

ENSAIOS DE EDDY-CURRENT NA AVALIAÇÃO DO ESTADO OPERACIONAL DE TUBOS DE GERADORES DE VAPOR DE CENTRAIS NUCLEARES

Luiz Antonio Negro Martin Lopez

Faculdade de Engenharia Industrial - FEI, Departamento de Energética, luizlope@cci.fei.br

Daniel Kao Sun Ting

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, Departamento de Engenharia de Reatores, dksting@net.ipen.br

Resumo

Neste trabalho é apresentado o resultado de uma pesquisa a nível mundial sobre os impactos técnico-econômicos causados por falhas nos feixes tubulares de geradores de vapor de centrais nucleares. É evidenciada a necessidade de desenvolver novas técnicas de avaliação do estado operacional dos tubos que compõem os feixes tubulares. Apresenta-se o ensaio não destrutivo de *Eddy-Current* que utiliza o princípio eletromagnético das correntes de *Foucault* para a inspeção e detecção de falhas nos tubos, bem como os principais tipos de defeitos. São apresentados sinais gerados por um equipamento de ensaio MIZ-40 da Zetec. A visualização e o processamento dos sinais foram realizados pelos programas Labview e Matlab. A análise dos sinais gerados tem sido uma das maiores fontes de erros de interpretação de sinais por parte de inspetores pois depende unicamente do julgamento humano. Este artigo também apresenta uma breve descrição de um sistema automático de análise de dados que vem sendo desenvolvido e que utiliza lógica *fuzzy* e inteligência artificial.

Palavras-chave: *Foucault*, ensaio, gerador de vapor, sinais

1. INTRODUÇÃO

Os geradores de vapor (GV's) de centrais nucleares do mundo todo têm apresentado sérios problemas que levam freqüentemente a paradas na operação, causando perdas na capacidade de oferta de energia, grandes despesas com reparos e substituições, bem como a exposição de pessoal à radiação.

Nos feixes tubulares dos GV's é onde se concentram os maiores problemas. Os vazamentos de água do circuito primário para o circuito secundário podem levar, além das perdas de disponibilidade e de dinheiro, a sérios prejuízos ecológico-sociais, caso ocorra contaminação do meio ambiente.

O envelhecimento prematuro dos tubos dos GV's é a razão dos vazamentos ocorridos. Uma eficiente monitoração do estado do feixe tubular e o diagnóstico preciso de falhas são as ações mais apropriadas para evitar os sérios problemas dos GV's e suas conseqüências.

A inspeção dos tubos dos geradores de vapor por meio de *Eddy-Current* é uma das formas mais eficientes que existem no momento para a avaliação da condição operacional dos feixes tubulares. Os sinais fornecidos pelos sensores de *Eddy-Current* são muito sensíveis aos diversos tipos de defeitos, apresentam muitas interferências e são de difícil interpretação pelos inspetores dada a sua complexidade (Erbay & Upadhyaya, 1997).

O objetivo deste trabalho é criar os meios necessários para a aquisição de sinais de *Eddy-Current* que possam ser posteriormente processados, analisados e interpretados

automaticamente por sistemas *fuzzy*-neurais, contribuindo dessa forma para a redução, ou até mesmo exclusão, de julgamentos individuais ou pessoais nos diagnósticos de falhas de tubos de geradores de vapor.

2. O PROBLEMA MUNDIAL DO ENVELHECIMENTO DE GV's

Atualmente existem no mundo aproximadamente 100 usinas nucleares com reatores a água pressurizada tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*). Segundo Odar e Bouecke, 1996, dessas usinas, mais de um terço têm atualmente apresentado problemas nos seus GV's. Os geradores de vapor são grandes trocadores de calor do tipo casco e tubos em forma de U que transferem calor do circuito primário para o circuito secundário de uma usina PWR gerando vapor e movendo turbo-geradores.

