

Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Reconhecimento de Padrões

David Calhau Jorge¹, Denis Vinicius Coury², André C.P.L.F. de Carvalho³

¹Universidade de Uberaba-Av. Nenê Sabino, 1801-38055-500 Uberaba-M.G. Brasil

²EESC-SEL - Universidade de São Paulo-Caixa Postal 395-13560-250 São Carlos-S.P. Brasil

³SCE – ICMSC Universidade de São Paulo-Caixa Postal 668-13560-970 São Carlos-S.P. Brasil

E-mails: dcj@uniube.br, coury@monalisa.sel.eesc.sc.usp.br, andre@icmc.sc.usp.br

Abstract

When any kind of fault occurs in a Transmission Line it's very important to find the exact localization of the problem, for a fast power restoration. Most of the methods used nowadays work with "off-line" data, and need information from both sides of the faulted Transmission Line. This paper use the pattern recognition of Artificial Neural Networks to locate the fault point in a Transmission Line, using the "off-line" current and voltage data from one side of the faulted Transmission Line.

1. Introdução

A ocorrência de uma situação inesperada em um sistema de transmissão de energia elétrica pode causar a interrupção no fornecimento de energia. Esta ocorrência aleatória e imprevisível, na maioria das vezes, é conhecida como falta. A interrupção do fornecimento é realizada por equipamentos de proteção, visando resguardar a estabilidade do sistema e os equipamentos envolvidos na transmissão da energia. O rápido restabelecimento do fornecimento de energia depende da localização do ponto onde ocorreu a falta no sistema e a realização dos reparos necessários [1].

As linhas de transmissão de energia elétrica compõem a maior parte, em extensão, do sistema de transmissão de energia. Devido a este fato a maioria das faltas que ocorrem no sistema elétrico de potência envolvem as linhas de transmissão. As faltas em linhas de transmissão podem ocorrer devido a diversos fatores, tais como: problemas na isolação, "queimadas" próximas a linha de transmissão, contatos entre os cabos da linha de transmissão (devido ao envolvimento de agentes externos), entre outros. As linhas de transmissão trifásicas compõem a maior parte do sistema de transmissão de energia no Brasil e a maioria das faltas que ocorrem nestas linhas de transmissão são as que envolvem o contato de uma das fases com a terra (fase-terra) [1].

Para uma localização aproximada do ponto de ocorrência de uma falta é necessário que os parâmetros característicos da linha de transmissão, os valores de tensão e corrente anteriores a falta (pré-falta) e posteriores a falta (pós-falta) e o tipo de falta e seus parâmetros sejam conhecidos. A disponibilidade de todos estes dados não ocorre na maioria dos casos, sendo necessário uma estimativa de seus valores[2].

Este trabalho mostra que o uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs) pode ser uma alternativa para atuar como um "localizador de faltas" em uma linha de transmissão. Entre as diversas propriedades das RNAs, aquelas referentes ao reconhecimento de padrões têm sido um dos grandes atrativos para sua utilização na engenharia elétrica. As RNAs estão presentes em diversas aplicações na engenharia elétrica na atualidade, sendo sua utilização em pesquisas envolvendo sistemas elétricos de potência cada vez mais presente em diversos problemas tais como: determinação do fluxo de carga, determinação da estabilidade, programa de geração de energia elétrica, etc. [3][4]. Sua utilização em problemas envolvendo a proteção de sistemas elétricos de potência também tem avançado rapidamente [5][6][7][8][9]. Os excelentes resultados obtidos em diversos trabalhos que envolvem RNAs e engenharia elétrica estão causando o aumento dos estudos nesta área. Os resultados obtidos neste trabalho também encorajam maiores estudos referentes a utilização de RNAs na localização de faltas em linhas de transmissão.

Este trabalho apresenta a utilização de RNAs MLP treinadas com backpropagation, na determinação do ponto de ocorrência da falta em uma linha de transmissão. A utilização do algoritmo backpropagation tem sido comum em alguns trabalhos envolvendo RNAs e engenharia elétrica [5][7]. A utilização de RNAs visa possibilitar a localização da ocorrência de uma falta empregando apenas os dados de corrente e tensão de um dos extremos da linha de transmissão, após a ocorrência da falta. Isto seria uma grande vantagem com relação aos métodos convencionais utilizados, devido a simplicidade na obtenção dos dados necessários para a solução deste problema.

