



GSE/024

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

**RECONHECIMENTO DE DEFEITOS EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO
UTILIZANDO A TEORIA FRACTAL E AS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

Hélio P. Amorim Junior *[†] Alain F. Sanson Levy [†] Marley M. Vellasco* Aura Conci [⊗]

* Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

[†] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)

[⊗] Universidade Federal Fluminense (UFF)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar a utilização da teoria fractal como uma ferramenta de auxílio no diagnóstico de equipamentos elétricos de alta tensão. Conceitos básicos sobre a geometria fractal, bem como as grandezas fractais, dimensão fractal e lacunaridade, são apresentados e aplicados aos dados de Descargas Parciais (DP) obtidos em laboratório. Estes parâmetros fractais servem como valores de entrada na rede neural artificial, que tem como objetivo a classificação dos tipos de fontes de descargas parciais. Por fim os resultados indicam a real possibilidade de aplicação desta técnica no reconhecimento de falhas em equipamentos elétricos.

PALAVRAS-CHAVE

Fractal, Diagnóstico de Equipamentos Elétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os equipamentos elétricos de alta tensão possuem partes que estão susceptíveis a falhas e por esta razão podem apresentar um número enorme de anomalias. Existem, no entanto, sempre aquelas que por ser tornarem comuns, são as primeiras a serem monitoradas, tal qual o isolamento elétrico interno. Em grande parte das ocorrências de problemas ele é uma consequência de alguma anomalia interna ao equipamento, que deve ser diagnosticado.

Uma maneira eficiente de se avaliar as condições apresentadas pelo sistema isolante, se baseia na realização de um acompanhamento periódico ao longo da vida. Este procedimento viabiliza a adoção de precauções que tendam a preservar o período útil do

objeto em questão. Em geral, estes procedimentos de diagnósticos se fazem tão mais necessários quanto mais velhos estão os objetos analisados.

Dentre estes problemas correlacionados ao isolamento elétrico, as descargas parciais (DP) tem se evidenciado, ao longo dos anos de experiência de diagnóstico de equipamentos elétricos de alta tensão, como uma das principais mecanismos de defeitos. Como o nome sugere, inicialmente o fenômeno se realiza no isolamento de forma parcial e com o tempo existe a tendência de se tornar total, o que causaria um curto-circuito entre as partes energizadas e a terra, inutilizando do equipamento. Portanto, sua presença é sinônimo de falha futura e como tal deve ser monitorada ao longo da vida, sendo esta talvez a forma mais eficiente em se determinar o estado operativo do equipamento.

Através de experiências laboratoriais diversas fontes de descargas parciais foram simuladas, o que viabilizou a utilização de técnicas de identificação e reconhecimento dos tipos de defeitos. A técnica de redes neurais artificiais, que simula as características de aprendizado, associação e generalização dos aspectos humanos de uma forma computacional, pode ser usada para tal finalidade. O aumento da velocidade de processamento e a diminuição da margem de erros quando relacionados com um ser humano é, por vezes, superior. Existe, a partir do reconhecimento do tipo de defeito, um meio mais confiável de se estimar o perigo proporcionado pela presença deste. E mais, toda esta etapa é importante para o estágio complementar que é a aplicação em equipamentos em serviço.

Na maioria dos sistemas digitais de aquisição os dados referentes à ocorrência das descargas parciais são representadas por mapas tridimensionais, sendo as dimensões definidas como ângulo de fase de ocorrência da descarga parcial, a amplitude da descarga parcial em pC e a taxa de repetição desta descarga. De uma forma geral, a quantidade de dados necessária para representar um único mapa é muito grande e o meio pelo qual o trabalho tenta solucionar este problema é utilizando a teoria fractal, junto as suas grandezas fractais de dimensão fractal e lacunaridade.

