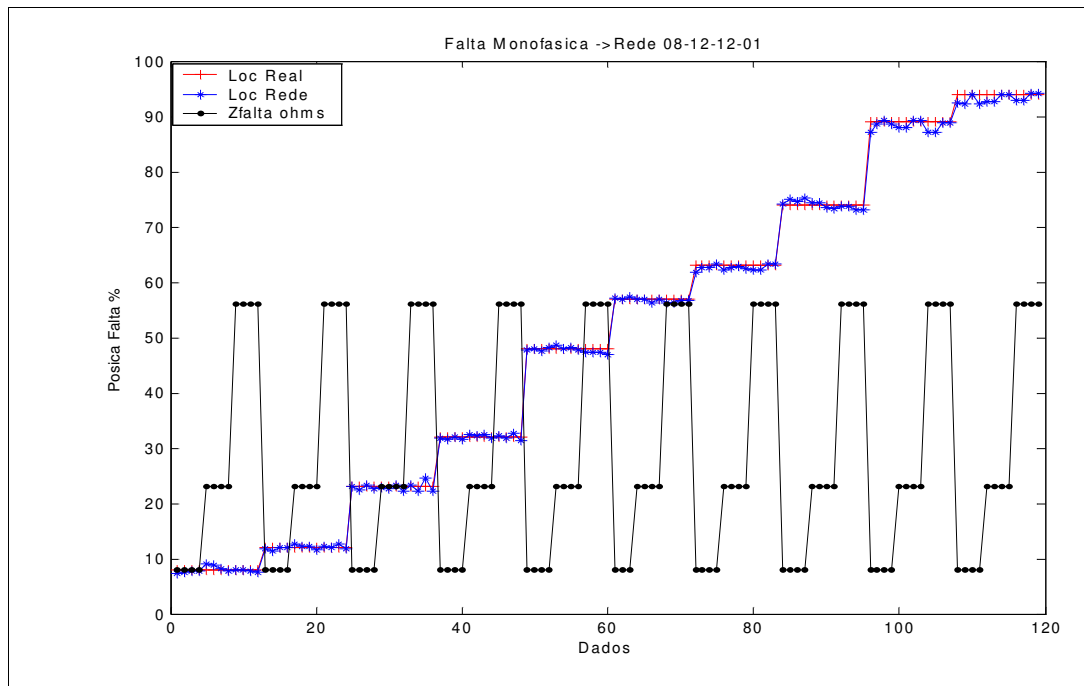


Gráfico 42 - Localização Real, Saída da RNA e Impedância de Falta para Falta Monofásicas

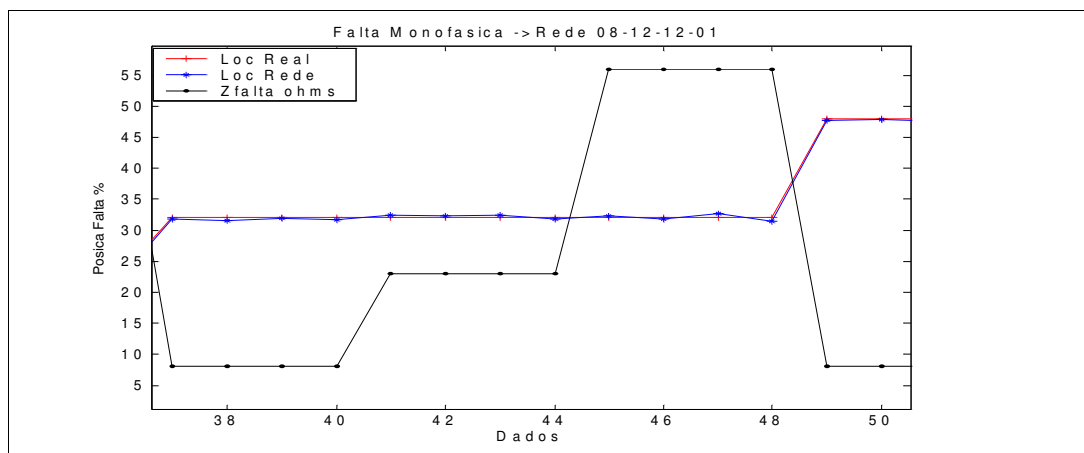


Gráfico 43 - Detalhes da Localização Real, Saída da RNA e Impedância de Falta

A Tabela 11 apresenta os resultados encontrados para faltas aplicadas entre 8% e 94% da LT, com impedância de falta ( $Z_f$ ) igual a 56 ohms ( $\Omega$ ) e fonte local forte, considerando que o terminal remoto da LT também está fechado. Na Tabela 12 os resultados apresentados referem-se aos mesmos dados da Tabela 11, mas com o terminal remoto da LT aberto, ou seja, sem contribuição do terminal remoto (circuito radial). A rede apresenta bons resultados para ambas as situações apresentadas, mostrando também seu bom desempenho em relação à sequência de abertura da LT.

Padrão	Localização	Localização	Erro	Erro
	Real	Rede	Absoluto	Percentual
	%	%	%	%
9	8,0	7,9	0,1	0,97
21	12,0	12,2	0,2	1,40
33	23,0	23,4	0,4	1,69
45	32,0	32,3	0,3	0,84
57	48,0	47,4	0,6	1,15
68	57,0	56,3	0,7	1,23
80	63,0	62,2	0,8	1,34
92	74,0	73,7	0,3	0,43
104	89,0	87,1	1,9	2,09
116	94,0	92,9	1,1	1,21

Tabela 11 - Falta Monofásica (AT) c/ Terminal Remoto Fechado

Padrão	Localização	Localização	Erro	Erro
	Real	Rede	Absoluto	Percentual
	%	%	%	%
10	8,0	7,9	0,1	1,08
22	12,0	12,0	0,0	0,17
34	23,0	22,2	0,8	3,26
46	32,0	31,8	0,2	0,53
58	48,0	47,4	0,6	1,15
69	57,0	56,3	0,7	1,23
81	63,0	62,2	0,8	1,29
93	74,0	73,7	0,3	0,44
105	89,0	87,1	1,9	2,08
117	94,0	92,9	1,1	1,12

Tabela 12 - Falta Monofásica (AT) c/ Terminal Remoto Aberto

➤ **Falta Bifásica, Bifásica-Terra e Trifásica**

O Gráfico 44 e o Gráfico 45 apresentam os erros absolutos e percentuais, respectivamente, obtidos no conjunto de casos testes para faltas bifásicas. Pode-se ver que os erros absolutos são na sua maioria inferiores a 1%. No Gráfico 45 observa-se que os maiores erros percentuais obtidos estão compreendidos na faixa de aproximadamente 20 % do comprimento da LT, semelhante ao caso de faltas monofásicas. O erro percentual máximo encontrado foi de 8,50%, mas na grande maioria dos resultados os erros absolutos foram inferiores a 1% (1,82 Km). Para falta bifásica a RNA apresenta uma resposta mais precisa.

