

PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADOS AOS ENSAIOS ULTRASSÔNICOS

**Igor RIBEIRO (1); Cláudia FARIAS (2); Eduardo SIMAS FILHO (3); Yure SOUZA (4);
Elmo BORGES JUNIOR (5); Diego LOPES (6)**

(1) IFBA, Rua Emídio dos Santos, s/n, (71) 2102-9423, e-mail: igorsr@ifba.edu.br; (2) IFBA, e-mail: cfarias@ifba.edu.br; (3) IFBA, e-mail: esimas@ifba.edu.br; (4) IFBA, e-mail: yure_ns@hotmail.com; (5) IFBA, e-mail: elmo.alberto@ifba.edu.br; (6) IFBA, e-mail: diegobastos@ifba.edu.br

RESUMO

O ensaio ultrassônico tem sido utilizado nos mais distintos ramos industriais, em virtude de suas características intrínsecas, como: robustez, inércia aos materiais inspecionados, propagação em meios sólidos, líquidos e gasosos e por ser um método não destrutivo, com possibilidade de ser não invasivo. Este trabalho propõe realizar estudo de técnicas de processamento digital de sinais e inteligência computacional aplicadas aos ensaios ultrassônicos para determinação de parâmetros de processo, inspeção não destrutiva e caracterização de materiais. São abordadas metodologias empregadas na obtenção dos resultados, os tipos e características dos ruídos existentes, além de explorar conceitos matemáticos e físicos acerca da Transformada de Fourier, Transformada Wavelet e redes neurais artificiais aplicadas às técnicas de processamento e automatização.

Palavras-chave: ensaio ultrassônico, processamento digital de sinais, inteligência computacional

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, os ensaios não destrutivos (END) tem sido um campo de amplo crescimento científico, em virtude das crescentes exigências do mercado mundial quanto à eficiência, rentabilidade da produção, qualidade e segurança dos produtos/equipamentos. A aplicação industrial dos END é vasta, incluindo a indústria aeroespacial, nuclear e de petróleo. Diversas técnicas são empregadas, no entanto, os métodos ultrassônicos são bastante atrativos, devido à capacidade, flexibilidade e relação custo-eficácia (CHEN, 2007).

No acompanhamento e diagnóstico do controle de qualidade, parâmetros obtidos a partir dos sinais ultrassônicos como velocidade e atenuação normalmente são utilizados para caracterizar o processo. Já no monitoramento da integridade de estruturas e equipamentos, podem ser obtidas informações de espessura de parede, detecção e dimensionamento de falhas.

No ensaio ultrassônico, um dos principais fatores que afetam significativamente a confiabilidade e precisão dos resultados é o ruído encontrado durante a inspeção (HAUPTMANN, 2002; CHEN, 2002; CHEN, 2007; BETTAYEB, 2008). Desta forma, técnicas de processamento digital de sinais e inteligência computacional são empregadas para extrair informações dos sinais e apresentar resultados mais intuitivos aos operadores do sistema.

Neste trabalho, é feito estudo de técnicas de processamento digital de sinais e inteligência computacional aplicadas aos ensaios ultrassônicos, utilizando como base conceitos matemáticos e físicos para abordar as metodologias aplicadas no processamento e automatização.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ensaio Ultrassônico

Segundo Chen (1999), sistemas ultrassônicos digitais são constituídos basicamente por: gerador de pulso, transdutor emissor, objeto de teste, transdutor receptor, circuito amplificador, conversor analógico-digital e

unidade de processamento de sinais. O transdutor emissor recebe um pulso elétrico, transformando-o em pulso mecânico de alta frequência. Após interação com o meio, o receptor capta as vibrações de baixa amplitude, convertendo-as novamente em sinal de tensão, que é amplificado e digitalizado. A Fig. 1 ilustra este processo.

Dentre os modos mais comuns de configuração do ensaio ultrassônico, destacam-se: pulso-eco, transmissão-recepção e transmissão-reflexão, sendo utilizado a depender dos parâmetros da inspeção e dos resultados a serem obtidos. A recepção do sinal de resposta é feita pelo mesmo transdutor (modo pulso-eco) ou por um sensor diferente (modos transmissão-recepção e transmissão-reflexão).