2.0 - HISTÓRICO DA GEOMETRIA FRACTAL

Segundo Euclides, há mais de dois mil anos atrás, as formas geométricas simples, tais como cubos, paralelepípedos, esferas, podiam ser utilizadas para modelar todas as formas existentes na natureza. Sob esta idéia, surgia o que convenciou chamar de geometria Euclideana. Em sua concepção, os elementos poderiam ser classificados por sua dimensão inteira, 1, 2 ou 3. Desta forma, uma linha tem dimensão igual a 1, pois com apenas um único número se é capaz de definir qualquer ponto desta. No plano, por exemplo, necessitamos de dois números para definir um ponto e assim sucessivamente.

Para este matemático, objetos na natureza, por exemplo uma pedra, apesar de apresentar saliências, poros ou outras características particulares, apresenta uma dimensão espacial igual 3. Assim, uma classificação generalizada para todas as pedras de dimensão igual a 3 desprezaria as diferenças entre elas. Há de se consentir que características importantes são esquecidas neste contexto, por exemplo, o grau de rugosidade do objeto.

O matemático polonês conhecido por Benoit Mandelbrot é considerado o pai dos fractais, em seu artigo inicial ele disse: “Montanhas não são cones; Nuvens não são esferas; Os raios não caminham em linha reta e os cães não latem regularmente”. Se atribui à ele a criação de ferramentas matemáticas que deram origem a esse novo conceito de geometria. Embora o pensamento pareça evidente, assim como a teoria também o é, ele foi base para o surgimento da nova teoria: A Geometria Fractal.

Mandelbrot esclareceu a respeito da nomenclatura utilizada: “Eu cunhei a palavra fractal do adjetivo em Latim fractus. O verbo latino correspondente fragere significa ‘quebrar’, criar fragmentos irregulares. É contudo sabido – e como isto é apropriado para nossos propósitos! – que, além de significar ‘quebrado’ ou ‘partido’, fractus também significa ‘irregular’. Os dois significados estão preservados em fragmento” [1].

3.0 - TEORIA FRACTAL - FUNDAMENTOS BÁSICOS

A descrição matemática mais clássica de dimensão está baseada em como o tamanho de um objeto se

comporta quando sua dimensão linear cresce. Considere uma linha: se a dimensão linear da linha é dobrada, seu comprimento é dobrado. Agora, considere um retângulo, se a dimensão linear do retângulo for dobrada, seu tamanho, no caso a sua área, irá aumentar por um fator de quatro. No caso de um cubo este fator de crescimento valerá 8. Este relacionamento entre dimensão linear D , escala L , resultando no aumento do tamanho S pode ser generalizado por:

$$S = L^D \quad (1)$$

Na geometria Euclideana D assume valores inteiros de 1, 2 ou 3, dependendo de sua dimensão geométrica.

Existem formas ou objetos que, embora, aparentam ser curvas não satisfazem a esse relacionamento inteiro, ou seja, ao se aplicar um fator de crescimento L , seu tamanho não irá crescer com o expoente inteiro D , mas sim por algum número não inteiro. Estas formas são chamadas de fractais. Um clássico fractal foi introduzido em 1904 por Helge von Koch, a chamada Curva de Koch. A variação desta curva é denominada por flocos de neve.

A construção da curva de Koch inicia-se através de um linha reta, que recebe o nome de ‘initiator’. Particiona-se esta linha em três pedaços iguais. Nas partes intermediárias insere-se um triângulo equilátero que completa o ciclo de construção do passo inicial. A figura surgida neste primeiro passo, é denominada de gerador e será usada nos passos subsequentes. A figura 1 mostra alguns destes passos.

