

LOCALIZAÇÃO DE FALHAS PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Paula Renatha N. da Silva, Martin Max L. C.Negrão, Petrônio Vieira Jr., Walter Barra Jr. e Miguel S. Bobi*

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Faculdade de Engenharia Elétrica

*Universidad Pontificia Comillas
Escuela Técnica Superior de Ingeniería - ICAI

paularenatha@hotmail.com, max@ufpa.br, petrônio@ufpa.br, walbarra@ufpa.br, masanz@dsi.ica.upcomillas.es

Abstract – This paper presents a new methodology to improve efficiency in power transmission from the monitoring of leakage current using the Fault Detection Isolation (FDI) method. To apply the method was necessary to monitor environment conditions and parameters of the power line. From these data was designed a mathematical model using the harmonic decomposition of the leakage current, allows the detection and diagnosis of incipient faults through neural networks, making it more efficient power energy delivery..

Keywords – Neural Networks, Fault Location, Power Delivery Energy, Leakage Current, Fault Detection Isolation (FDI).

1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão (LTs) são constituídas por condutores elétricos suportados em estruturas (torres) através de isoladores, que percorrem longas distâncias até o ponto consumidor. Em alguns casos as LTs possuem trechos que podem estar sujeitos à poluição, vandalismo, queimadas e a invasão urbana, devido a construção predial desordenada na faixa de servidão da linha. Estes eventos reduzem o nível de isolamento da linha, isto é, o valor da capacitância e conseqüente aumentam a corrente de fuga, e que podem causar falhas e, em casos extremos, faltas. Como a evolução destes eventos é gradativa supõe-se que é possível observar também a evolução da falha até a ocorrência da falta. A observação da evolução da falha permite a manutenção preditiva, isto é a manutenção corrigindo a falha a partir da medição em contínuo. Para tanto, se devem utilizar sistemas de diagnóstico de falhas, a partir da monitoração, sendo que para efetividade deste sistema de diagnóstico, é necessário que a monitoração seja realizada em tempo real. Um sistema de monitoração para diagnóstico deve detectar, diagnosticar, isolar (Fault Detection Isolation – FDI) e corrigir a falha, como sugere a Figura 1. De acordo com esta depois da aquisição de dados é feita a detecção da falha, isto é a determinação da presença de anomalias e, em seguida, são identificados os modos de falha, ou seja, a maneira como o mau funcionamento ocorre. Por fim é necessário localizar a falha, com o objetivo de determinar qual componente foi atingido por esta, ou seja, isolar a falha [1].

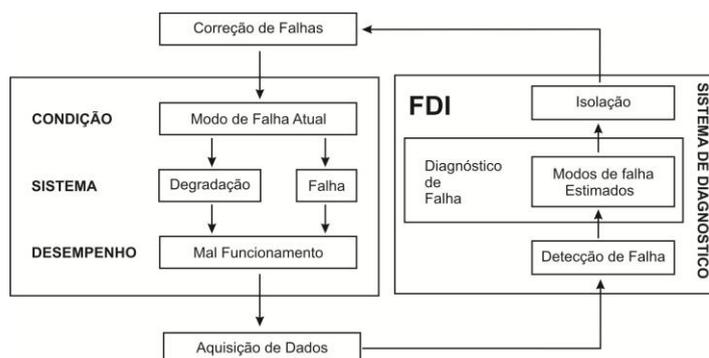


Figura 1 - Sistema de diagnóstico na monitoração do funcionamento de processos [2].

Um mau funcionamento é caracterizado pelo modo de falha, isto é, pela maneira particular na qual um evento esperado (ou desempenho de uma tarefa) não acontece. É dito incipiente quando a não ocorrência do evento esperado não provoca por si só, ou em curto prazo, um colapso no sistema [3]. O modo de falha é uma propriedade inerente a cada item, visto que cada item tem suas características particulares como função, ambiente de trabalho, materiais, fabricação e qualidade. Quando a evolução destes eventos é gradativa supõe-se que é possível observar também a evolução da falha até a ocorrência da falta. Entretanto, a verificação das condições de funcionamento da LT através da verificação da corrente de fuga não é facilmente obtida. Isto porque, para detecção de anomalias é necessária uma comparação com um modelo de funcionamento normal cuja parametrização depende das condições ambientais que por sua vez são descritas por modelos não lineares.

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para localização de falhas incipientes no sistema de transmissão de energia elétrica, a partir da monitoração da corrente de fuga utilizando o método FDI.