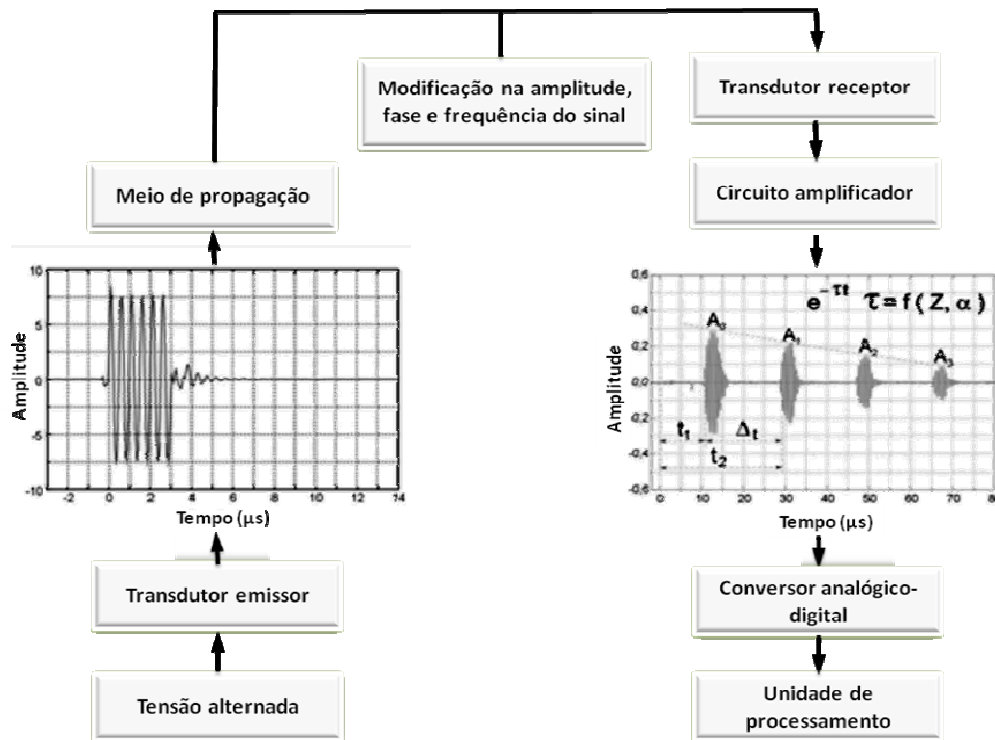


Figura 1 - Diagrama esquemático de sistema ultrassônico digital

A interação das ondas ultrassônicas com o meio em que se propaga possibilita a determinação de propriedades como velocidade de propagação, coeficiente de atenuação e densidade, a partir da variação dos parâmetros de amplitude, frequência e fase do sinal (MARTINHON, 2007).

2.1.1 Monitoramento Não Invasivo de Processos Industriais

Tendo em vista a garantia da qualidade dos produtos de acordo com padrões específicos, é necessário monitorar continuamente parâmetros de processos industriais como: pressão, temperatura, nível, fluxo e concentração. Normalmente, os requisitos para a medição envolvem método não invasivo e alta precisão, confiabilidade, reprodutibilidade, além de condições específicas para cada aplicação (robustez, alta resistência à corrosão etc.).

Os sensores de ultrassom têm contribuído para o desenvolvimento de sistemas de medição *in line* (em linha) de baixo consumo de potência, rápida resposta e capazes de atender a tais requisitos. No entanto, os sinais ultrassônicos tendem a apresentar análise complexa, principalmente quando provenientes do ensaio em meios heterogêneos e/ou anisotrópicos, demandando, desta forma, técnicas de processamento de sinais mais avançadas. Em contrapartida, o avanço da eletrônica possibilita a utilização de processadores digitais de sinais (DSP) que permitem a aplicação de métodos como transformações e correlações aos dados adquiridos.

A extração de cada parâmetro de processo requer transdutores e configuração específicos. Em todos os casos, amplitude, frequência e fase são modificadas na interação das ondas sônicas com o meio. No entanto, os

sinais adquiridos apresentam correlação com muitos parâmetros simultaneamente, devendo ser processados através de algoritmos dedicados para extração de características individuais (CHEN, 1999; HAUPTMANN, 2002, HENNING, 2006).