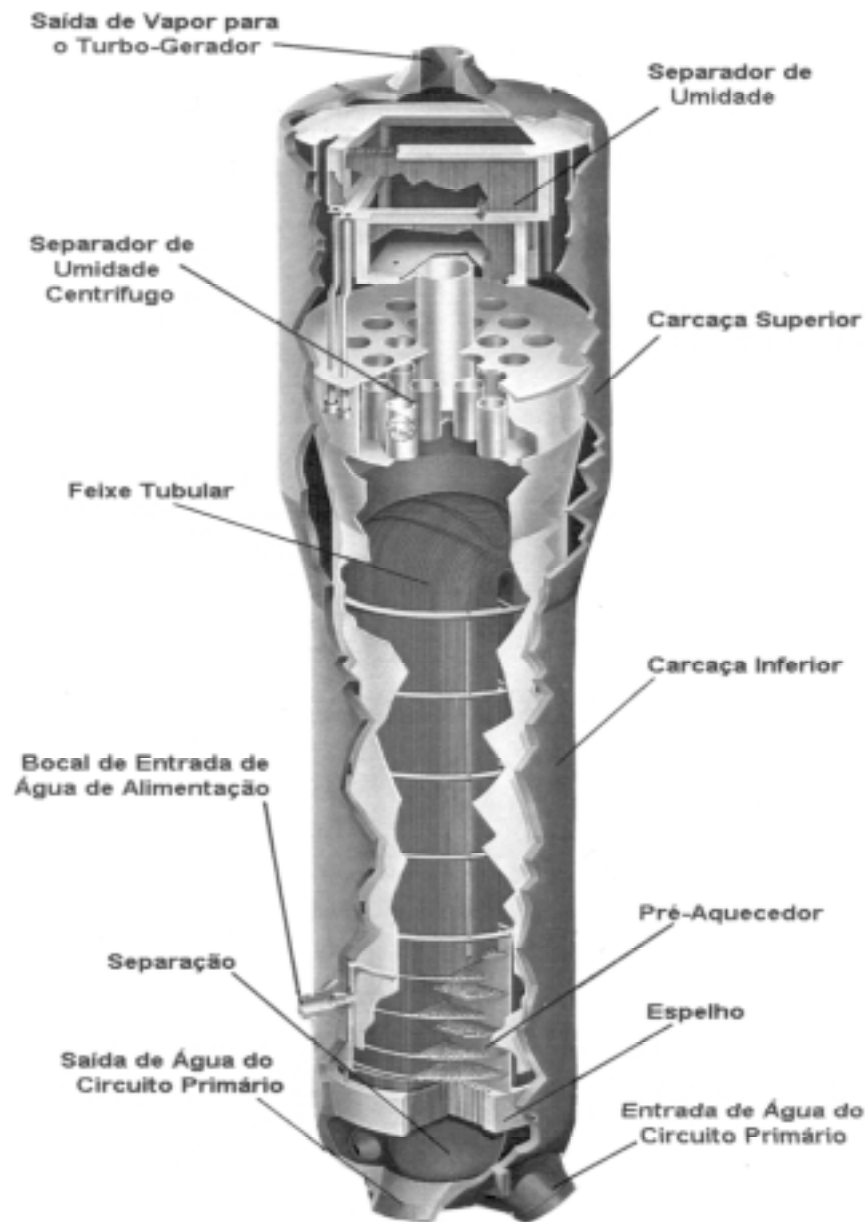


Figura 1. Vista em corte de um Gerador de Vapor típico
(Westinghouse Electric Corporation)

Os primeiros projetos de usinas levaram em conta que a vida útil dos geradores de vapor seria a mesma dos demais componentes do primário, pois nada nessa época sugeria o contrário. Entretanto, a experiência operacional mostrou ao longo dos anos que essa consideração não era correta e que os GV's eram muito suscetíveis a falhas.

A vida típica dos GV's foi originalmente prevista para 30 a 40 anos. No entanto, 35 geradores de vapor em 12 usinas tiveram que ser substituídos nos primeiros 14 anos de operação devido a problemas não previstos que não foram resolvidos ou progrediram.

Os geradores de vapor são equipamentos fundamentais em usinas PWR. Mais de 30 anos de experiência na operação de usinas mostram que a confiabilidade dos geradores de vapor afeta significativamente a disponibilidade e o desempenho geral da usina, gerando custos não previstos que a indústria nuclear tem que absorver.

Os problemas de corrosão ou degradação mecânica freqüentemente levam à realização de manutenções preventivas ou corretivas que são onerosas em termos de trabalho de reparo, perda de potência e exposição à radiação do pessoal envolvido. O número de tamponamentos de tubos realizados nessas manutenções têm excedido os valores previstos. Além disso, o tempo gasto em uma inspeção ou parada não prevista ou mais demorada, também leva a consideráveis prejuízos aos usuários, acionistas e clientes, resultantes da não disponibilidade da usina.

Segundo Whyatt *et al.* (1995), somente nos Estados Unidos, os geradores de vapor foram responsáveis por uma média de 3,4% do Fator de Perda de Capacidade (FPC) de 1975 a 1994. Entre 1975 e 1988, paradas não previstas de geradores de vapor resultaram em perdas de geração da ordem de 135 milhões de MWh em todo o mundo.