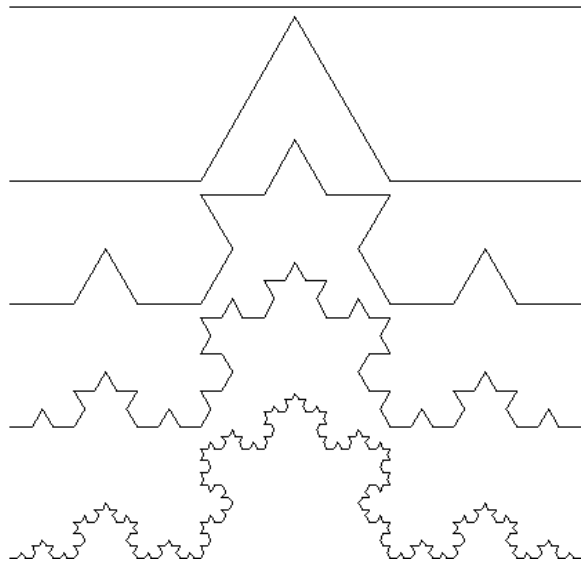


FIGURA 1 – Curva de Koch

No caso específico da curva de Koch, a cada iteração o comprimento da curva é acrescido por um fator de $4/3$. Embora a criação da curva seja extremamente simples, não existe uma fórmula algébrica que a descreva. Com relação à geometria Euclideana são válidas as seguintes comparações apresentadas na tabela 1:

Tabela 1 – Características das Geometrias

| Fractal | Euclideana |
|------------------------|-----------------------|
| Moderna | Tradicional |
| Independene da Escala | Baseada na escala |
| Objetos naturais | Objetos humanos |
| Descrita por algoritmo | Descrita por fórmulas |

Ou seja, a teoria fractal tem no máximo 20 anos enquanto a Euclideana, mais de 2000 anos. As formas caracterizadas pela geometria Euclideana são baseadas em comprimentos e escalas, por exemplo, raio de um círculo ou comprimento do lado de um cubo, enquanto que a fractal, pela sua característica de auto-similaridade, independe da escala. Por outro lado, a geometria fractal é direcionada para a representação de objetos naturais, tais como nuvens, imagens de tumores, impressões digitais, enquanto a Euclideana atua em objetos criados pelo homem. E por último a geometria Euclideana pode definir um objeto por meio de fórmula algébrica, como exemplo uma reta: $y = A x + B$, o que na fractal é realizado por meio de algoritmos iterativos e recursivos, como o caso da curva de Koch.

Mandelbrot expôs primeiramente sua idéia através da seguinte questão: Quão longa é a costa litorânea do Reino Unido? Em uma enciclopédia era possível achar algumas milhas e numa outra achar um valor completamente diferente. A pergunta foi: qual estaria certa? Uma dúvida pairava sobre estes números até que, o artigo escrito em 1967 por Mandelbrot, fosse publicado e então, os fatos começaram a ser discutidos.

Apesar da existência de precisos aparelhos de medição, na prática não é possível obter um comprimento exato que responda questões simples como esta. Surge a partir daí a idéia fundamental desta nova técnica, que é a de assumir que duas quantidades – comprimento, superfície ou volume e escala – não variem arbitrariamente, mas que estejam relacionadas por uma lei que permita computar uma quantidade em relação a outra. Esta lei recebeu o nome de 'Power Law'.

Através desta lei, a *Dimensão Fractal*, uma grandeza importante no estudo dos fractais, pode ser descrita. Na realidade, grandezas fractais como esta podem ser usadas na descrição e na modelagem matemática de muitas formas complexas, tais como montanhas, nuvens, ondas marítimas, costas litorâneas, bem como, em tumores, impressões digitais, aspectos visuais.

Descargas Parciais (DP) ocorrendo nos sistemas de isolamento de equipamentos elétricos de alta tensão são, na maioria dos sistemas de medição, determinadas por meio de mapas tridimensionais. Em suma, são criados gráficos 3-D que representam as grandezas ($\phi - n - q$) das DP. Sabe-se através de estudos experimentais que existem diversas fontes de DP e

cada qual apresenta um padrão característico. Sendo assim, existe uma real possibilidade de identificação do tipo de fonte de DP no sistema de isolamento de um equipamento elétrico, através da técnica geométrica de Fractais.

4.0 - GRANDEZAS FRACTAIS

A definição de dimensão é difícil de ser entendida. Durante séculos matemáticos discutiram sobre o significado de dimensão, e desde então existem várias noções de dimensão. Das três formas especiais da Dimensão Fractal de Mandelbrot, que são: *Auto-Similaridade; Compass-Setting e Box - Counting*, motivado pelo trabalho de Felix Hausdorff (1868-1942) em 1919, o método de Box - Counting tem encontrado mais aplicações na ciência atual, tanto por sua simplicidade e como por sua aplicabilidade computacional.