3 OBTENÇÃO EXPERIMENTAL DA CORRENTE DE FUGA

As condições de isolamento determinam o estado da LT. Esta por sua vez, depende da resistência de isolamento e da rigidez dielétrica (capacitância) que determinam o comportamento da corrente de fuga. Portanto, a corrente de fuga pode ser utilizada como variável do modelo de comportamento normal da LT. Para comprovação experimental deste estudo foi monitorada um trecho de LT do sistema de transmissão de Tucuruí (TUC-86-300R-5) das Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE. O trecho monitorado foi entre as subestações (SE) Guamá e SE Utinga, contendo 50 torres, com distância média entre elas de 374,36 m, em um percurso total de pouco mais de 19 Km. O método teórico para determinação da corrente de fuga foi a Lei de Gauss que determina que o fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada vale $1/\epsilon_0$ vezes a soma das cargas internas à superfície [4]. Em outras palavras, a teoria das superfícies gaussianas para superfícies fechadas assegura que a soma algébrica das correntes que entram e saem de uma superfície fechada é igual a zero (ver Figura 2). Portanto a corrente de fuga do trecho de LT estudado pode ser calculada utilizando a equação (1).

$$I_{Fuga} = I_{SE\ Guamá} - I_{SE\ Utinga} \quad (1)$$

Utiliza-se a forma generalizada da Lei de Gauss devido à complexidade das estruturas, pois torna-se extremamente trabalhoso considerar os diversos nós existentes numa LT, uma vez que pode haver corrente de fuga em qualquer um destes.

Para obter experimentalmente as variáveis elétricas foram instalados dois medidores de energia Power Sentinel 1133^a, um em cada subestação, como é apresentado na Figura 3 (a) e 3(b). Os medidores são sincronizados via GPS e são capazes de fornecer dados de tensão e corrente até o 50º harmônico com precisão de 0,025%. As variáveis ambientais foram monitoradas pela instalação de estações metereológicas (EMR's), como pode ser visto na Figura 3(a) e 3(c), que fornecem registros de temperatura, direção e velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar a cada 20 minutos.

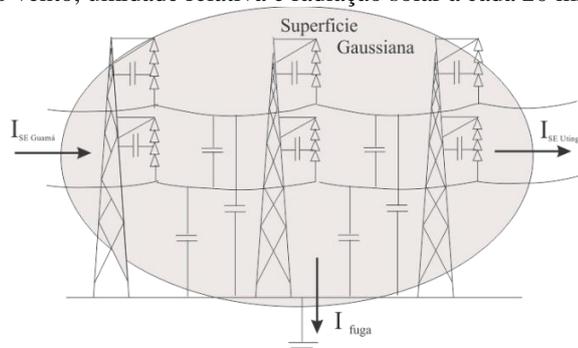
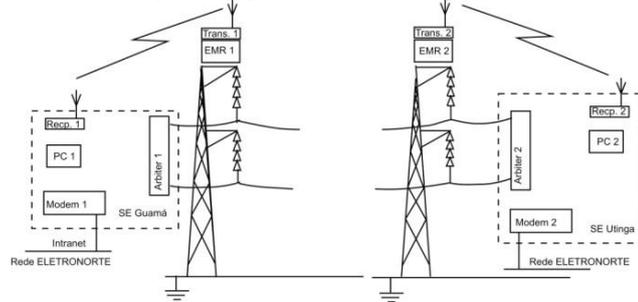


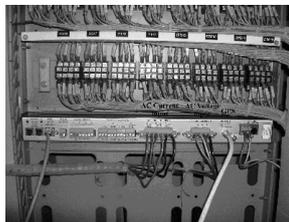
Figura 2 – Superfície gaussiana fechada para LT em estudo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – Sistema de monitoração de linhas de transmissão: (a) metodologia de monitoração, (b) medidor de energia instalado na SE Guamá, (c) medidor de energia instalado na SE Utinga e (d) estação metereológica.

4 MODELO MATEMÁTICO PARA DETECÇÃO DA CORRENTE DE FUGA

Para detectar o mau funcionamento da LT é necessário comparar, em tempo real, os valores medidos com aqueles determinados pelo modelo matemático de comportamento da LT. O resíduo encontrado desta comparação deve identificar a existência ou não de falhas incipientes. Os modelos matemáticos que representam as LTs são parametrizados através de resistência (R), indutância (L) e capacitância (C). Para detecção de falhas incipientes este modelo deve ser mais próximo da realidade que os modelos usuais. Particularmente R varia com a temperatura e C varia também com a umidade relativa do ar. O

modelo da variação da resistência com a temperatura é bem conhecida, porém o mesmo não ocorre com a caracterização da capacitância. O modelo da variação da capacitância torna-se ainda mais complexo pelo fenômeno da reflexão em relação ao aterramento da LT além da variação com as variáveis ambientais. Para verificar o fenômeno da reflexão empregou-se o Método de Elementos Finitos (FEM) e para verificação da variação com as condições experimentais foram realizadas medidas.