2. Localização de faltas em linhas de transmissão

Suponha o modelo simplificado de uma linha de transmissão trifásica como a indicada na Fig. 01 onde ocorra uma falta no ponto K [10].

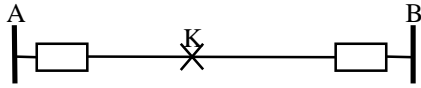


Figura 01 : Linha de transmissão com uma falha em K.

Suponha que as fases da linha de transmissão sejam $x, y = a, b, c$ e $x \neq y$ e que ocorra uma falta fase-fase a uma distância K do barramento A. É possível determinar a distância K que ocorreu a falta através de (1), onde: E_j indica a tensão no barramento j e I_j indica a corrente no barramento j e Z_1 é a impedância de seqüência positiva de toda a linha de transmissão.

$$\frac{E_x - E_y}{I_x - I_y} = k \cdot Z_1 \quad (1)$$

Similarmente para uma falta fase-terra na fase x a distância de falta poderia ser obtida por (2), sendo $m = (Z_0 - Z_1) / Z_1$ onde Z_0 é a impedância de seqüência zero da linha de transmissão.

$$\frac{E_x}{I_x - m \cdot I_0} = k \cdot Z_1 \quad (2)$$

A razão das tensões e correntes representa a fração da impedância de linha (seqüência positiva) na qual a falta ocorre. A razão obtida pode ser comparada com a impedância total de seqüência positiva da linha de transmissão, possibilitando a localização da falta.

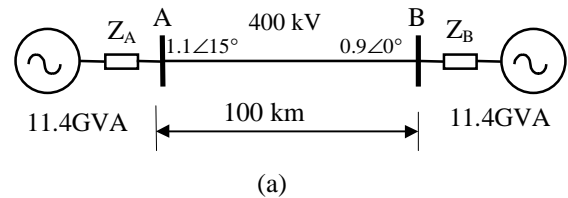
Entretanto em um modelo de linha de transmissão mais próximo do real, diversos parâmetros irão implicar no comportamento da linha de transmissão durante a ocorrência de uma falta, tais como: distribuição dos condutores, resistência de falta, ângulo de incidência da falta, presença de harmônicos e componentes DC nos sinais de corrente e tensão, etc. . Torna-se necessário, para estes estudos, a utilização de simuladores computacionais visando obter o comportamento dos sinais de tensão e corrente após a ocorrência da falta na linha de transmissão de forma mais precisa. Assim a determinação do local de ocorrência da falta na linha de transmissão passa a ser mais complexo, havendo a necessidade do conhecimento de diversos parâmetros para possibilitar um resultado mais acurado.

Existem diversos métodos que utilizam dados de apenas um dos terminais da linha de transmissão [11]. Alguns destes métodos são empregados em aparelhos destinados a localização de falta. Estes métodos possuem muitas limitações, devido as diversas

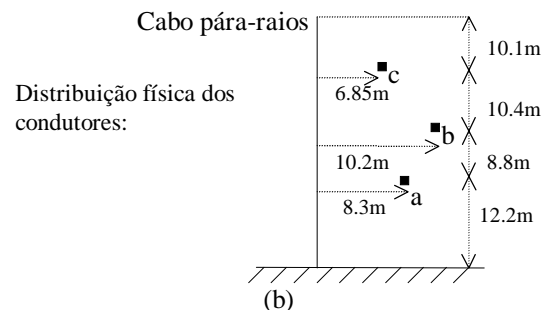
considerações aplicadas aos parâmetros das linhas, necessárias a sua implementação.

3. Linha de transmissão utilizada nos estudos

Para o desenvolvimento deste trabalho foi considerada uma linha de transmissão com um fluxo de potência entre seus terminais e características mais próxima a um modelo real, como indicado na Fig. 02.



(a)



(b)

Figura 02 : Linha de transmissão utilizada nos estudos

Devido a complexidade na realização de simulações envolvendo a linha de transmissão utilizada para os estudos, foi usado um programa computacional desenvolvido por Johns e Aggarwal [12]. Este programa possui considerações relacionadas aos diversos problemas que ocorrem, na realidade, com uma linha de transmissão em uma situação de falta tais como: o efeito de transdutores, distribuição física dos condutores, os efeitos da presença da terra, a presença de filtros analógicos, etc. . Diante destas considerações os resultados fornecidos por este programa podem ser considerados próximos aos valores obtidos na prática para a linha especificada. Uma linha de transmissão de 100km, 400kV e 60Hz, conforme mostrada na Fig. 02.a, foi utilizada para a realização do treinamento e teste das diferentes arquiteturas de RNAs adotadas durante os experimentos. A distribuição dos condutores da linha de transmissão se encontra na Fig. 02.b.