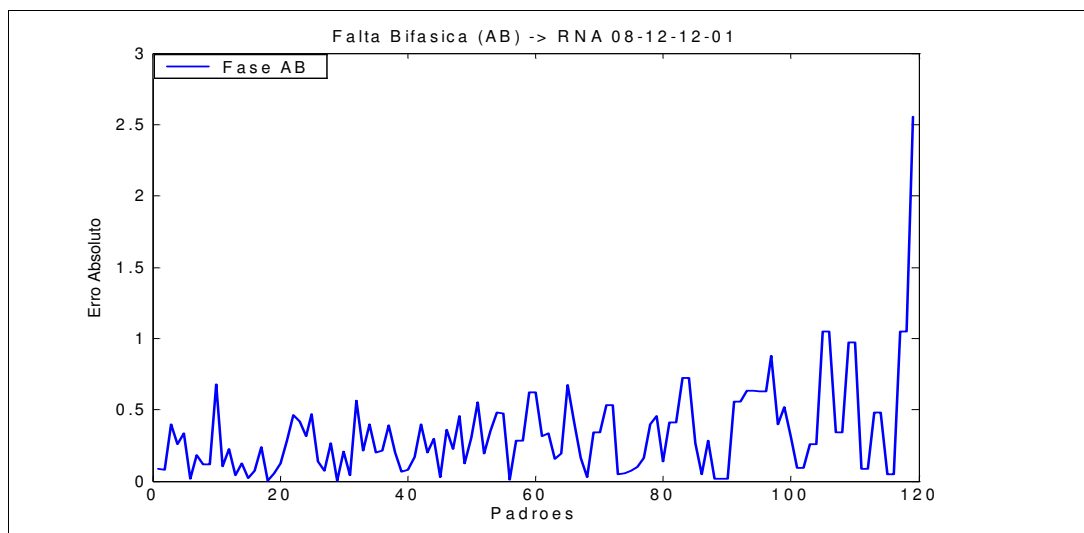


Gráfico 44- Erro Absoluto para Falta Bifásica

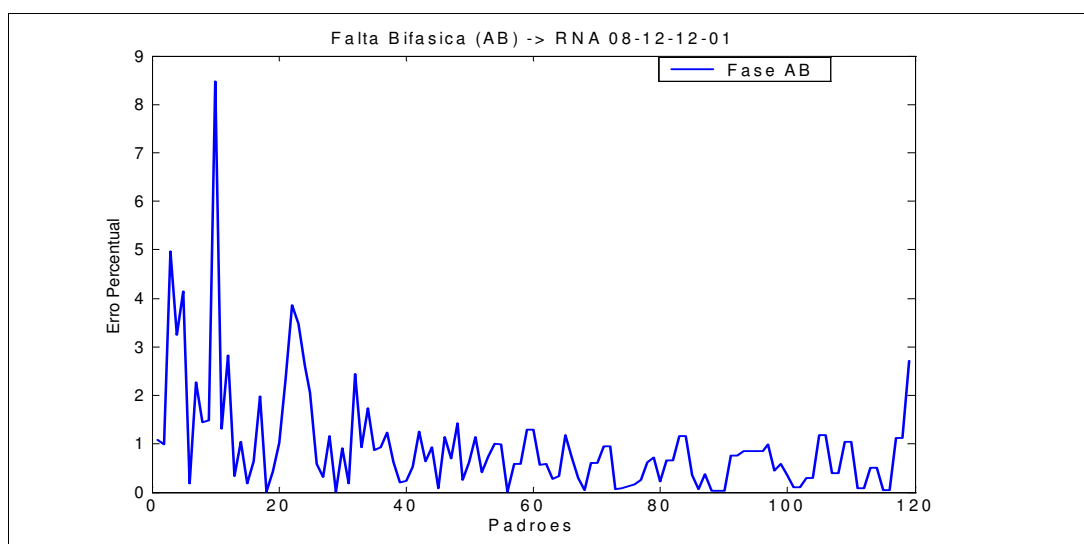


Gráfico 45 - Erro Percentual para Falta Bifásica

O Gráfico 46 e o Gráfico 47 apresentam os erros absolutos e percentuais, respectivamente, obtidos no conjunto de casos testes para faltas bifásicas-terra. Os erros absolutos são na sua maioria inferiores a 1% (1,82Km). No Gráfico 47 observa-se que os maiores erros percentuais obtidos estão na faixa de aproximadamente 20 % inicial da LT, o mesmo apresentado para faltas monofásicas e bifásicas.