Dimensão Box-Counting: Propõe uma medição sistemática, que pode ser aplicada a qualquer estrutura no plano e pode ser adaptada às estruturas no espaço. A idéia é muito simples: coloca-se a estrutura a ser medida em um quadrado com diversos quadrados de tamanho L, e simplesmente contam-se a quantidade de quadrados que contém alguma parte da estrutura. Esta quantidade é dada pelo número N. Este número dependerá do tamanho escolhido de L, que pode ser escrito como N(L). O próximo passo é diminuir progressivamente o tamanho dos quadrados (L) e anotar o correspondente número N(L). A seguir traçamos um diagrama log-log entre $\log(N(L)) / \log(1/L)$. A figura 2 demonstra o exemplo da Costa da Reino Unido:

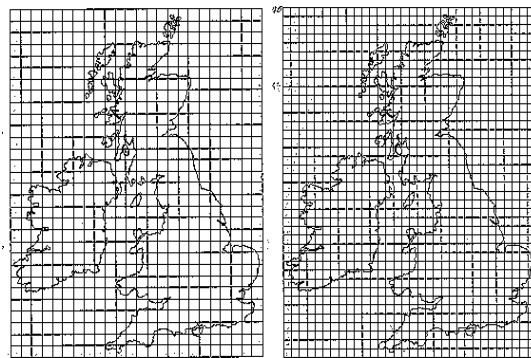


FIGURA 2 - Mapa do Reino Unido

O exemplo mostra a figura recortada em quadrados de dois tamanhos, perfazendo um total 24 e 32 quadrados respectivamente. A quantidade de boxes cortados que apresentam alguma parte do mapa é respectivamente 194 e 283. Destes dados a dimensão box-counting é facilmente determinada:

$$d = \frac{\ln 283 - \ln 194}{\ln 32 - \ln 24} \approx \frac{2.45 - 2.29}{1.51 - 1.38} \approx 1.31$$

que está de acordo com o resultado obtido pelo método *compass-setting* [2].

Este valor representa quão irregular é o objeto analisado. Observa-se que, se ao invés de contornos representando as irregularidades, fosse utilizado uma linha reta, as diferenças entre as duas análises seria menos evidente, apontando um objeto menos irregular. Considere uma linha reta (fig. 3) também recortada em quadrados de tamanhos diferentes, como a relação de box-counting tem-se:

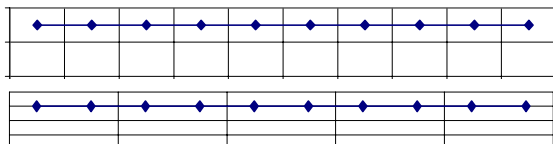


FIGURA 3 – Uma Reta

$$d = \frac{\ln 10 - \ln 5}{\ln 10 - \ln 5} \approx \frac{2,30 - 1,61}{2,30 - 1,61} \approx 1,00$$

Ou seja, a irregularidade deste objeto é nula, pois sua dimensão fractal está de acordo com dimensão determinada pela geometria Euclideana.

Através da plotagem dos pontos no diagrama é possível obter uma reta onde a inclinação desta recebe o nome de dimensão *box-counting*, ou Dimensão Fractal. Além disto, ela se aplica a objetos tridimensionais, onde os quadrados se tornam cubos com altura, comprimento e largura, sem entretanto, alterar o conceito.

A outra grandeza apresentada neste trabalho se relaciona com a quantidade de buracos ou lacunas que o fractal considerado possui e recebe o nome de lacunaridade. A idéia desta nova grandeza surgiu através da percepção que fractais diferentes podiam possuir a mesma dimensão fractal, impossibilitando uma distinção exata entre objetos. Sendo assim, o surgimento de uma segunda grandeza poderia ajudar em situações como esta.