O programa computacional de simulação utilizado fornece os valores de tensão e corrente de todas as fases em um período anterior e posterior a falta, a uma determinada taxa amostral, sendo que todos estes valores podem ser determinados pelo usuário. Um exemplo dos resultados da tensão na fase faltosa fornecidos pelo programa é apresentado na Fig. 03, esta figura foi criada a partir de um programa que gera gráficos científicos (Microcal Origin®).

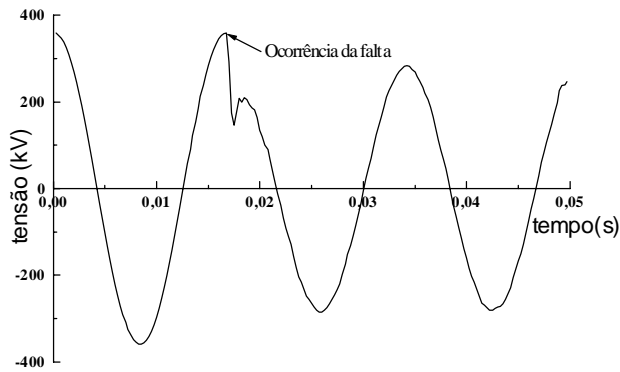


Figura 03 : Tensão da fase faltosa.

Para este trabalho, foi adotado uma taxa amostral de 4kHz e apenas consideradas as faltas fase-terra, devido a sua maior incidência nos problemas envolvendo linhas de transmissão, e fase-fase para atestar a eficiência do método em outros tipos de falta.

A localização da falta ocorre, na maioria das vezes, posteriormente a determinação de sua ocorrência e conseqüente atuação da proteção, isolando a linha de transmissão faltosa do restante do sistema elétrico. No caso da ocorrência de uma falta em uma linha operando a 60Hz, a proteção deverá atuar em um tempo menor que 12ms, visando proteger os equipamentos presentes no sistema de transmissão. Após a ocorrência da falta, a utilização de diversas técnicas e equipamentos possibilita a estimação do local onde ocorreu o problema.

4. Dados da linha de transmissão utilizados para a localização da falta

Para o trabalho proposto, os valores de tensão e corrente, antes e após a falta, de um dos barramentos da linha de transmissão deverão ser conhecidos. A utilização de apenas uma RNA, em cada tipo de falta, para a solução do problema visa simplificar os cálculos computacionais e a representação do problema, evitando a necessidade de uma elevada quantidade de RNAs [6]. A RNA a ser utilizada será definida após a determinação do tipo de falta ocorrido, o qual é realizado a parte através de métodos simples e precisos[2].

Para a realização deste trabalho, os sinais de tensão e corrente serão filtrados, utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) de 1/2 ciclo dada em (3), onde $z=0.507$, k é o número total de amostras e $\omega=2\pi f$, sendo f o valor da frequência [13]. Apenas os valores da primeira harmônica das tensões e correntes das fases serão utilizados.

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^k x_n \cdot e^{-j \cdot z \cdot \omega \cdot k \cdot n} \quad (3)$$

A utilização dos valores de tensão e corrente filtrados proporciona uma redução do número de entradas para as RNAs, diminuindo de forma considerável o “esforço” computacional para sua resolução. O desempenho das RNAs com estas considerações pode ser considerado satisfatório.

Para a taxa amostral utilizada pelo simulador, um total de 32 amostras, de cada sinal, serão submetidas a TDF. A proteção deverá atuar no mínimo após 8ms da ocorrência da falta, para possibilitar a utilização da TDF. Cabe salientar porém que em futuros estudos a utilização da TDF de 1/4 de ciclo poderá ser realizada, tornando possível a determinação do local de ocorrência da falta mesmo que a linha de transmissão tenha sido isolada em um tempo menor que 5ms.