4.1 Capacitâncias das Cadeias de Isoladores

Com os valores das distâncias entre os condutores da LT pode-se obter os valores os valores de resistência ($R = 1,0955 \Omega$), indutância ($L = 31,88 \text{ mH}$) e capacitância ($C = 116,767 \text{ nF}$) do trecho da LT [5]. Entretanto o valor encontrado para a capacitância não é adequado pois não considera o efeito do solo, da cadeia de isoladores e da torre. Para tanto foi utilizado o FEM, cujo resultado, visto na Figura 4, é descrito em [6], onde o valor encontrado foi de $C = 1,634463 \text{ nF}$. Para validar o método foi feito um ensaio de um isolador para medição do fator de potência e a capacitância. O esquema do ensaio é apresentado na Figura 5, como é descrito por [7]. Foi empregado como amostra um isolador tipo M2H, o qual instalado para teste é mostrado na Figura 6. O valor da capacitância obtida no experimento para um isolador de vidro foi de $51,4 \text{ pF}$, com uma corrente de fuga de $182 \mu\text{A}$ e a perda de energia foi de $0,101 \text{ W}$. O erro percentual para capacitância é de $2,33\%$, comparado ao resultado obtido pelo MEF, podendo-se concluir que o resultado obtido pela simulação está de acordo com o obtido experimentalmente, o que valida o uso do FEM.

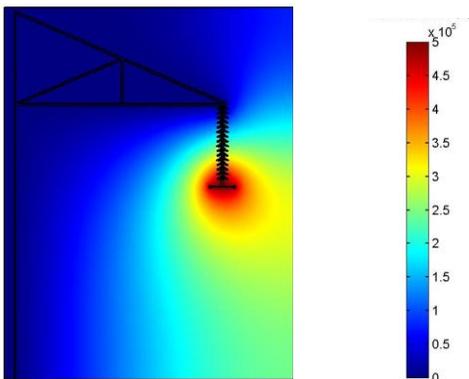


Figura 4 - Distribuição do potencial elétrico em uma torre de transmissão [6].

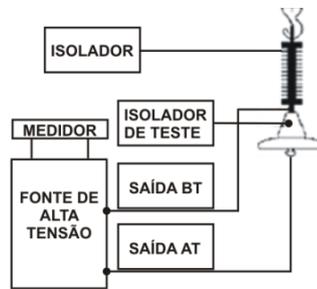


Figura 5 - Diagrama esquemático do ensaio [7].

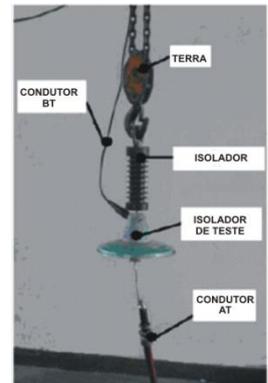


Figura 6 - Arranjo experimental.

Os resultados apresentados comprovam a eficiência do Método de Elementos Finitos para o cálculo da capacitância de uma LT, entretanto não considera, assim como o método convencional, as variáveis ambientais.

4.2 Variação da Capacitância da LT com as Variáveis Ambientais

Com o objetivo de verificar o comportamento da capacitância/permittividade em função das modificações ambientais, em [8], implementada uma bancada de ensaio constituída de uma cuba isolada através de acrílico por onde pudessem ser realizadas variações na temperatura (T), na umidade do ar (UA) e velocidade do vento (W) para diversos níveis de tensão elétrica. Nas Figuras 7(a), 7(b) e 7(c), são apresentados o comportamento das variáveis ambientais aproximada por polinômio de segunda ordem, conforme estão expressos em (2) e (3), respectivamente. Esta aproximação foi determinada a partir de uma média aritmética dos valores de permissividade e cada uma das variáveis tomadas uma a uma (temperatura, vento, umidade e tensão).

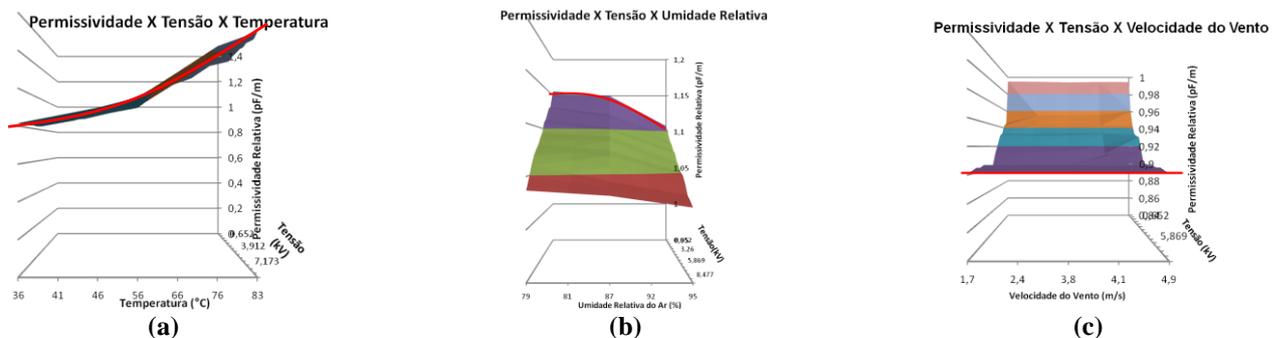


Figura 7 – Variáveis ambientais versus tensão. (a) Comportamento da permissividade com a temperatura ambiente, (b) Comportamento da permissividade com a umidade relativa e (c) Comportamento da permissividade com a velocidade do vento.

$$k_d(T_{amb}) = 5 \times 10^{-5} T_{amb}^2 + 62 \times 10^4 T_{amb} + 0,51354 \quad (2)$$

$$k_d(U_{ar}) = 5 \times 10^{-5} U_{ar}^2 + 9,5 \times 10^{-3} U_{ar} + 1,06144 \quad (3)$$

Para velocidade do vento verificou-se que esta se comporta de maneira constante e que, portanto, pouco contribui para a permissividade do meio. O comportamento da capacitância em função das variações ambientais empregada no modelo do comportamento normal da LT utiliza destes resultados obtidos na experimentação da cuba de ensaio.