A Figura 2 apresenta a evolução do FPC ao longo dos anos nos Estados Unidos, devido a problemas nos GV's, incluindo substituições completas.

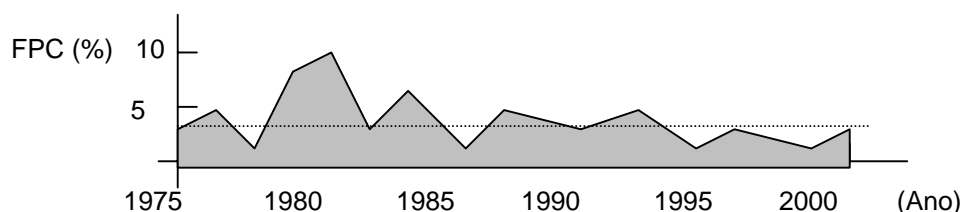


Figura 2. Evolução do Fator de Perda de Capacidade

As ações corretivas promovidas pelos fabricantes vão de pequenas melhorias operacionais a grandes e onerosas harmonizações de projeto, materiais estruturais e da química da água, visando a melhoria do desempenho.

Além disso, devido à natureza da energia nuclear e de seus desdobramentos públicos, tais problemas levaram a avaliações relativas à segurança e suas conseqüências para a população. Consequentemente, esforços, verbas e um tempo considerável têm sido demandados para a eliminação, ou redução para níveis aceitáveis, dos problemas nos geradores de vapor.

Avaliações técnico-econômicas determinaram a substituição completa e prematura de geradores de vapor. Whyatt *et al.* (1995), apresentam que em 22 usinas foram substituídos 61 geradores de vapor até 1994 a um custo médio de US\$ 40 milhões por GV e 130 dias de parada por usina. Segundo os mesmos autores, entre 1994 e 2000 mais 25 usinas com 85 GV's atingiram a mesma condição o que, evidentemente, são números bastante significativos.

3. O ESTADO DE INTEGRIDADE E A SEGURANÇA DOS GV's

Os geradores de vapor, como componentes de interface entre os circuitos primário e secundário, têm grande importância para a planta pois, além de transferirem calor eficientemente entre os dois circuitos, também devem impedir qualquer passagem de água radioativa pressurizada do circuito primário para o circuito secundário, que opera a uma pressão menor.

Esta dupla função dos GV's resulta em requisitos de projeto que levam a resultados opostos, exigindo dos projetistas uma dosagem criteriosa entre as funções de transferência de calor e impedimento da passagem de radioatividade. A espessura da parede dos tubos deve ser pequena por considerar a troca de calor, porém deve ser suficiente para garantir a confiabilidade operacional considerando a degradação dos tubos.

As dimensões dos tubos devem levar a um feixe tubular compacto visando uma alta eficiência na troca de calor. Por outro lado, o passo dos tubos no feixe deve ser grande suficiente para que a inspeção e a manutenção sejam feitas de maneira eficiente.

A fabricação é importante no estabelecimento da condição de segurança de um GV e sua integridade só poderá ser comprovada se existir um controle eficiente da composição e do comportamento dos materiais, bem como de todos os detalhes construtivos.

Os feixes tubulares dos geradores de vapor são particularmente sujeitos a falhas e degradação, motivados por uma série de fatores que agem em conjunto ou isoladamente, tais como falhas nos códigos de projeto e nas técnicas analíticas disponíveis na época, aparecimento de mecanismos não previstos de degradação de materiais e componentes devido às altas temperaturas de operação, altas vazões e concentração de elementos corrosivos nos meios fluidos.

A quantificação dos fatores envolvidos no processo de envelhecimento dos tubos dos geradores de vapor é fundamental para o correto gerenciamento e avaliação da sobre-vida (Bartonicek *et al.*, 1996). A necessidade crescente de precisão na determinação de custos, na avaliação da disponibilidade e da confiabilidade operacionais (Carter, 1978), bem como a globalização, potencializam a necessidade do conhecimento do estado de integridade dos GV's. A monitoração operacional é uma ferramenta que limita os possíveis mecanismos de falha na medida em que considera suas causas. A avaliação dos resultados das monitorações fornece as regiões onde as falhas possíveis podem ocorrer e, portanto, quais são de interesse para exames especiais como testes não destrutivos que monitoram as consequências de um mecanismo de falha.

4. PRINCIPAIS DANOS NOS FEIXES TUBULARES DOS GV's

O desempenho operacional dos GV's é comprometido por fatores que atuam isoladamente ou em conjunto, causando uma excessiva degradação dos tubos. Tais fatores são: projeto e fabricação deficientes, materiais inadequados e controle inadequado da química da água.