5. Redes Neurais Artificiais utilizadas para localização de faltas

Nos experimentos realizados as RNAs foram treinadas de forma supervisionada, e utilizaram o algoritmo backpropagation [14][15]. O programa computacional Matlab® com o Toolbox Neural Network [16] foi utilizado para as simulações das RNAs. Para os treinamentos e testes das RNAs foram realizadas 279 simulações no programa simulador de faltas em linhas de transmissão. O treinamento é encerrado quando o erro médio quadrático (SSE) atingir um valor inferior a 1.10^{-3} ou quando forem realizados 5000 ciclos. Diferentes valores de distância do ponto de ocorrência da falta (d) foram utilizados para o treinamento das RNAs.

Após o teste de inúmeras variações no valor da razão dada em (4) e a utilização de diversas combinações com variações aleatórias das distâncias, os valores das distâncias utilizadas para o treinamento das RNAs foram determinados para uma razão constante $q=5$.

$$d = q \cdot i \text{ onde } i \in Z \text{ e } 0 < d < 100 \quad (4)$$

A formação de um número coerente de distâncias da ocorrência das faltas a serem utilizadas para o treinamento das RNAs é imprescindível, uma vez que a presença de informação excessiva torna desnecessária a utilização das RNAs. O fornecimento dos valores dentro do intervalo proposto em (4) abrange toda a extensão da linha de transmissão utilizada para os estudos. Um total de 19 valores diferentes de distâncias foram fornecidos para os treinamentos de cada RNA. Os valores de distância fornecidos para as RNAs foram normalizados, mantendo-se no intervalo]0,1[. Os pontos extremos da linha de transmissão foram excluídos devido a imprecisão na determinação de seus parâmetros.

Um total de mais de 40 diferentes arquiteturas de RNAs foram utilizadas até a obtenção de resultados satisfatórios, detectados mediante o treinamento seguido dos testes, com os valores obtidos de cada RNA. As

diferentes arquiteturas utilizaram um formato fundamental de RNA, apresentado na Fig. 04.

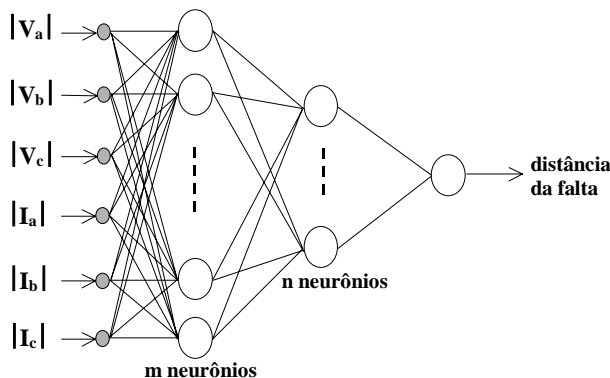


Figura 04 : Arquitetura fundamental da RNA

Para o treinamento das RNAs, após a variação de diversos parâmetros das RNAs e vários testes, o melhor desempenho encontrado, dentre as situações analisadas, utiliza a seqüência de condições abaixo assinaladas:

Utilização de 20 neurônios na primeira camada intermediária e 20 neurônios na segunda camada intermediária na falta fase-terra e 28 neurônios na primeira camada intermediária e 25 neurônios na segunda camada intermediária na falta fase-fase.

Os demais valores utilizados para os dois tipos de falta são:

- Taxa de aprendizagem variável com um incremento de 1,05 e um decremento de 0,7. (Fig. 05)
- Utilização de momentum com valor fixo de 0,95.
- Função de ativação log-sigmoide para todos os neurônios.

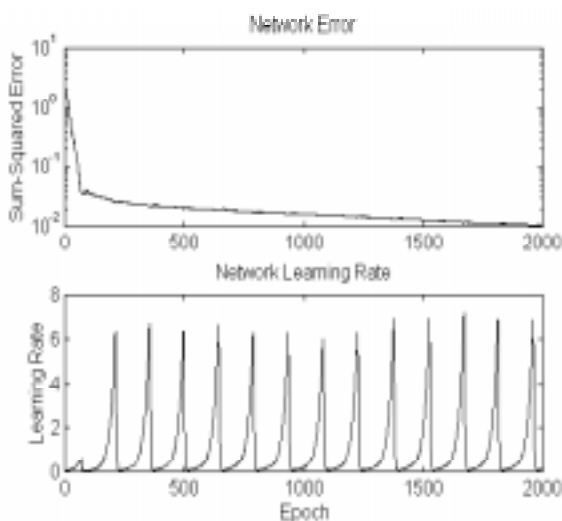


Figura 05 : Taxa de aprendizagem e SSE para m=n=20 para as primeiras 2000 iterações, falta fase-terra.