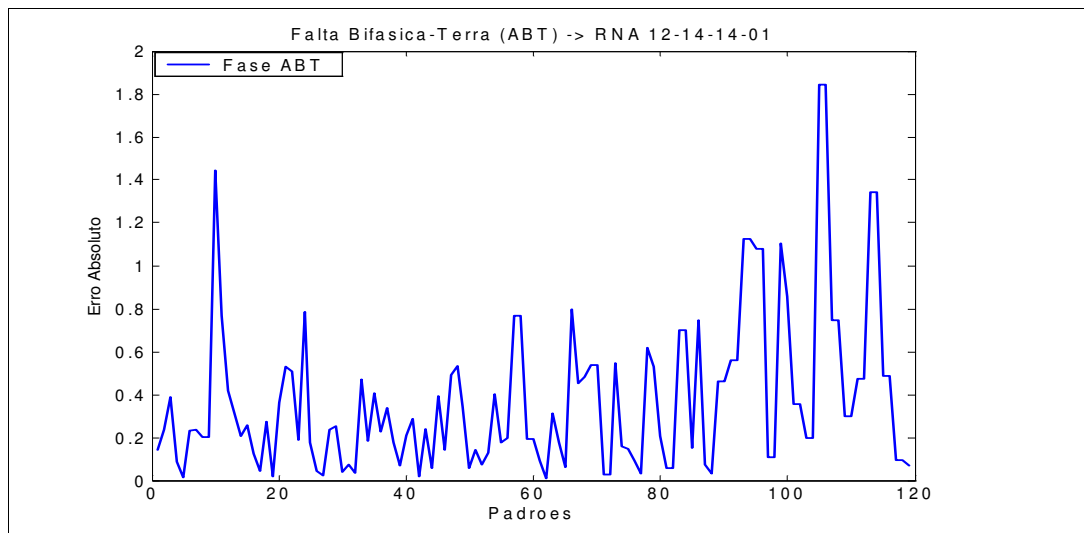


Gráfico 46 - Erro Absoluto para Falta Bifásica-Terra

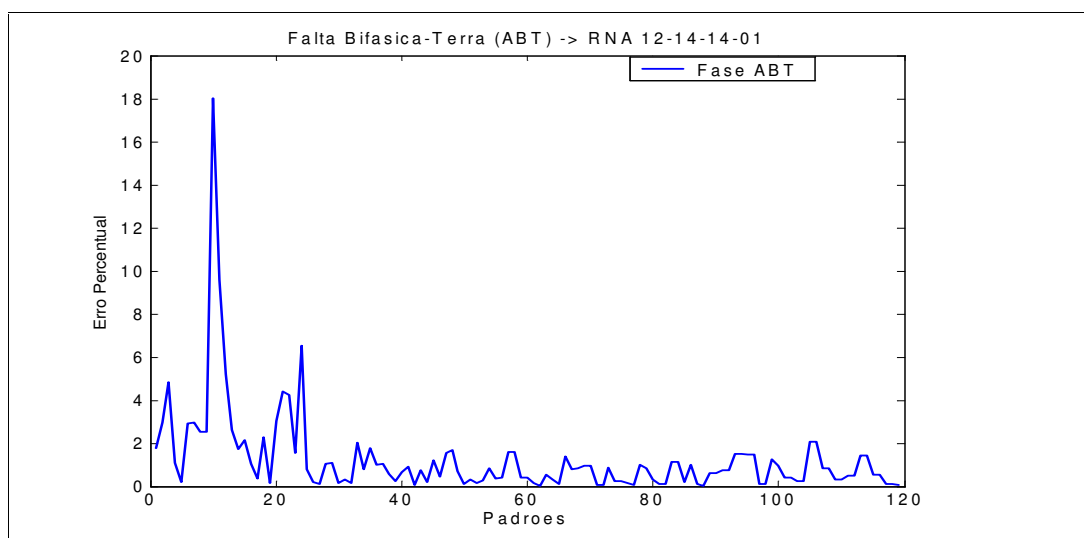


Gráfico 47 - Erro Percentual para Falta Bifásica-Terra

O Gráfico 48 e o Gráfico 49 apresentam os erros absolutos e percentuais, respectivamente, obtidos no conjunto de casos testes para faltas trifásicas. Os erros absolutos são na sua maioria inferiores a 1,5% (2,7 Km) porém, comparando com os outros tipos de curtos-circuitos, o trifásico apresentou erros maiores se analisados individualmente. Também se pode observar que os maiores erros percentuais obtidos estão na faixa de aproximadamente 20 % do comprimento da LT, sendo então uma característica apresentada para todos os tipos de faltas, em função do conjunto de treinamento. Porém os erros absolutos foram na sua grande maioria baixos, independente da localização da falta.