Segundo Bouecke & Flammann (1996), a maior parte dos danos é causada por fenômenos de corrosão, vibração induzida pelo escoamento e desgaste.

Os principais fenômenos de corrosão que podem levar à ruptura são o desgaste geral (*wastage*), a redução da espessura da parede (*thinning*), o desgaste localizado (*pitting*), o ataque intergranular (*Intergranular Attack* - IGA) e a corrosão sob tensão (*Stress Corrosion Cracking* - SCC).

O *pitting* é uma degradação volumétrica e resulta de diferenças galvânicas no tubo. O desgaste localizado ácido (*acidic pitting*) é o tipo mais comum e é associado com a introdução de cloretos, ânions de sulfetos e óxidos de cobre no gerador de vapor por componentes da planta (Rozenfeld, 1981). O ataque intergranular (IGA), é caracterizado pelo ataque relativamente uniforme do contorno do grão na superfície do tubo e pode ser volumétrico ou

bi-dimensional. A corrosão química é o fator que mais contribui no IGA com a tensão contribuindo com menor intensidade. A corrosão sob tensão (SCC) consiste em uma fissura simples ou múltiplas fissuras maiores com ramificações de pequenas a moderadas e é considerada como bi-dimensional com largura e profundidade (Jones & Ricker, 1998). A SCC ocorre tanto no lado do circuito primário como no lado do circuito secundário como uma combinação de corrosão química e tensão. Normalmente ocorre nas variações de geometria da tubulação tais como expansões, estricções ou em seções de tubos que foram tensionadas, como por exemplo, o lado interno dos tubos em U do gerador de vapor.

Os fenômenos acima mencionados devem ser criteriosamente avaliados por meio da determinação de suas causas e mecanismos visando, dessa forma, restringir os efeitos não desejados no desempenho dos GV's.

5. INSPEÇÕES DO FEIXE TUBULAR

A monitoração do estado de integridade dos tubos do GV é feita por meio de inspeções. O arranjo do feixe tubular dificulta e até impede, o acesso à superfície externa dos tubos que normalmente tem diâmetro de $\frac{3}{4}$ de polegada (19 mm), só permitindo o acesso ao seu interior por meio de sondas.

Considerando que os GV's inspecionados devem continuar a operar tão logo quanto possível, a inspeção deve ser feita rapidamente. Outro fator a considerar é a contaminação por radionuclídeos a que os inspetores são submetidos caso a proximidade do operador ou o tempo de inspeção não sejam apropriados.

Dessa forma, as inspeções devem consistir de ensaios não destrutivos (END) que sejam rápidos e que preservem a capacidade operacional do gerador de vapor após a inspeção.

A inspeção por *Eddy-Current* é atualmente uma das formas mais eficientes de detectar e monitorar falhas ou defeitos que possam comprometer a integridade dos tubos de geradores de vapor e tem sido extensivamente utilizada (Upadhyaya *et al.*, 1997). Esta inspeção permite determinar o tipo, o tamanho, a forma, a geometria e a posição das falhas ou defeitos dos tubos inspecionados além de revelar variações de composição e dimensões. A alta velocidade do teste, em comparação com outros métodos e a possibilidade de automação do ensaio, com avaliações feitas através do computador, são os grandes potenciais deste método de inspeção.

5.1 Princípio de funcionamento do *Eddy-Current*

A inspeção por *Eddy-Current* é baseada no princípio eletromagnético das correntes parasitas, ou seja, a indução eletromagnética de correntes elétricas circulares no material, também conhecidas como correntes de *Foucault*, conforme apresentado na Figura 3.

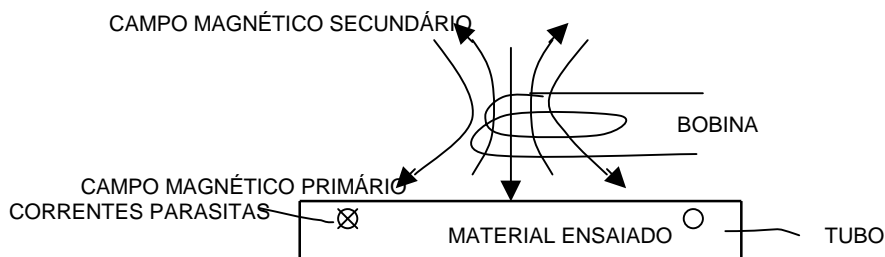


Figura 3. Princípio de funcionamento do *Eddy-Current*

As correntes parasitas são geradas no material ensaiado por meio de um campo magnético alternado primário com determinada frequência e intensidade, gerado por uma bobina indutora de forma geométrica apropriada e excitada por uma corrente alternada (Stegemann, 1986).