A variação do número de neurônios m e n das camadas internas da RNA apresentaram diferentes desempenhos no comportamento da RNA, na Tabela 1 são apresentados alguns resultados dos treinamentos de RNAs com variações nos valores de m e n, para a falta tipo fase-terra.

Tabela 1-Resultados de diferentes arquiteturas de RNAs

<i>m</i>	<i>N</i>	<i>Ciclos</i>	<i>Convergência</i>	<i>Momentum</i>
15	15	-	Não	0
15	20	-	Não	0
15	20	4093	Sim	0,95
20	20	3548	Sim	0,95
25	20	3892	Sim	0,95

Como citado anteriormente, durante a ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão há variação de diversos parâmetros. Em uma falta fase-terra o valor da resistência de falta (R_f) entre a fase faltosa e a terra é um dos parâmetros mais relevantes. Para atestar a qualidade da arquitetura da RNA, ela foi treinada para 3 diferentes valores de resistência de falta em faltas do tipo fase-terra: 30Ω , 50Ω e 70Ω . Para as faltas tipo fase-fase foram considerados os valores de resistência de falta entre as fases de: 5Ω , 10Ω e 30Ω . Após o treinamento da RNA, com a arquitetura e os parâmetros mais adequados citados anteriormente, foram testados 74 valores (não utilizados durante o treinamento) em cada tipo de falta para cada valor de R_f , resultando em um total de 444 testes. Os valores utilizados para testes também foram empregados na validação da convergência da RNA utilizada. As Tabelas 2 e 3 apresentam a comparação entre alguns destes valores e o valor real utilizado para se obter os dados.

Tabela 2-Resultados dos testes das RNAs para falta do tipo fase-terra.

<i>Distância Real (km)</i>	<i>Resposta da RNA treinada Para diferentes valores de R_f (km)</i>		
	$R_f=30\Omega$	$R_f=50\Omega$	$R_f=70\Omega$
7	7,04	7,18	7,46
17	16,46	16,43	16,22
21	20,97	20,87	20,49
27	27,53	27,32	26,94
32	32,66	32,44	32,20
38	38,42	38,28	38,24
42	42,04	41,97	42,06
52	51,24	51,34	51,54
61	60,35	60,54	60,62
68	68,00	68,18	68,14
71	71,41	71,54	71,45
78	79,02	79,11	79,05
82	83,28	83,22	83,14
87	87,61	87,63	87,64
93	92,22	92,02	91,95

Tabela 3-Resultados dos testes das RNAs para falta do tipo fase-fase.

Distância Real (km)	Resposta da RNA treinada Para diferentes valores de Rf (km)		
	Rf=5Ω	Rf=10Ω	Rf=30Ω
7	7,41	6,80	8,46
17	16,53	15,68	17,34
21	20,78	19,91	21,23
27	27,71	26,76	27,31
32	32,98	31,92	32,07
38	38,92	37,67	37,57
42	42,87	41,48	41,40
52	52,59	50,69	51,26
61	62,20	59,79	61,30
68	69,84	67,14	69,42
71	72,44	69,80	72,64
78	79,52	76,90	80,08
82	83,99	81,47	84,19
87	87,20	84,95	87,82
93	91,21	89,39	91,70

Os valores testados, após o treinamento, apresentaram um erro médio inferior a 9%, para todos os valores de Rf, conforme observado na Tabela 4, sendo o erro relativo a distância real e a obtida na RNA.

Tabela 4-Erros dos resultados obtidos na RNAs.

Rf	Erro Mínimo	Erro máximo	Erro Médio	Desvio Padrão
Falta fase-terra				
30Ω	0,01%	12,67%	1,75%	1,92%
50Ω	0,01%	14,79%	1,62%	2,03%
70Ω	0,02%	19,29%	1,69%	2,62%
Falta fase-fase				
5Ω	0,23%	17,57%	2,37%	2,10%
10Ω	0,08%	11,56%	3,11%	2,97%
30Ω	0,08%	29,17%	2,62%	4,23%

Para a determinação do ponto de ocorrência da falta em uma linha de transmissão o estudo realizado apresenta ótimas propriedades. O método apresentado utiliza uma quantidade de dados, para a operação, menor que a necessária na maioria dos equipamentos empregados na prática e apresentou, para os valores testados, um erro menor que o obtido com os modernos equipamentos desenvolvidos para tal operação [17].