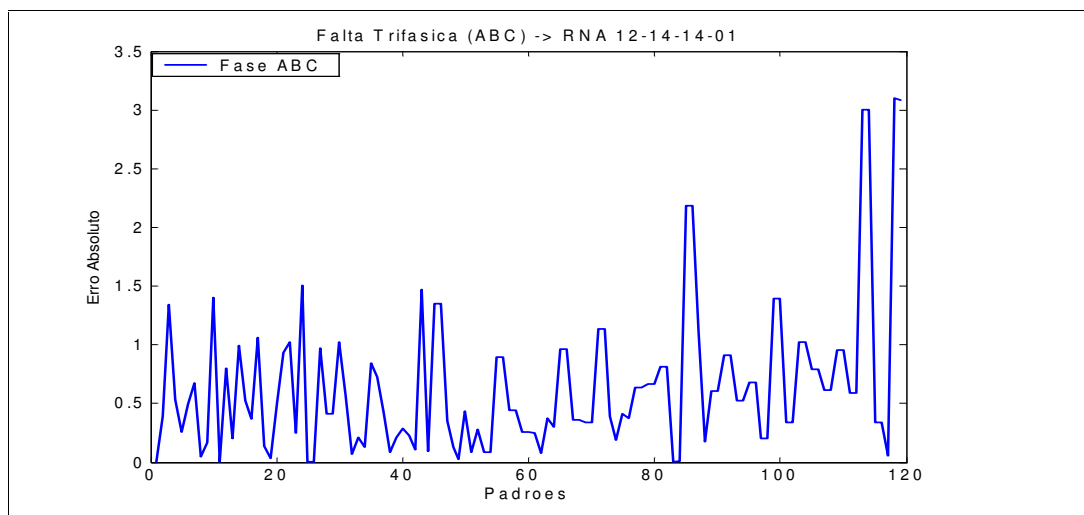


Gráfico 48 - Erro Absoluto para Falta Trifásica

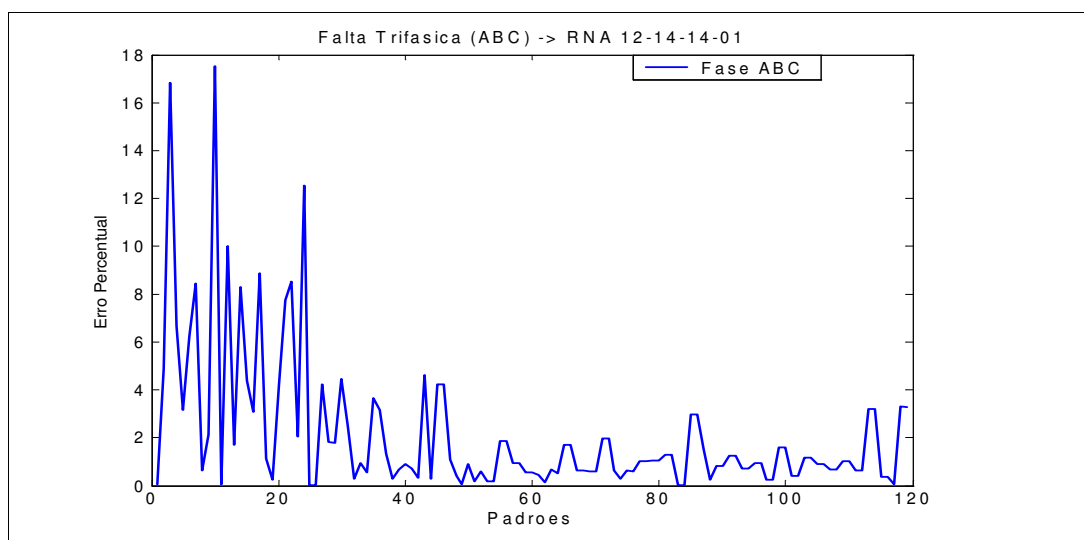


Gráfico 49 - Erro Absoluto para Falta Trifásica

Na Tabela 13 são apresentados os erros RMSE e MAPE obtidos para todas as faltas, onde pode-se comprovar que a RNA para falta bifásica obteve um menor erro médio absoluto (MAPE) sendo inferior a 1% e o menor RMSE. A RNA que obteve o pior desempenho foi a RNA para faltas trifásicas, porém o erro médio atingido foi de 2,128 %, o que se pode considerar como um bom desempenho.

Falta	REDE	Erro RMS	MAPE
Monofásica	8-12-12-1	2,546	1,565
Bifásica	8-12-12-1	1,476	0,956
Bifásica-Terra	12-14-14-1	2,414	1,246
Trifásica	12-14-14-1	3,703	2,128

Tabela 13 - Erro RMSE e MAPE para os Teste

## 5.2. Testes com Casos Reais

Alguns casos reais foram obtidos em Furnas, tendo sua localização informada pelo pessoal de manutenção de linhas de transmissão. Estes casos referem-se a 5 faltas monofásicas de duas LTs do Sistema Elétrico de Furnas. Para o treinamento das RNAs foi utilizada a mesma topologia da rede com a LT de 345 kV, ou seja, 8 entradas 14 elementos processadores em cada uma das duas camadas intermediárias e 1 elemento processador na camada de saída. Os valores dos parâmetros de aprendizados, como taxa de aprendizagem e o termo momentum foram os mesmos. Para a obtenção do conjunto de validação e treinamento de cada LT foram variados os mesmos parâmetros utilizados nas simulações anteriores, exceto os parâmetros elétricos da LT e as fontes equivalentes, que são únicos para cada sistema equivalente.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da RNA de localização com os dados reais de faltas provocadas por descargas atmosféricas. As primeiras duas faltas se referem a uma LT de 500kV, com 171 Km e as três últimas faltas são referentes a uma LT de 345kV com 254 Km de extensão. O maior erro percentual encontrado foi de 26,01% para a LT de 500kV, apesar do erro absoluto ser de 1,67% (2,8 Km), neste caso o curto-circuito ocorreu a menos de 20 % do comprimento da LT. Nos resultados apresentados anteriormente, para os casos simulados, vemos que nesta faixa da LT podem ocorrer erros percentuais mais elevados para a resposta da RNA. Todas as outras faltas apresentadas obtiveram erros absolutos e percentuais próximos aos obtidos com os casos simulados.

LT	Falta	Fases Envolvidas	Localização Real (%)	Localização RNA (%)	Erro Absoluto (%)	Erro Percentual
LT 500 kV	Monofásica	BT	50,30	48,11	2,19	4,35%
LT 500 kV	Monofásica	AT	6,42	4,75	1,67	26,01%
LT 345 kV	Monofásica	AT	90,02	91,76	1,74	1,93%
LT 345 kV	Monofásica	CT	93,61	94,71	1,10	1,18%
LT 345 kV	Monofásica	CT	30,30	31,87	1,57	5,18%

Tabela 14 - Resultados da Localização de Falta com RNA Utilizando Dados Reais.

Para verificar quais as fases estavam envolvidas nos curtos-circuitos a mesma RNA de identificação da LT de 345 kV com 182 Km foi utilizada nos casos reais. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para todos os casos reais.

Pode-se ver que a RNA identificou corretamente todas as fases envolvidas no curtos-circuitos.

LT	Falta	Fases Envolvidas	Resposta da RNA			
			A	B	C	T
LT 500 kV	Monofásica	BT	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000
LT 500 kV	Monofásica	AT	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
LT 345 kV	Monofásica	AT	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000
LT 345 kV	Monofásica	CT	0,0003	0,0000	0,9998	1,0000
LT 345 kV	Monofásica	CT	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000

Tabela 15 – Resposta da Rede de Identificação da Falta para os Casos Reais

### 5.3. Comparando o Resultado com Algoritmo Tradicional

Alguns algoritmos para a localização de falta utilizando dados de um terminal são bem difundidos na literatura, onde destacamos os métodos de Takagi [18] [19] [20], Wiszniewski [21], Eriksson [22] e RL série [26].

Para melhor avaliação dos módulos de localização de falta com RNA utilizando informações de apenas um terminal de LT, uma comparação com o algoritmo de Takagi [18] é feita com dados simulados e com os dados reais apresentados na seção anterior. A escolha do algoritmo de Takagi<sup>1</sup> deve-se à sua importância, atualmente é considerado um dos algoritmo mais conceituados para localização de falta, com dados de um terminal, e também por ser utilizado por Furnas em seu sistema automático de localização.

#### 5.3.1. Casos Simulados

Como na apresentação dos resultados das RNAs, para os casos simulados, a comparação com o algoritmo de Takagi também será destacada para faltas monofásicas.