Lacunaridade se relaciona com a distribuição e tamanho dos vazios de um fractal. De maneira geral, se um fractal tem grandes vazios ou buracos, ele possui uma lacunaridade alta; por outro lado, se um fractal é quase invariante a translação, tem baixa lacunaridade. Há aplicações desta propriedade no processamento de imagens, ecologia, medicina, etc.

5.0 - CÁLCULO DAS GRANDEZAS FRACTAIS

O algoritmo utilizado no trabalho provém do artigo [3], ilustrado no diagrama abaixo contido na figura 4.

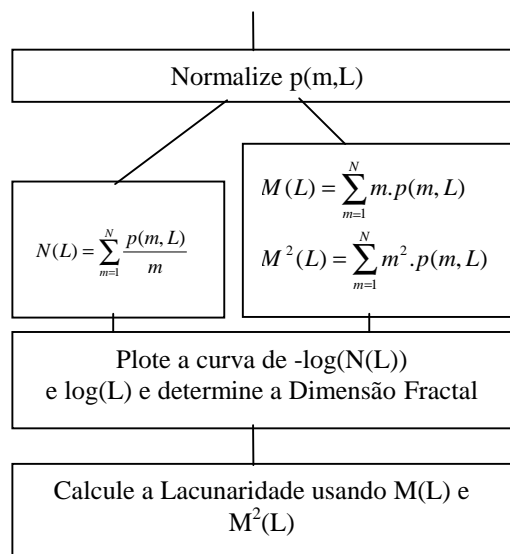
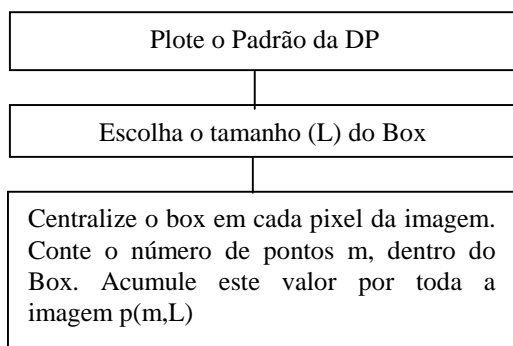


FIGURA 4 - Algoritmo de Cálculo das Grandezas Fractais

A partir dos pontos obtidos $N(L)$ que é função do tamanho (L) do box, é possível traçar uma curva onde a inclinação recebe o nome de dimensão fractal. A lacunaridade dada por Λ , que também é função do tamanho (L) do box, é obtida através da aplicação da fórmula (2).

$$\Lambda(L) = \frac{M^2(L) - [M(L)]^2}{[M(L)]^2} \quad (2)$$

Vários pontos foram obtidos para esta grandeza, sendo que não existe uma regra geral para qual deles adotar. Neste trabalho, foram utilizados boxes de vários tamanhos (L).

6.0 - APLICAÇÃO EM DESCARGAS PARCIAIS

Descargas parciais são fenômenos que ocorrem em sistemas elétricos isolantes, ocasionados pelo rompimento da rigidez dielétrica do mesmo. Seu surgimento decorre pelo processo de ionização do meio gasoso que se encontra sob um elevado campo elétrico.

Algumas experiências foram realizadas fazendo uso de células isoladas a óleo, de forma a simular defeitos em sistemas isolantes. Estabeleceram-se configurações capazes de representar as características de alguns tipos de DP, como as descargas na alta tensão, descargas na terra e descargas em eltrodo flutuante. A partir destes dados reais, ferramentas foram desenvolvidas com o objetivo de reconhecer estes padrões, originando um mecanismo importante no diagnóstico de equipamentos elétricos em serviço. Uma célula de teste que origina DP no circuito elétrico é ilustrada na figura 5.

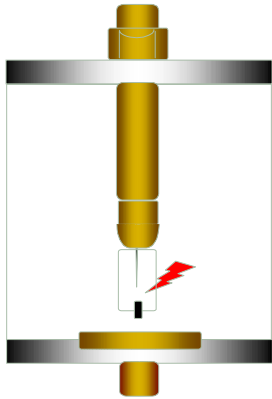


FIGURA 5 –Exemplo de uma Célula Experimental

O resultado de uma medição de DP, utilizando o ICM System, desenvolvido pela Power Diagnostix, é demonstrado na figura 6, onde o eixo horizontal representa o ângulo da tensão de alimentação, o eixo vertical a amplitude em pC das DP e no eixo longitudinal, representado pela tonalidade de cores, se encontra a taxa de repetição das DP, naquele ângulo e na determinada amplitude.