4.3 Modelo Matemático para Obtenção da Corrente de Fuga

Para representar o comportamento real de uma LT foi escolhido o modelo no domínio do tempo com seção π distribuído, que para este objetivo faz-se necessário o uso de várias seções em série [9]. A simulação do modelo matemático foi feita utilizando o programa Simulink do MATLAB, com base em (4) deduzida da lei de Kirchoff e dos elementos.

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R' \Delta x i(x, t) + L' \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (4)$$

A simulação da LT é representativa, podendo ser aplicada a qualquer linha em estudo, por este motivo foi realizada com apenas 10 torres, como está ilustrado na Figura 8. Portanto, levando em conta a LT em estudo, cada torre representada no diagrama de blocos da Figura 8 corresponde fisicamente a 5 torres da linha Guamá-Utinga.

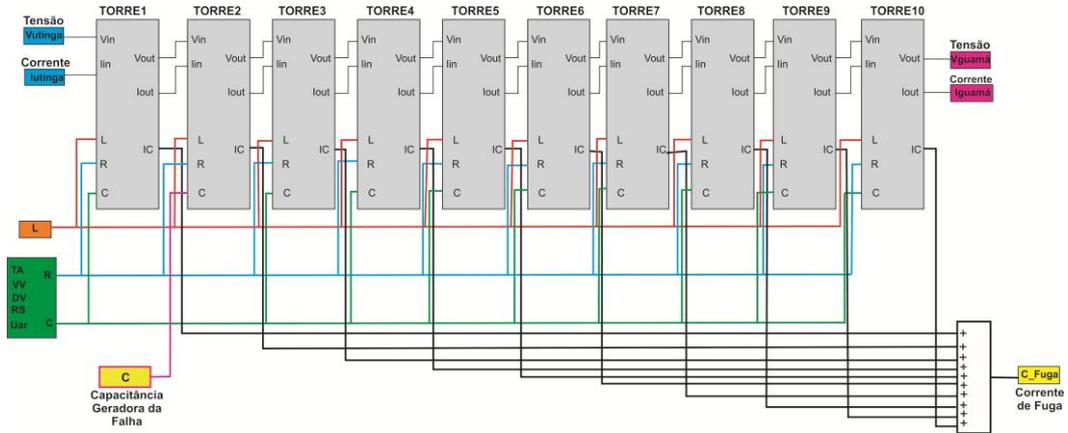


Figura 8 - Diagrama de blocos do modelo matemático.

Os parâmetros de entrada da simulação são vetores com os dados de tensão e corrente da fundamental até o 50º harmônico, variáveis ambientais como temperatura ambiente (TA), radiação solar (SR), velocidade e direção do vento (WS e WD) e umidade relativa do ar (RH). Além destes, são incluídos os valores de resistência, indutância e capacitância para uma dada condição ambiental. Como saída têm-se os vetores com os valores da corrente de fuga decomposta em até o 50º harmônico.

4.4 Validação do Modelo

O modelo foi validado comparando a corrente de fuga medida com a corrente de fuga simulada, mostradas nas Figuras 9(a) e 9(b) somente para uma fase.

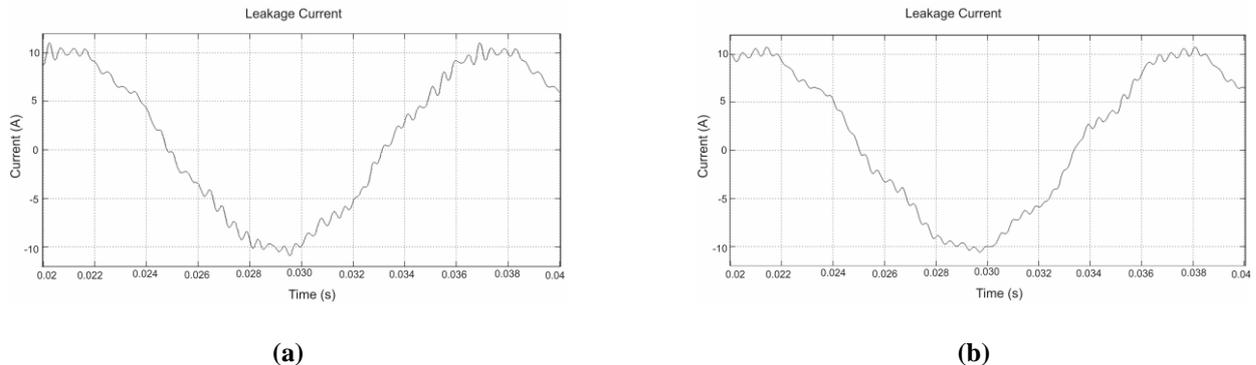


Figura 9 - Comparação entre corrente de fuga medida e simulada. (a) Corrente de fuga medida e (b) corrente de fuga calculada.