##### ➤ *Falta Monofásica*

No Gráfico 50 são apresentados os erros percentuais das saídas da RNA e dos resultados obtido pelo algoritmo de Takagi. Neste gráfico pode-se observar



um desempenho melhor para RNA a partir de 20% da LT. Para faltas no início da LT há uma superioridade para o algoritmo de Takagi, porém este algoritmo apresenta erros absolutos e percentuais significativos para faltas próximas ao fim da LT, onde a RNA apresenta bons resultados.

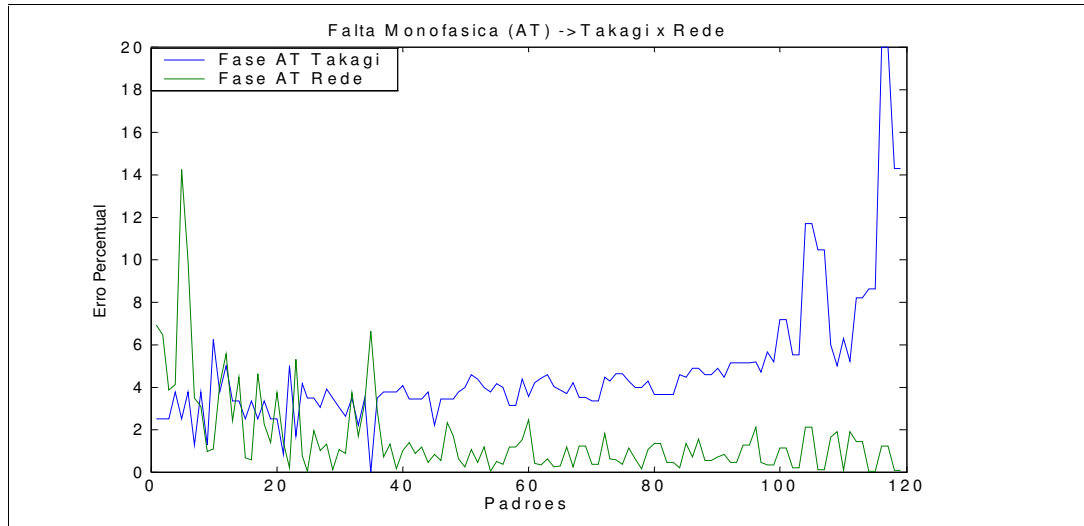


Gráfico 50 - Erro Percentual Localização RNA x Takagi (Monofásica)

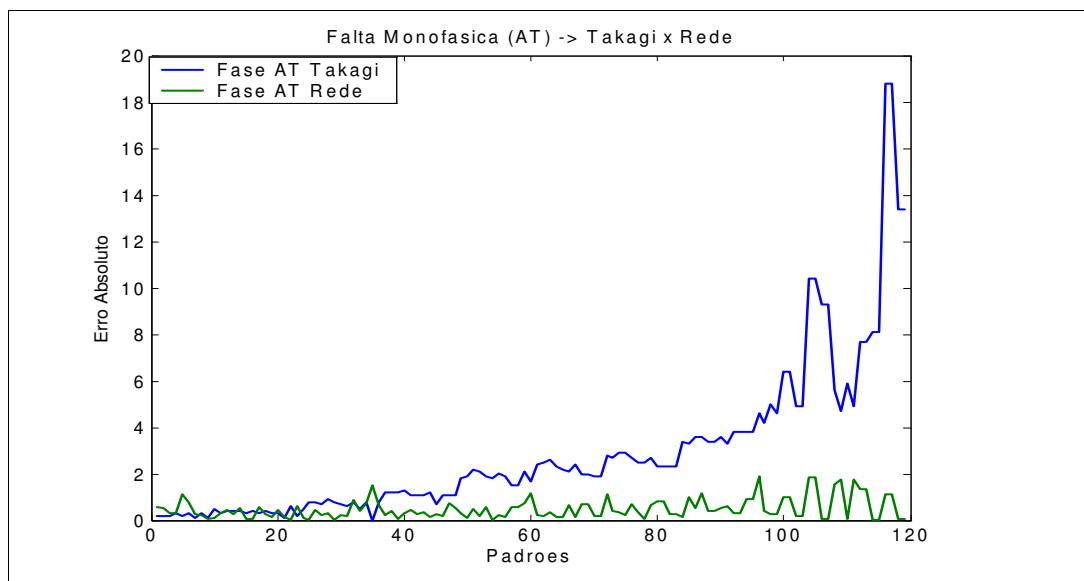


Gráfico 51 - Erro Absoluto Localização RNA x Takagi (Monofásica)

Comparando os erros RMSE e MAPE nos resultados obtidos pela RNA para faltas monofásicas e o algoritmo de Takagi, para as faltas simuladas na LT em pontos acima de 50% do comprimento da mesma (tomando como referência a Subestação onde são aquisitados os sinais de tensões e correntes), a RNA apresentou um ganho significativo para os casos estudados. O erro RMSE para RNA foi de 1,005 enquanto o erro RMSE obtido com o algoritmo de Takagi foi

de 7,134. O MAPE da RNA foi de 0,800 e o do Takagi foi de 6,177. No Gráfico 52 é apresentado o erros percentuais dos casos simulados para curtos-circuitos localizados acima de 50% do comprimento da LT.