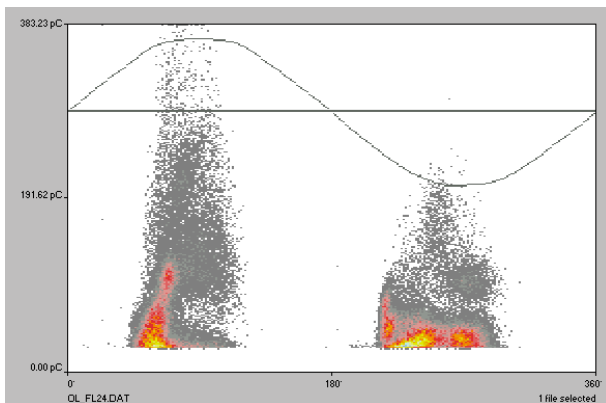


FIGURA 6 - Exemplo de um Mapa de DP

Com base nestes dados aplica-se o algoritmo de exposto no diagrama de blocos, para se determinar as grandezas fractais, dimensão fractal e lacunaridade. A resposta obtida por este algoritmo está exposta em forma de um gráfico ilustrado na figura 7. Este gráfico representa a dimensão fractal no eixo horizontal e lacunaridade no eixo vertical.

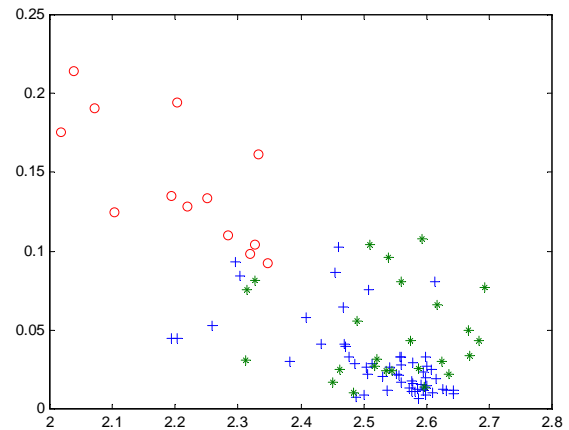


FIGURA 7 – Gráfico Dimensão Fractal x Lacunaridade das Amostras de Descargas Parciais

Onde, o, + e * representam os três tipos de falhas simulados em ensaios laboratoriais. A partir destes dados obtidos, pode-se fazer uso de técnicas inteligentes para a classificação dos padrões de DP. No entanto esta redução no número de neurônios na camada de entrada inviabiliza o processo de treinamento da rede neural. Optou-se pelos valores $N(L)$ e $\Lambda(L)$ obtidos em função do tamanho L de box, num total de 21. As redes neurais artificiais (RNA) foram utilizadas para o propósito de classificação e reconhecimento dos padrões. A arquitetura dos neurônios biológicos, suas conexões e a sua capacidade de transmitir informações, foram utilizadas computacionalmente no desenvolvimento desta técnica. Capacidade de aprender por meio de exemplos e a partir deste aprendizado conseguir generalizar este conhecimento para dados nunca apresentados antes, é a principal aplicação das RNA.

Neste trabalho se fez uso do algoritmo de aprendizado conhecido como Back-Propagation (BP). O BP possui uma topologia de múltiplas camadas de neurônios em que o erro encontrado na saída da rede é retropropagado para entrada, reajustando os pesos sinápticos, que na realidade são os únicos parâmetros a serem modificados em uma RNA. Este processo de ajuste dos pesos sinápticos é denominado de treinamento. A parte final, que surge depois desta etapa, é chamada de teste. É por meio dos testes que se avalia a capacidade de generalização da RNA, pois nesta etapa são avaliados exemplos nunca vistos por ela. A arquitetura de uma RNA básica com a topologia 2-4-4-2 é ilustrada na figura 8.