Como pode ser observado pela na Figura 11, as duas formas de onda são similares e possuindo o mesmo valor e pico e com TDH diferentes em menos de 1%. Esta comparação valida o modelo matemático.

5 ISOLAÇÃO – LOCALIZAÇÃO DA FALHA

Uma falha devido a problemas em cabos ou na isolação acarreta uma alteração no valor da capacitância [10]. Portanto, foram geradas falhas através da alteração do valor de capacitância de uma determinada torre, através do bloco denominado “capacitância geradora de falha”, as demais permaneciam inalteradas, ver Figura 10. As falhas foram simuladas em todas as torres utilizando os seguintes valores de capacitância: $C_0=1.634463 \times 10^{-9}F$ (condição normal de funcionamento); $C_1=2.7488 \times 10^{-9}F$; $C_2=4.6230 \times 10^{-9}F$; $C_3=7.7749 \times 10^{-9}F$; $C_4=13.0757 \times 10^{-9}F$. O valor da capacitância na condição normal de funcionamento C_0 é o valor de C obtido através do FEM em [6], dividido por dez, uma vez que o modelo considera dez torres. Os demais valores foram obtidos através de um espaçamento logarítmico entre C_0 e oito vezes este valor. Os valores foram assim gerados para que houvesse uma diferença sensível entre as correntes de fuga produzidas [5], possibilitando uma formação de padrões satisfatória. Tanto os dados de entrada como os de saída do modelo foram utilizados para alimentar a RNA desenvolvida. Nas Figuras 10 e 11 são mostrados os resultados das simulações, os espectros harmônicos da corrente de fuga para uma falha no início, meio e fim da linha respectivamente, utilizando o valor de capacitância C_3 .

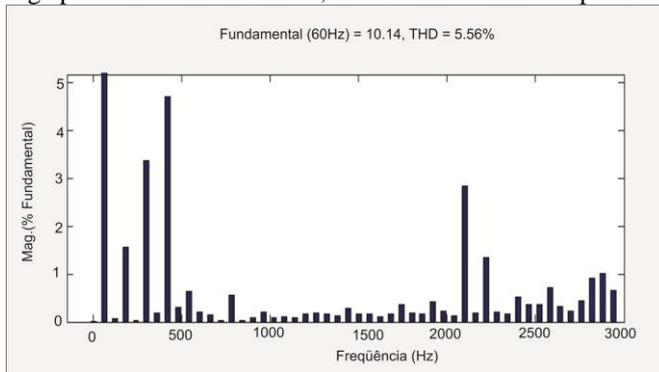


Figura 10 - Espectro da corrente de fuga para falha na 1ª torre.

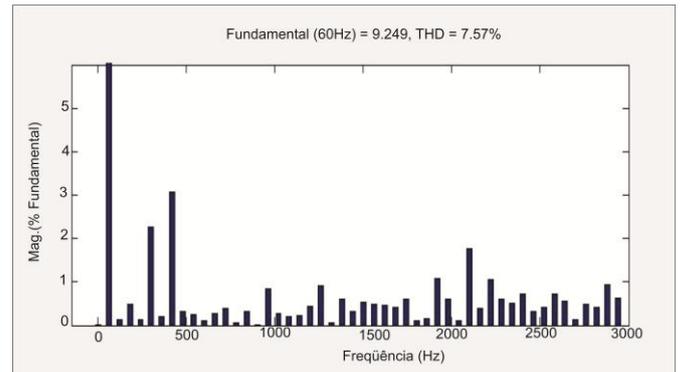


Figura 11 - Espectro da corrente de fuga para falha na 5ª torre.

Observa-se que uma falha no início da LT apresenta uma decomposição harmônica da corrente de fuga diferente de uma falha que ocorre no fim da LT. Foram simuladas falhas em todas as torres e empregando os dados da composição harmônica da corrente de fuga para localizar a falha através de Análise de Rede Neurais (RNA) .