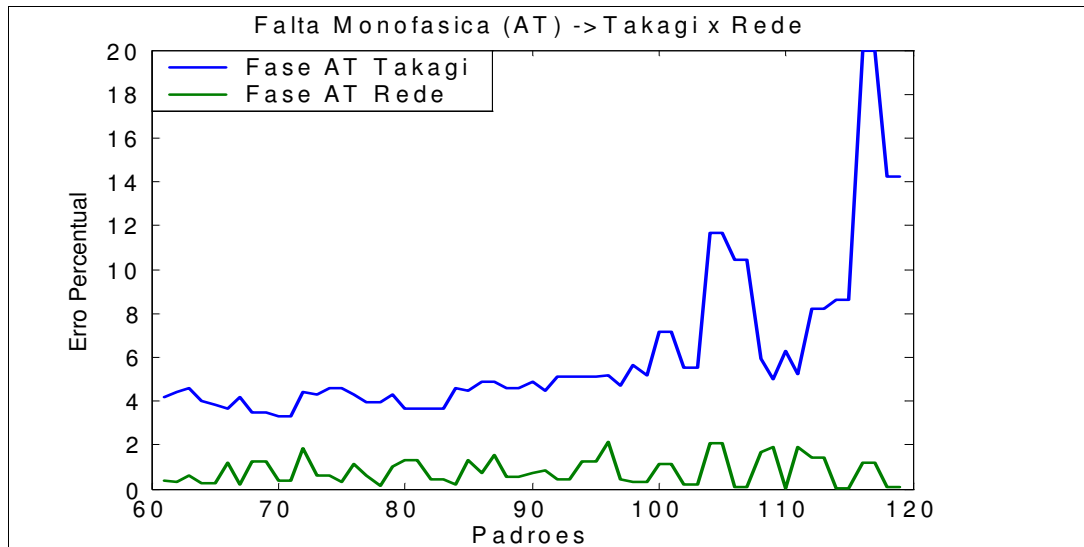


Gráfico 52 - Erro Percentual Localização RNA x Takagi (Monofásica – 50% a 100% da LT)

#### ➤ *Falta Bifásica, Falta Bifásica-Terra e Falta Trifásica*

O Gráfico 53 apresenta os erros percentuais dos resultados obtidos com o módulo de RNA e o algoritmo de Takagi para faltas bifásicas, enquanto o gráfico 54 apresenta os erros absolutos para ambos os métodos. Como no caso analisado anteriormente, o algoritmo de Takagi apresenta um melhor desempenho para faltas próximas ao terminal local. Para faltas ocorridas a partir de 50% da LT os dois métodos são praticamente equivalentes, mas com uma pequena vantagem para a RNA. Nesta faixa de comprimento da LT o erro RMSE foi de 0,7675 para a RNA e para o algoritmo de Takagi foi de 0,9668. O MAPE foi de 0,6083 para a RNA e para o algoritmo de Takagi foi de 0,8407.

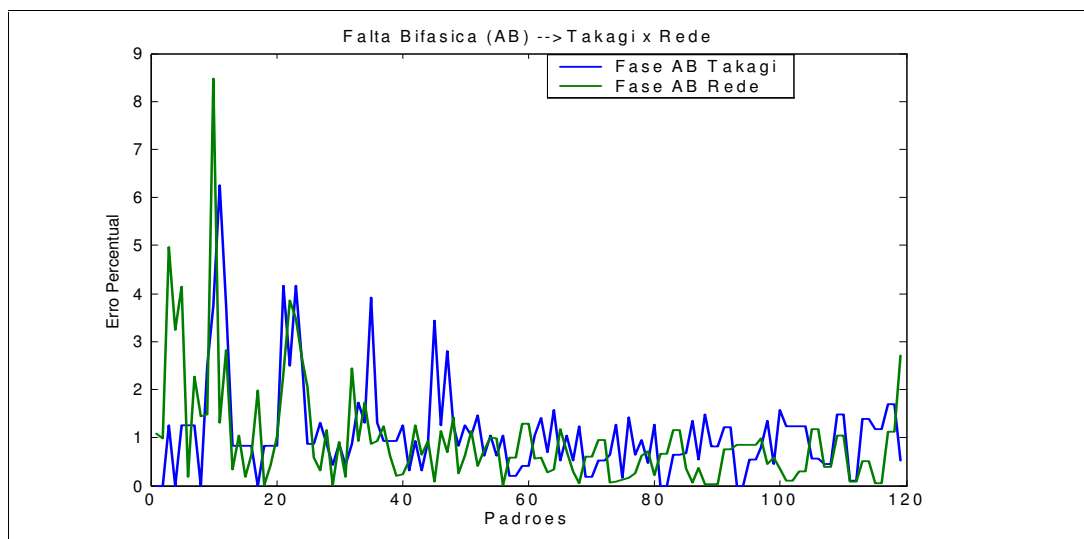


Gráfico 53 - Erro Percentual Localização RNA x Takagi (Bifásica)

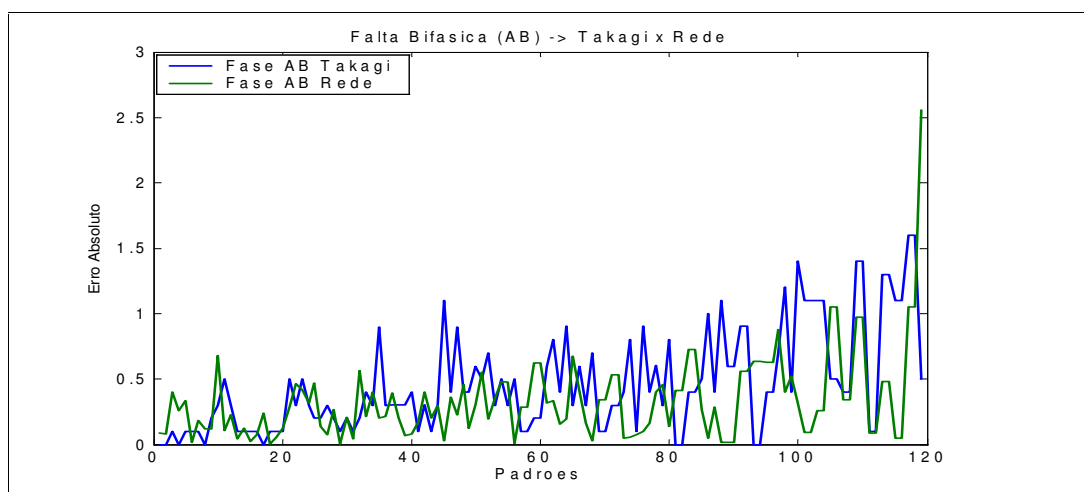


Gráfico 54 - Erro Absoluto Localização RNA x Takagi (Bifásica)

Para faltas bifásicas-terra os erros percentuais são apresentados no Gráfico 55 e os erros absolutos são apresentados no Gráfico 56. Para faltas próximas ao terminal local o algoritmo de Takagi apresenta uma pequena vantagem, com exceção a um resultado de 18% de erro percentual apresentado pela RNA, apesar do erro absoluto para RNA ser de 1,4%. Na faixa acima de 50% do comprimento da LT os resultados apresentam um desempenho equivalente, mas com vantagem para a RNA. O erro RMSE foi de 0,8398 para a RNA e 1,0210 para o algoritmo de Takagi. O MAPE foi de 0,6462 para a RNA e para o algoritmo de Takagi foi de 0,8121, resultados para uma faixa acima de 50% da LT.