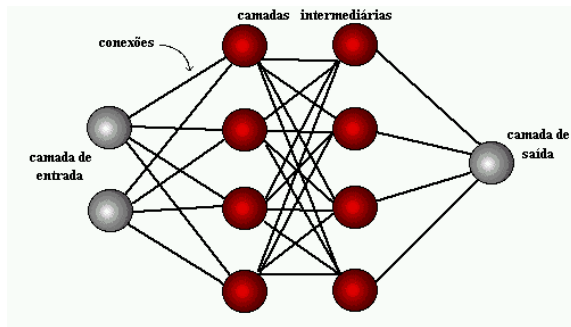


FIGURA 8 - Rede Neural com duas Camadas Escondidas (2-4-4-1)

No presente trabalho 115 amostras de DP foram coletadas em três células experimentais. Em geral 70% dos dados são utilizados para treinamento e o restante para teste. A tabela 2 descreve este banco de dados.

Tabela 2 - Banco de Dados das Células Experimentais

| Banco de Dados | Treinamento | Teste |
|----------------|-------------|-------|
| Falha 1 | 17 | 18 |
| Falha 2 | 28 | 27 |
| Falha 3 | 18 | 7 |

A determinação da topologia é realizada por meio tentativas. A rede que apresentou melhor performance foi 42 - 10 - 3. O erro máximo admitido no treinamento foi de 0.001, com uma taxa de aprendizado de 0.3. A taxa de acerto obtido para uma rede com estas características foi considerado excelente, 100% na topologia escolhida. A tabela 3 apresenta as quantidades de padrões classificadas na etapa de teste.

Tabela 3 - Avaliação da Performance da RNA

| | Falha 1 | Falha 2 | Falha 3 |
|---------|---------|---------|---------|
| Falha 1 | 18 | - | - |
| Falha 2 | - | 27 | - |
| Falha 3 | - | - | 7 |

7.0 - CONCLUSÃO

Em qualquer problema do dia-a-dia, a solução está intimamente ligada a quantidade de informações adquiridas. No caso humano por exemplo, diversos são os fatores que definem a pessoa, tais como nome, documentos, impressão digital, retina, etc. Tendo posse destes dados, a taxa de falha em se determinar de que pessoa se trata é muito baixa. No caso específico do equipamentos elétricos de alta tensão, em especial o fenômeno de ocorrência de descargas parciais, apesar dos sistemas de medição digitais terem suplantado os velhos sistemas analógicos, ainda há uma forte dependência da experiência do operador no que tange ao reconhecimento e diagnóstico dos defeitos.

O trabalho propõe a criação de mecanismos, a partir das modernas técnicas, capazes de minimizar esta dependência e além disto, automatizar os resultados obtidos. A utilização de grandezas fractais como a dimensão fractal e a lacunaridade, na definição do tipo de defeito sob estudo, representado neste trabalho por sinais de descargas parciais (DP), demonstrou, através dos resultados obtidos, ser uma ferramenta útil no estudo de diagnóstico de equipamentos elétricos.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MANDELBROT, B. B. The fractal geometry of nature, 1977.
- [2] PEITGEN, H.O., JÜRGENS, H. e SAUPE, D., Chaos and fractals: new frontiers of science, 1992.
- [3] KRIVDA, A., GULSKI, E., SATISH, L. e ZAENGL, W., The use of fractal features for recognition of 3-D discharge patterns, IEEE TDES, vol.2, Oct. 1995.
- [4] SATISH, L. e ZAENGL, W., 'Can Fractal Features be Used for Recognizing 3-d Partial Discharge Patterns?', IEEE TDES, vol.2, Jun. 1995.
- [5] ZURADA, J. M., "Introduction to Artificial Neural Networks", West Publishing Company, 1992.
- [6] MANDELBROT, B. B., SATORRAS, R.P. and RAUCH, E.M., "The geometry of Critical Ising Clusters: Gap Independence and Global Structure", a ser publicado