As correntes parasitas geram um campo magnético alternado secundário, o qual é oposto ao campo primário, gerado pela bobina. Assim, o campo primário será tanto mais atenuado quanto mais intenso for o campo secundário.

A formação das correntes parasitas no tubo depende, além da geometria, primeiramente das características eletromagnéticas do material como a condutividade elétrica (σ) e permeabilidade magnética (μ), em especial para material ferromagnético. A não homogeneidade do material também influencia no comportamento das correntes parasitas. Alterações locais de condutividade podem ter origens completamente diversas tais como trincas e descontinuidades no material com diferentes formas geométricas ou variações na composição do material (Stegemann *et al.*, 1997).

A Figura 4 apresenta o esquema do circuito utilizado nos ensaios de *Eddy-Current*.

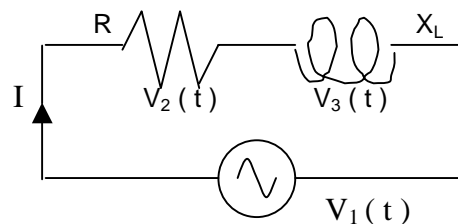


Figura 4. Circuito do ensaio de Eddy-Current

No circuito acima, a reatância indutiva X_L é dada pela seguinte expressão:

$$1) \quad X_L = 2 \pi f L \quad ($$

A frequência (f) afeta significativamente a geração das correntes parasitas devido ao efeito pelicular, ou seja, quanto maior a frequência, menor a profundidade de penetração da corrente alternada. L é a indutância, dada pela expressão:

$$2) \quad L = N^2 / \mathfrak{R}_T \quad ($$

Na expressão da indutância, N é o número de espiras da bobina e \mathfrak{R}_T é a relutância total. A relutância é a reação de um meio à passagem de um fluxo magnético Φ dado por:

$$3) \quad \Phi = N I / \mathfrak{R}_T \quad ($$

O fluxo magnético variável gerado pela corrente alternada produz uma força eletromotriz induzida que gera as correntes de *Foucault*.

A relutância total é a somatória das reações dos diversos meios (a,b,c,...) atravessados pelas linhas de fluxo e é dada por:

$$4) \quad \mathfrak{R}_T = l_a / \mu_a S_a + l_b / \mu_b S_b + l_c / \mu_c S_c + \dots \quad ($$

onde l é o comprimento μ é a permeabilidade magnética e S é a área.

A tensão nesse circuito é:

$$V_1 = Z I \quad (5)$$

onde Z é a impedância e I é a corrente. Tanto a resistência desse circuito quanto a reatância indutiva são compostas por parcelas da bobina e da peça testada.

Utilizando o plano complexo para representar as grandezas acima, a impedância é representada por um vetor de comprimento Z e pelo ângulo de fase α conforme apresentado na Figura 5:

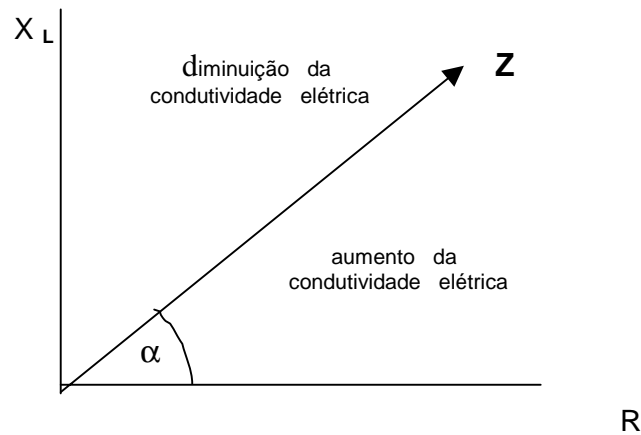


Figura 5. Gráfico da Impedância

A condutividade do material testado afeta significativamente a impedância. Defeitos como trincas ocasionam um decréscimo na condutividade e, se a bobina passa pelo defeito, isto pode ser detectado pela variação da fase e da amplitude do sinal resultante.

Quando a bobina passa por uma trinca, ocorre um desbalanceamento no campo magnético pois o ar que ocupa o lugar do material no local da trinca é um material paramagnético. A redução da condutividade elétrica provoca o deslocamento do vetor da impedância no sentido da redução da resistência e do aumento da reatância indutiva, correspondendo à passagem das linhas de fluxo pelo começo da trinca.