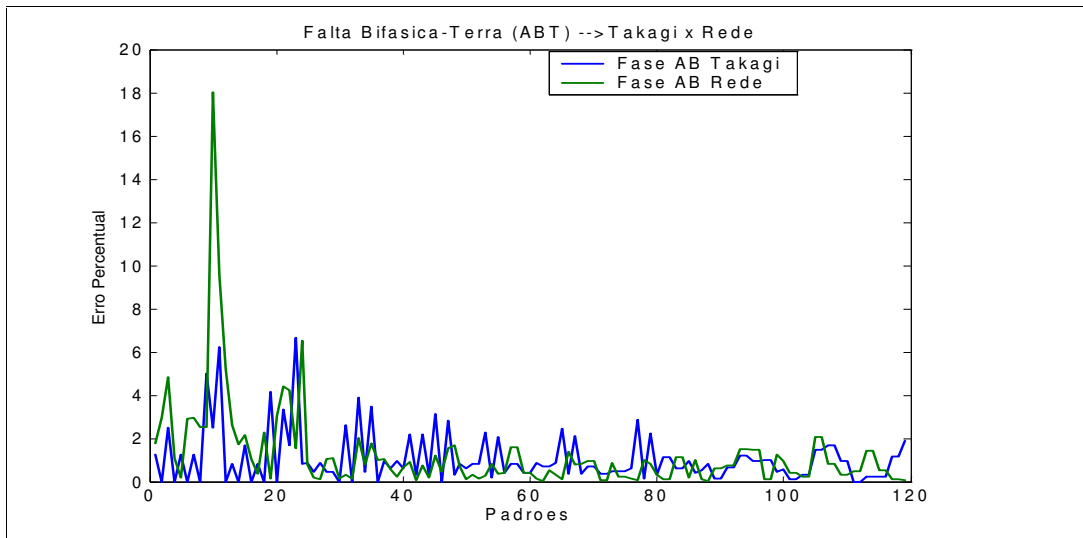


Gráfico 55 - Erro Percentual Localização RNA x Takagi (Bifásica-Terra)

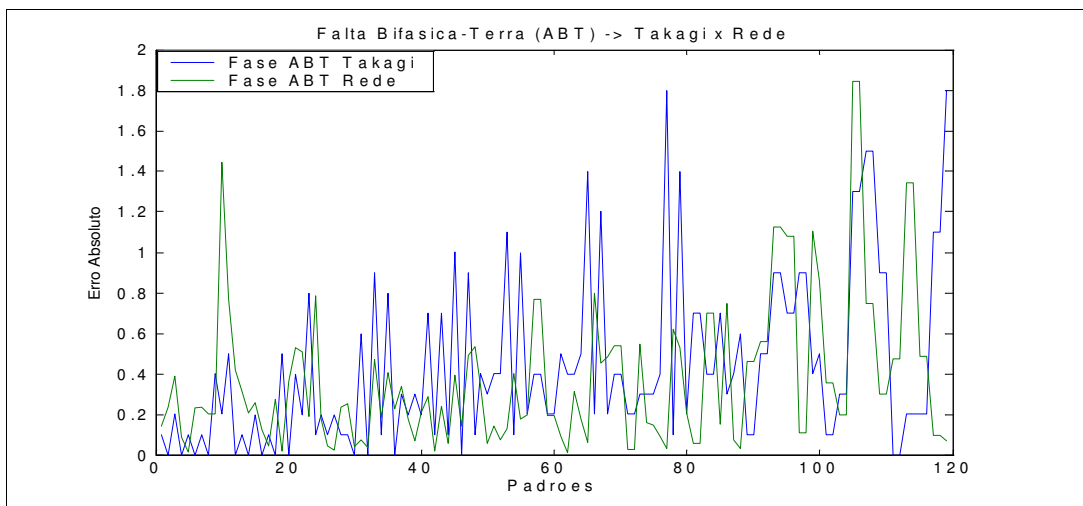


Gráfico 56 - Erro Absoluto Localização RNA x Takagi (Bifásica-Terra)

No caso do curto-circuito trifásico, pode-se ver no Gráfico 57, que apresenta os erros percentuais, como no Gráfico 58, que apresenta os erros absolutos, que ambos os métodos apresentam desempenhos equivalentes. Para faltas próximas ao terminal local os dois métodos apresentam alguns erros percentuais superiores a 10%, mas os erros absolutos são inferiores a 2% para a RNA e a 3% para o algoritmo de Takagi. Para faltas acima de 50% do comprimento da LT os resultados da RNA apresentam vantagem sobre o algoritmo de Takagi. O erro RMSE foi de 1,2822 para a RNA e igual a 1,9597 para o algoritmo de Takagi. A RNA apresentou um MAPE igual a 0,9941 e o algoritmo de Takagi apresentou um MAPE igual a 1,1986, para faltas acima de 50% da LT.