5.1 Rede Neuronal Desenvolvida

A RNA, desenvolvida para localizar falhas em linhas de transmissão, foi programada de tal forma que forneça a localização deste e os valores de capacitância que o geraram, para uma dada decomposição harmônica de corrente de fuga. As entradas da RNA são as decomposições harmônicas da corrente de fuga obtidas via simulação. Por meio desta simulação foram obtidos 41 arquivos de decomposições harmônicas organizados e unidos em um único arquivo maior, de maneira que cada linha do arquivo correspondesse a uma decomposição harmônica com um total de 48 harmônicos. Portanto a variável de entrada é uma matriz 48×41 . Suas saídas são valores de capacitância e de localização da torre, sendo que estas duas variáveis apresentam-se juntas numa matriz de saída de dimensão 2×41 . Tanto na entrada quanto na saída são consideradas 4 condições de falha por torre e a condição normal de funcionamento. Na Figura 12 está ilustrado um organograma que descreve o procedimento feito desde a obtenção dos dados de tensão e corrente, através do analisador, até a localização da falha e da capacitância geradora deste.

Inicialmente tentou-se desenvolver uma RNA com apenas uma camada escondida, porém observou-se que o tempo de treinamento era muito longo, e que quase sempre o resultado não era satisfatório. Uma boa arquitetura (aqui referindo-se ao número de neurônios) encontrada de maneira empírica foi (48, 32, 16, 2), isto é, foram colocadas duas camadas intermediárias como mostra a Figura 13. Outras arquiteturas foram testadas também empiricamente e observou-se que algumas apresentam melhores resultados para falhas nas primeiras torres, enquanto que outras arquiteturas mostravam-se melhores para localizar falhas nas últimas torres. Em todos os casos foi utilizado o treinamento backpropagation resiliente, [11].

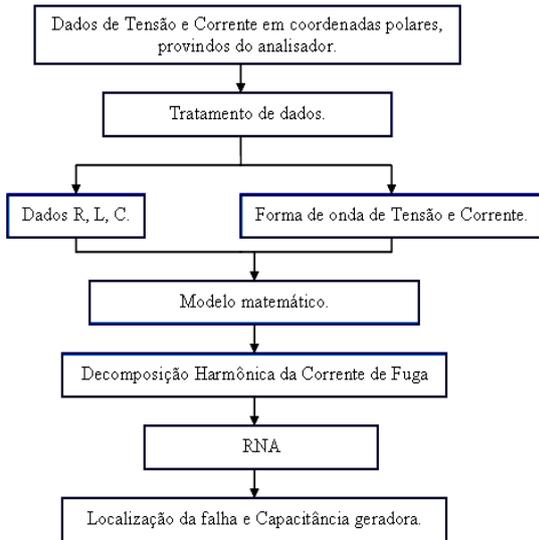


Figura 12 - Organograma do procedimento de verificação do estado da linha.

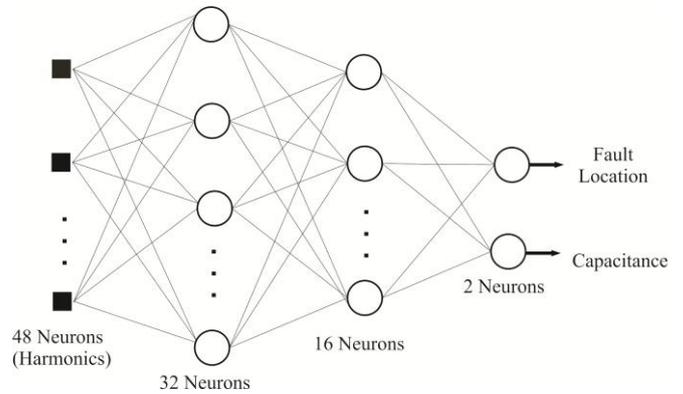


Figura 13 – Arquitetura da RNA.

5.2 Resultados

Foram considerados dois aspectos na validação da RNA desenvolvida. Primeiramente, no treinamento, a RNA deveria atingir a meta proposta, ou ainda, apresentar resultados bem próximos aos dados de entrada e em um curtíssimo intervalo de tempo. Se bem sucedida a RNA era submetida a dados de teste, dados estes que não estavam no treinamento desta. Os testes foram realizados com dois valores distintos de capacitância, $C'=3 \times 10^{-9}F$ e $C''=8 \times 10^{-9}F$ para cada torre.

A localização da falha foi feita inicialmente utilizando uma meta (erro médio) de 0,05. Observou-se que com este valor os resultados para os dados de treinamento encontravam-se muito próximos dos dados de entrada. Porém nesta situação os resultados para os dados de teste da RNA não eram muito bons, possivelmente a rede estava sendo sobre-treinada e perdendo o poder de generalização.

Foram testados vários valores diferentes para a meta da rede. Uma melhor resposta da rede foi encontrada ao utilizar a meta 0,1, que atingia a meta em apenas 20.000 épocas em um pouco mais de 6 (seis) minutos. Com este valor os resultados para os dados de treinamento não se apresentavam tão próximas dos iniciais, ver Tabela I, mas os dados de teste apresentavam-se bastante satisfatórios, ver Tabelas 2 e 3.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 a capacitância geradora de falha é representada por C e o local da falha por ℓ , com $\ell = 0$ indicando condição normal de funcionamento e os demais valores de ℓ situações defeituosas.