6. Conclusão

Os resultados obtidos com a localização de faltas em uma linha de transmissão utilizando RNAs estimulam o prosseguimento dos estudos envolvendo RNAs e esta aplicação. A utilização de informação de apenas um dos extremos envolvidos na ocorrência da falta e o reduzido

número de entradas da RNA, mantendo ainda uma precisão satisfatória nos resultados, reduziriam o tempo de processamento e os custos envolvidos na localização. A precisão obtida, com um erro médio menor que 9% em todos os casos, ratifica a eficiência do método. Há uma grande possibilidade de utilizar a RNA para outras extensões, com a mesma distribuição de condutores, uma vez que todos os valores de distância utilizados foram normalizados, porém esta afirmação necessita de maiores estudos.

Cabe salientar que a utilização de RNAs para auxiliar a localização de faltas, através do reconhecimento de padrões, mostrou-se eficiente diante das variações dos valores da resistência de falta, apontando uma excelente flexibilidade da arquitetura adotada. A variação de outros parâmetros da linha de transmissão e características da falta, tais como: fluxo de carga, outros tipos de falta, ângulo de incidência da falta, entre outros; estão sendo considerados no prosseguimento dos estudos.

Referências

- [1] A.C. Caminha, *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos*, Edgard Blücher, 1977.
- [2] P.M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, IEEE Press, 1973.
- [3] C.N. Lu, H.T. Wu e S. Vermuri “Neural Network Based Short Term Load Forecasting”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, n° 1, Fevereiro/1993, pp. 336- 342.
- [4] M.A. El-Sharkawi, R.J. Marks, e S. Weerasooriya, “Neural Networks and Their Application to Power Engineering”, *Control and Dynamics Systems*, Vol. 41, 1991, pp.359-401.
- [5] D.C. Jorge e D.V. Coury “Artificial Neural Network Approach to Distance Protection of Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.13,n°1, Janeiro/1998, pp.102-108.
- [6] H. Kanoh, M. Kaneta e K. Kanemaru, “Fault Location for Transmission Lines Using Inference Model Neural Network” *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 111, n°7, 1991, pp.84-92.
- [7] S.A. Khaparde, P.B. Kale, e S.H. Agarwal, “Application of Artificial Neural Network in Protective Relaying of Transmission Lines”, *First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*, Seattle, WA, Julho/1991, pp. 139-143.
- [8] T.S.Sidhu, H. Singh, e M.S. Sachdev, “Design, Implementation and Testing of An Artificial Neural Network Based Fault Direction Discriminator for Protecting Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, n°. 2, Abril/1995, pp. 647-706.

- [9] T. Dalstein, B. Kulicke "Neural Network Approach to Fault Classification for High Speed Protective Relaying", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, n° 2 , Abril/1995, pp.1002-1011.
- [10] A.G. Phadke and J.S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems* John Wiley and Sons, 1988.
- [11] E. T. Domingues, "Localizador Digital de Falhas para Linhas de Transmissão de Múltiplos Terminais", Dissertação de Mestrado EESC-USP, São Carlos, 1998.
- [12] A.T. Johns e R.K. Aggarwal, " Simulation of Faulted EHV Transmission Lines with Particular Reference to Very High Speed Protection" , *IEE Proceeding*, Vol. 123, Abril/1976, pp. 353-359.
- [13] H.J. Altuve, I. Diaz, E. Vasquez "Fourier and Walsh Digital Filtering Algorithms for Distance Protection", *IEEE Trans.on Power Systems*, Vol. 11, n° 1, Fevereiro 1996 pp.457-462.
- [14] P.D.Wasserman, *Neural Computing : Theory and Practice*, Van Nostrand Reinhold, New York,1989.
- [15] J. Hertz, A. Krogh, e R.G. Palmer, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Adison-Wesley Pub. Co,1991.
- [16] H. Demuth e M. Beale, *Neural Network - Toolbox - For Use with Matlab™*, 1992.
- [17] Hewlett Packard, *Accurate Transmission Line Fault Location Using Synchronized Sampling*, Application Note 1276-1, Junho/1996.