À medida que a sonda se desloca, as linhas de fluxo deixam de encontrar ar e passam a encontrar material com maior condutividade elétrica. Dessa forma, a resistência passa a aumentar devido à maior resistividade e a reatância indutiva passa a diminuir pois são geradas correntes parasitas tornando o campo secundário mais forte.

O trajeto percorrido pela extremidade do vetor impedância no plano complexo é fechado e chamado de pétala. A passagem de uma segunda bobina de uma mesma sonda forma uma pétala especular. A Figura 7 apresenta algumas pétalas. O código ASME, Seção XI, apresenta a metodologia de calibração para ensaios de correntes parasitas.

6. GERAÇÃO E AQUISIÇÃO DE SINAIS DE ENSAIOS DE EDDY-CURRENT

Neste trabalho foram gerados e adquiridos sinais com o objetivo de serem utilizados por um sistema de identificação e dimensionamento de defeitos, descrito no item 7.

Os sinais foram gerados pelo aparelho MIZ-40 da Zetec, convertidos em uma placa analógico/digital A/D National DAQ Card 700, interface PC MC IA e foram adquiridos através do programa Matlab (1997). Os sinais puderam ser visualizados da mesma forma como são apresentados na tela do aparelho MIZ-40, conforme apresentado nos Gráficos da Resistência e da Reatância dos Defeitos (Figura 6) e no Gráfico da Impedância dos Defeitos (Figura 7).

Foi utilizado um corpo de prova de aço inox 316 L, diâmetro 18,902 mm e espessura 1,703 mm, com 6 (seis) furos de 4 mm de diâmetro, profundidade variando desde 20 % da espessura até furo passante com incrementos de 20 % e 4 (quatro) furos passantes com mesmo diâmetro em uma posição axial posterior.