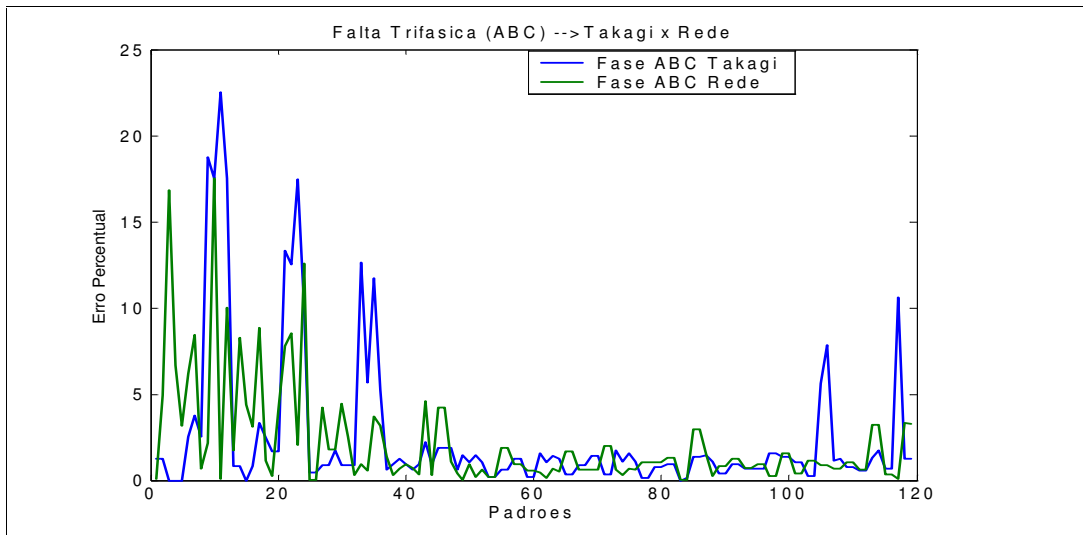


Gráfico 57 - Erro Percentual Localização RNA x Takagi (Trifásica)

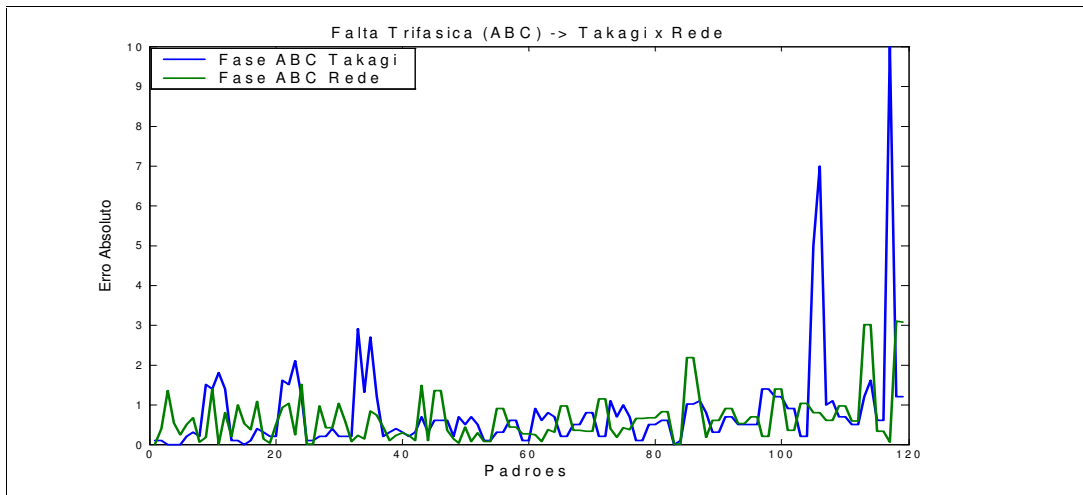


Gráfico 58 - Erro Absoluto Localização RNA x Takagi (Trifásica)

Na Tabela 16 são apresentados os erros RMSE e MAPE, obtidos sobre todo o conjunto de casos testes, com resultados da RNA e do algoritmo de Takagi. Observa-se que para falta monofásica, tanto os erros RMSE e MAPE apresentam uma diferença maior entre os dois métodos, com uma vantagem para a RNA. Para faltas trifásicas os erros RMSE e MAPE apresentaram uma pequena diferença entre os métodos, onde o uso da RNA obteve um desempenho melhor. Para faltas bifásicas e bifásicas-terra os erros obtidos foram os menores quando comparados com as faltas monofásicas e trifásicas, com desempenho ligeiramente melhor para o algoritmo de Takagi.

No caso particular de faltas monofásicas (AT), o uso da RNA se mostrou vantajoso para faltas mais próxima da barra remota, fato este já conhecido e apresentado na literatura, uma deficiência do algoritmo de Takagi para localização de falta utilizando dados de um terminal [27].

Falta	Erro RMSE RNA	MAPE RNA	Erro RMSE Takagi	MAPE Takagi
Monofásica	2,546	1,565	5,607	4,726
Bifásica	1,476	0,956	1,461	1,091
Bifásica-Terra	2,414	1,246	1,597	1,059
Trifásica	3,703	2,128	4,959	2,475

Tabela 16 – Erros RMSE e MAPE da RNA e do algoritmo de Takagi

### 5.3.2. Casos Reais

Em relação aos dados reais apresentados, um fato relevante foi o caso onde a RNA apresentou um erro percentual de 26,01% e o algoritmo de Takagi um erro percentual de 25,39% (Tabela 17). Esse erro para RNA, como dito anteriormente, não foi por estar na faixa de comprimento de até 20 % da LT, pois o algoritmo de Takagi obteve um erro próximo. Como ambos os métodos calcularam a distância da falta praticamente no mesmo ponto, o erro deve estar então associado aos dados apresentados, pois utilizamos fasores de 60 Hz para os dois métodos. Como o cálculo da TDF apresenta erro influenciado por sinais de baixa frequência, e dependendo do ângulo de falta e do tempo de abertura do disjuntor estes sinais podem apresentar valores altos, que influenciam bastante no cálculo dos fasores de 60 Hz. Outros fatores relevantes são os próprios erros dos transdutores, transformadores de tensão (TP) e transformadores de corrente (TC).

Apesar de percentualmente os erros serem considerados altos, os erros absolutos foram inferiores a 2%, para ambos os casos.

LT	Falta	Fases Envolvidas	Localização Real (%)	Localização RNA (%)	Erro Percentual RNA	Localização Takagi (%)	Erro Percentual Takagi
LT 500 kV	Monofásica	BT	50,30	48,11	4,35%	52,20	3,78%
LT 500kV	Monofásica	AT	6,42	4,75	26,01%	4,79	25,39%
LT 345 kV	Monofásica	AT	90,02	91,76	1,93%	93,20	3,53%
LT 345 kV	Monofásica	CT	93,61	94,71	1,18%	92,80	0,87%
LT 345 kV	Monofásica	CT	30,3	31,87	5,18%	30,60	0,99%

Tabela 17 - Resultados da RNA e Takagi com dados reais