Na Tabela 1 é apresentada a diferença entre a entrada da RNA (dados de treinamento – 1ª. e 2ª. colunas) e os dados de saída (3ª e 4ª colunas). Por exemplo, observa-se que um dado de treinamento considerando uma falha na primeira torre e com capacitância $C = 2,7449 \times 10^{-9} F$ corresponde a uma saída de $\ell = 0,9989$ e capacitância de falha $C = 2,7567 \times 10^{-9} F$.

Tabela 1 – Resultados obtidos com os valores de treinamento, utilizando meta 0,1.

DADOS DE TREINAMENTO	SAÍDA DA RNA										
	ℓ	1,6344		2,7449		4,6320		7,7749		13,0757	
		$C(10^{-9})F$	ℓ	$C(10^{-9})F$	ℓ	$C(10^{-9})F$	ℓ	$C(10^{-9})F$	ℓ	$C(10^{-9})F$	ℓ
0	1,7298	0,0587	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	2,7567	0,9989	4,6130	1,0213	7,0792	0,9801	13,0895	1,0011	-
2	-	-	2,9101	2,0481	4,5815	2,1278	7,7523	2,0141	13,0806	1,9890	-
3	-	-	2,7015	2,9560	4,8427	2,9869	7,7726	3,0021	13,0741	3,0320	-
4	-	-	4,5005	4,4947	4,6134	3,9836	7,6078	3,9452	13,0760	3,9774	-
5	-	-	2,3009	4,8363	3,9971	4,5485	7,1515	5,0252	13,0144	4,9610	-
6	-	-	2,6189	6,1987	4,4700	6,5789	7,7869	6,0418	9,6529	5,6725	-
7	-	-	2,8944	6,7600	3,8084	7,5239	7,7647	7,1110	4,6261	6,1948	-
8	-	-	2,8887	7,2711	4,6377	7,8757	7,4338	8,0044	13,0811	7,9692	-
9	-	-	3,7397	8,6022	4,5046	9,0329	7,8057	9,0520	13,0684	9,0080	-
10	-	-	2,8021	10,0606	4,8466	9,9176	7,7647	9,9779	13,0290	9,9998	-

Tabela 2 – Valores de teste para capacitância $C'=3 \times 10^{-9}$, utilizando meta 0,1.

Tabela 3 – Valores de teste para capacitância $C''=8 \times 10^{-9}$, utilizando meta 0,1.

DADOS DE TREINAMENTO		SAÍDA DA RNA		AVALIAÇÃO
$C(10^{-9})$ F	ℓ	$C(10^{-9})$ F	ℓ	
3,0000	1	2,5061	0,9455	MUITO BOM
	2	1,6236	1,7084	MUITO BOM
	3	7,3484	3,8889	BOM
	4	6,1924	5,0980	BOM
	5	3,7849	3,5580	RAZOÁVEL
	6	9,6529	5,6725	MUITO BOM
	7	4,6261	6,1948	BOM
	8	5,8131	5,4770	RUIM
	9	3,9266	9,7598	BOM
	10	3,4943	7,3586	RUIM

DADOS DE TREINAMENTO		SAÍDA DA RNA		AVALIAÇÃO
$C(10^{-9})$ F	ℓ	$C(10^{-9})$ F	ℓ	
8,0000	1	6,5806	0,3152	BOM
	2	2,5648	2,9802	MUITO BOM
	3	3,5275	0,1559	RUIM
	4	7,2799	3,9858	MUITO BOM
	5	7,0547	4,9491	MUITO BOM
	6	6,0441	6,9408	BOM
	7	9,6427	4,9615	RUIM
	8	5,7633	8,8366	BOM
	9	6,2263	10,4250	BOM
	10	12,7744	9,8348	MUITO BOM

6 DIAGNÓSTICO – AJUSTE DA CAPACITÂNCIA PARA DETERMINAÇÃO DO FUNCIONAMENTO NORMAL

O método para determinação do funcionamento normal de uma LT é implementado a partir da verificação dos valores de capacitância ajustados para cada frequência medida. Desta maneira existe um modelo em circuito equivalente π para cada frequência, com sua respectiva capacitância, conforme é apresentado na Figura 14(a), onde a capacitância equivalente (total) da LT é mostrada na Figura 14(b).

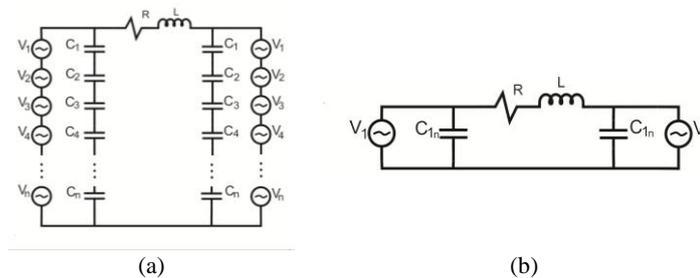


Figura 14 - Diagnóstico de falhas pelo ajuste da capacitância em cada frequência medida. (a) Capacitâncias para frequências individuais e (b) Capacitância da LT.