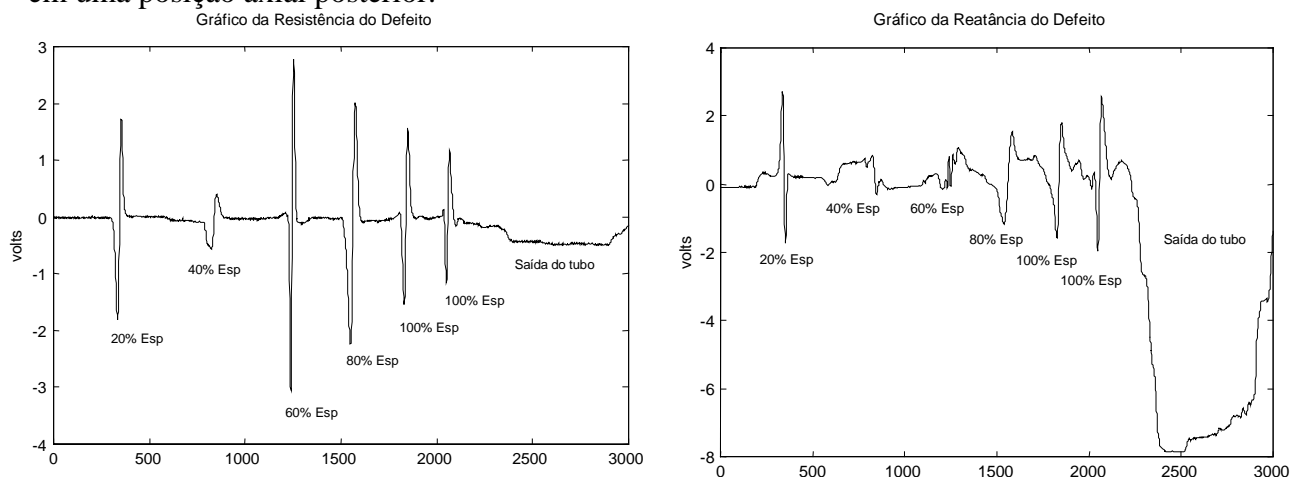


Figura 6. Gráficos da Resistência e da Reatância dos Defeitos

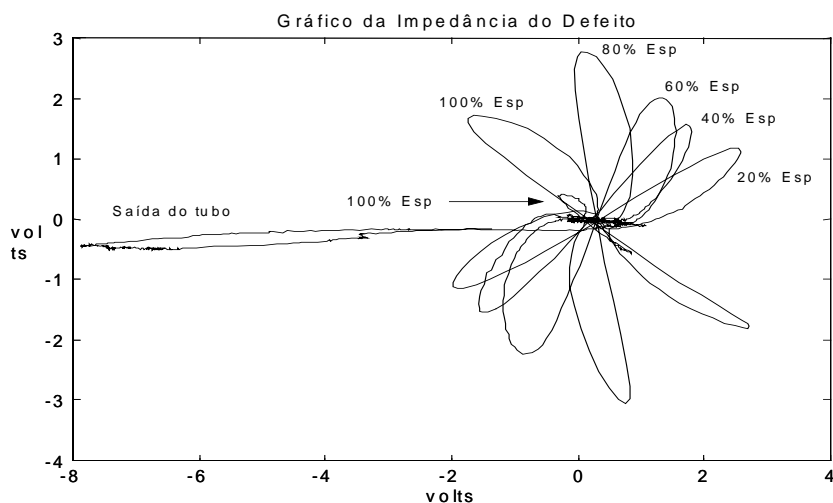


Figura 7. Gráfico da Impedância dos Defeitos

7. O SISTEMA ATUAL DE INTERPRETAÇÃO DE SINAIS, SUAS LIMITAÇÕES E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Atualmente, os inspetores de ensaios de *Eddy-Current* determinam a existência e as dimensões dos defeitos, interpretando as pétalas geradas em uma inspeção pela comparação dos ângulos de fase dessas pétalas com os ângulos de fase das pétalas padronizadas previamente geradas em procedimentos normalizados de calibração. O Código ASME, Seção V, Artigo 8, Apêndice I, descreve a metodologia de ensaio por correntes parasitas em tubos de geradores de vapor, bem como apresenta os procedimentos de calibração que devem ser realizados em tubos com o mesmo material, as mesmas dimensões, com defeitos calibrados e em determinadas frequências.

As comparações muitas vezes provocam dúvidas nos inspetores quanto à existência de defeitos e suas dimensões, o que leva frequentemente a tamponamentos desnecessários de tubos. Além disso, as conclusões das diagnoses muitas vezes são comprometidas quanto à

repetibilidade e à confiabilidade pois dependem unicamente do julgamento humano. É comum obter resultados diferentes para inspetores diferentes ou até mesmo resultados diferentes para um mesmo inspetor.

Possíveis soluções para o problema exposto são propostas por Yan *et al.* (1995 e 1996) e Upadhyaya *et al.* (1997 e 1999). Os autores propõem a utilização de um novo sistema de interpretação de sinais que reduzirá ou até mesmo substituirá diagnósticos subjetivos de inspetores para a identificação e o dimensionamento dos defeitos de tubos, cuja arquitetura é apresentada na Figura 8. O sistema utilizará Transformadas *Wavelet* para o processamento de sinais, bem como as técnicas associadas da Lógica *Fuzzy* e da Inteligência Artificial (Sistema *Fuzzy-Neural*) para a identificação e o dimensionamento dos principais defeitos de tubos.

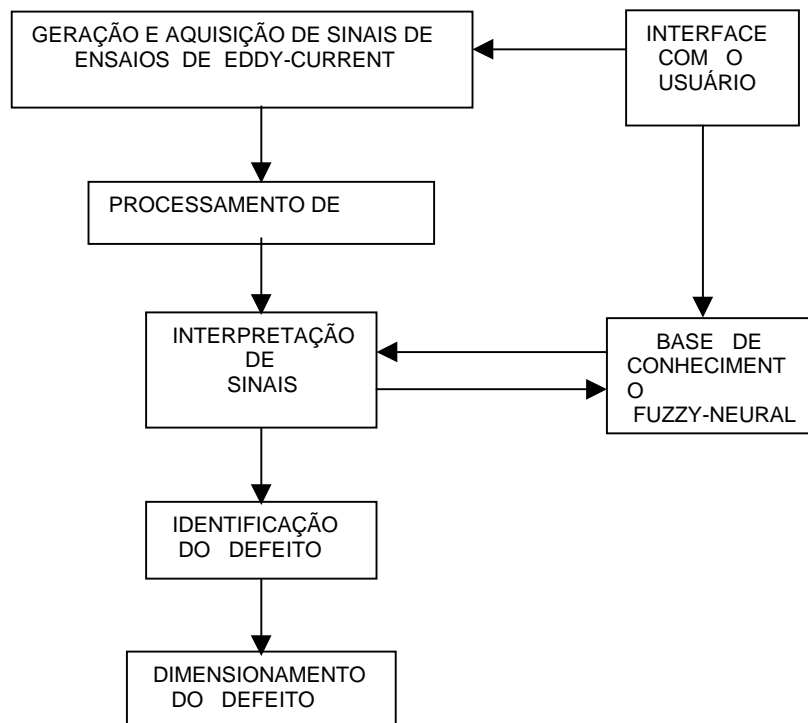


Figura 8. Arquitetura do novo sistema de interpretação de sinais

8. CONCLUSÕES

Conforme evidenciado nos primeiros itens deste trabalho, os geradores de vapor de centrais nucleares têm sido responsáveis por grandes perdas de tempo e dinheiro, ocasionadas por falhas nos feixes tubulares.