A determinação do funcionamento normal é obtido pela constatação destes valores ao longo da vida da LT já que existe um desgaste natural devido a vida útil da LT. A determinação deste desgaste é uma das vantagens deste tipo de monitoração.

7 MODELO FDI PARA MONITORAÇÃO DE LTs

Para as equipes de manutenção a informação sobre a localização da falha em uma LT determina a logística a ser empregada e o diagnóstico indica os recursos necessários para correção da falha. Como pode ser verificado neste trabalho, a monitoração da corrente de fuga em LTs pode determinar a isolamento de sua falha, isto é, a localização da falha. Esta isolamento uma etapa do FDI que, para as LTs, é independente do diagnóstico da falha. Portanto, a Figura 1 deve ser alterada para a Figura 15 para o FDI ser adequadamente empregado em LTs

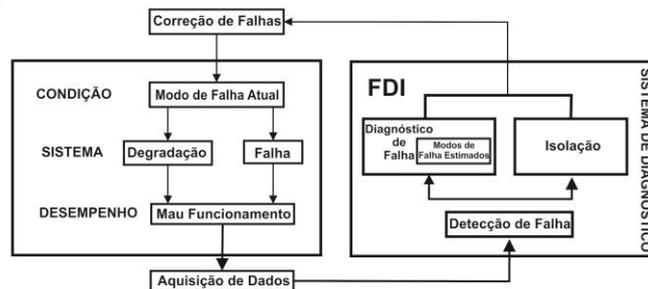


Figura 15 - Sistema de diagnóstico na monitoração do funcionamento de LT.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolve uma metodologia para predição de falhas em transmissão de energia elétrica, utilizando uma RNA para localização, a partir da monitoração da corrente de fuga e da sua decomposição harmônica para um dado trecho de LT. Os resultados apresentam valores satisfatórios de localização de falha e da capacitância geradora deste, podendo assim identificar o trecho sob falha da LT e analisar a condição de isolamento da LT através do valor da capacitância que o gerou.

A RNA foi testada, também com sucesso, para dados em condição normal de funcionamento. Há um ponto muito sutil entre a situação defeituosa e a condição normal de funcionamento, pois não existem registros que evidenciem qual é o valor limite para que uma capacitância possa ser considerada normal, nem os registros de capacitâncias na situação de interrupção. Isto torna a classificação mais difícil e portanto a necessária utilização de inteligência computacional.

Portanto, os resultados aqui apresentados são considerados bons e aplicáveis ao que se propôs fazer. É importante salientar que este trabalho é uma proposta metodológica e que são necessários estudos e aprimoramentos para que se possa conclusivamente proporcionar uma manutenção preditiva. Através deste trabalho vê-se a real possibilidade de localizar e verificar falhas, através da capacitância geradora deste, a condição de isolamento de uma linha de transmissão utilizando uma idéia conceitualmente diferente e inovadora.

9 REFERÊNCIAS

- [1] FERNÁNDEZ, M. C. G. (2004). *Planificación y Medida de la Efectividad del Mantenimiento Predictivo Aplicado a un Proceso Industrial Basándose en el Uso de Técnicas de Modelado de su Comportamiento y de Inteligencia Artificial*, Tesis Dep. de Electrónica y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid.
- [2] PAU, L. F. (1975). *Failure Diagnosis and Performance Monitoring*, Marcel Dekker Inc., ISBN: 0-8247-987-5
- [3] ISERMANN, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction From Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer Berlin
- [4] HAYT, W. H., J. A. Buck and A. Romeiro (2001). *Engineering Electromagnetics*, 6th ed. McGraw-Hill Companies, 2001, pp.34-35
- [5] GOMES, C. R., (2006). *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Decomposição Harmônica e Redes Neurais Artificiais*. Dissertação de Mestrado, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém-Pará.
- [6] CORREA, S. M., Gomes, C. R., Gomes Jr., L. A., Vieira Jr., P. (2006). *Computation of Capacitance of a Transmission Line Using the Finite Element Method*. In: Proc. 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis – CMD, Changwon, Korea
- [7] SCHÜMANN U., F. Barcikowski, M. Schreiber, H. C. Kärner (2002), “FEM Calculation and Measurements of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements”, 39th CIGRE, Session Paris, France, 25-30.
- [8] NEGRÃO, M. M. L. C. (2009) “*Modelo Matemático de Linha de Transmissão Contemplando Influências Ambientais para o Trecho Guamá-Utinga Localizada em Belém Pertencente a Eletronorte*.” Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará. Belém-Pará.
- [9] ZANETTA JR., L. C (2006). *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*, 2nd ed., São Paulo: Ed. Livraria de Física, pp. 123- 142.
- [10] CORREA S. M. (2003). “*Análise de Elementos Finitos para Determinação da Capacitância de Linhas de Transmissão*.” Dissertação de Mestrado, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém-PA.
- [11] M. Reidmiller and H. Braum, “*A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm*,” in Proc. 1993 IEEE International Conference on Neural Networks