A inspeção por *Eddy-Current* é uma das formas mais utilizadas para localizar e dimensionar as falhas nos tubos. No entanto, este método de inspeção apresenta limitações quanto à interpretação visual de sinais pois é baseado apenas no julgamento humano.

Para solucionar este problema, é necessária a criação de um sistema automático de interpretação de sinais que é complexo e que vem sendo desenvolvido por diversos autores.

Neste trabalho são apresentados os resultados do desenvolvimento da primeira etapa desse sistema que é a geração e a aquisição de sinais de ensaios de *Eddy-Current* de uma forma apropriada.

9. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a participação da ABENDE (eng. José Roberto G. Miranda), da Brasitest (Sr. Claudio Dias Samuel), do IPEN (eng. Alfredo Alvim de Castro) e dos alunos Marcelo Araújo de Campos e Edison Yukio Kato Jr. do Programa de Iniciação Científica da FEL.

10. REFERÊNCIAS

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Seção V, Ensaios Não Destrutivos, “Exame de Produtos Tubulares por Correntes Parasitas”.

Bartonicek, J., Jonas, O. and Schoeckle, F., 1996, “Quantification of the Safety Status of PWR Generators, Conference on Steam Generators and Heat Exchangers”, Toronto, Canada.

Bouecke, R. and Flammann, T., 1996, “German Experience in Steam Generator Maintenance and Repair”, Siemens AG, Power Generation Group KWU, Additional Information to IAEA – International Training Course on Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR Type Reactors, Erlangen, Germany.

Carter, A. D. S., 1978, “Reliability Reviewed”, Proc. Inst. Mech. Engineers, vol 193, 81-92.

Erbay, A. S., Upadhyaya, B. R., 1997, “A Personal Computer-Based On-Line Signal Validation System for Nuclear Power Plants”, Nuclear Technology, Vol. 119, 63-75.

Jones, R. H., Ricker, R. E., 1998, “Stress-Corrosion Cracking” ASM Handbook, 145-162.

Matlab – Versão do Estudante (4), The Math Works Inc., Makron Books, 1997.

Odar, S., Bouecke, R., 1996, “Strategies for Steam Generator Design, Operation and Lifetime Extension”, Siemens AG, KWU, Additional Information to IAEA – Interregional Training Course on Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR, Erlangen, Germany.

Rozenfeld, I. L., 1981, “Corrosion Inhibitors”, Mc Graw-Hill International Book Company, pg. 5-85.

Stegemann, D., 1986 “Avanços Tecnológicos em END por Correntes Parasitas”, Revista dos END, pg. 23-29.

Stegemann, D., Reimche, W., Feiste, K. L., Heutling, B., 1997, “Characterization of Materials Behavior by Electromagnetic Nondestructive Testing”, Anais do MARCON 97, Knoxville, Tennessee, 87.01 – 87. 09.

Upadhyaya, B. R., Hooper, W., Yan, W., Behraves, M. M., Henry, G., 1997, “Advances in Information Processing in Eddy Current Diagnostics of Steam Generator Tubing”, Anais do MARCON 97, Knoxville, Tennessee, 85.01 – 85.13.

Upadhyaya, B. R., Erbay, A. S., Házi, G., Sung, K. Y., 1999, “Eddy-Current Test Data Analysis for Steam Generator Tubing Diagnosis Using Artificial Intelligence Methods”, Annual Report, Nuclear Engineering Department, The University of Tennessee, prepared for EPRI.

Whyatt, P., Horrocks, P. and Mills, L., 1995, “Steam Generator Reliability - Implications for APWR Codes and Standards”. Nuclear Energy, N. 34, 4 Aug., 217-228.

Yan, W., Upadhyaya, B. R., Behraves, M. M., Henry, G., 1995, “Artificial Intelligence-Based Decision Methods for Diagnostics of Steam Generator Tubing”, Proceedings of the 9th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, 70.01 – 70.11.

Yan, W., Upadhyaya, B. R., 1996, “An Integrated Signal Processing and Neural Networks System for Steam Generator Tubing Diagnostics Using Eddy Current Inspection”, Ann. Nucl. Energy Vol. 23, N^o 10, pp. 813-825.