De acordo com Hauptmann (2002), a medição de fluxo é feita comumente pela técnica de transmissão-recepção ou transmissão-reflexão, através de dois princípios: tempo de trânsito e efeito Doppler, respectivamente. No primeiro, o transdutor 1 é alinhado ao transdutor 2, como apresentado na Fig. 2 (a), sendo calculados os tempos de percurso do ultrassom quando em condição favorável (t_{down}) e contra o fluxo (t_{up}), que podem ter precisão da ordem de picossegundos. A velocidade do fluido (v) é dependente do perfil de escoamento e pode então ser estimada a partir destes tempos, do espaço percorrido pelo som (x) e do ângulo formado entre o eixo de alinhamento dos transdutores e o eixo longitudinal do tubo de medição (α). Pelo efeito Doppler, a medição de fluxo é baseada no deslocamento de frequência do sinal refletido pelas partículas do fluido em movimento, conforme mostrado na Fig. 2 (b).

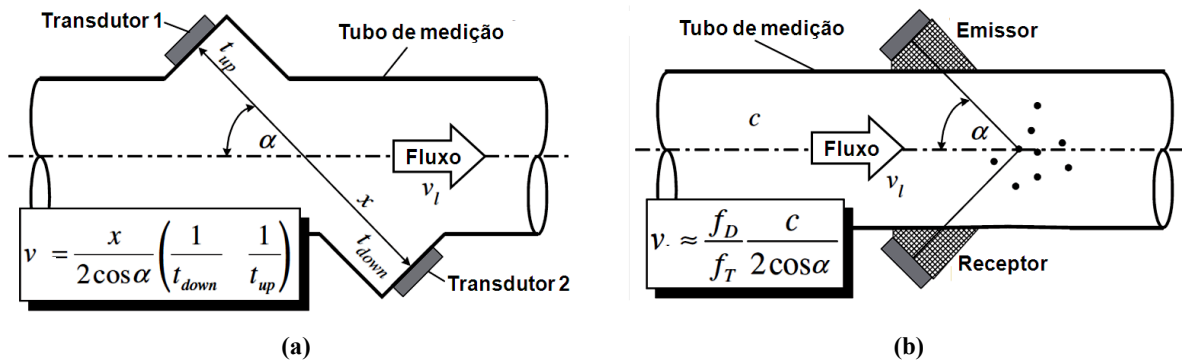


Figura 2 - Princípios de medição ultrassônica de fluxo baseados em: (a) tempo de trânsito; (b) efeito Doppler (HAUPTMANN, 2002)

A medição de nível e de distância, que normalmente é utilizada para anticollisão (monitoramento da distância entre objetos próximos, com fins de não colidirem) e no posicionamento de peças de trabalho, pode ser implementada a partir da obtenção do tempo de percurso do ultrassom, sendo que apresentam análise mais complexa quando existem múltiplos ecos relativos a diferentes objetos refletoras.

2.1.2 Inspeção Não Destrutiva e Caracterização de Materiais

Ensaio não destrutivo são empregados em testes de materiais e equipamentos, com o objetivo de identificar condições que possam influenciar sua integridade estrutural (HELLIER, 2001). Sendo uma das técnicas mais comumente utilizadas, o ensaio ultrassônico é empregado no controle de qualidade da manufatura, monitoramento da degradação e predição da vida residual de componentes, equipamentos e estruturas.

O ensaio ultrassônico é capaz de identificar descontinuidades como trincas e perda de espessura, além de modificações microestruturais comumente produzidas pelo processo de soldagem, que leva ao surgimento de tensões residuais, induzindo o aparecimento de falhas (SCHVARTZMAN, 2009). A configuração do ensaio varia a depender do tipo de falha que se quer monitorar e do material a ser inspecionado, podendo ser empregadas técnicas de avaliação de amplitude, fase ou frequência, ou ainda, aplicar algoritmos de processamento para obtenção de parâmetros específicos.

2.2 Técnicas de Processamento Digital de Sinais Ultrassônicos

Os sinais ultrassônicos carregam informações tanto do sistema de geração do pulso quanto do meio de propagação. Assim sendo, os ruídos encontrados durante a inspeção podem prejudicar a confiabilidade e a precisão do ensaio, e que são classificados em acústicos e não-acústicos. Os primeiros surgem da interação do ultrassom com o meio, matematicamente representado pelo somatório de sinais gerados pela distribuição de espalhadores ao longo do material, dando origem a um sinal com características de ruído, denominado sinal retroespalhado. Já os ruídos não-acústicos são relativos ao circuito eletrônico e à digitalização, sendo normalmente classificados como ruído branco. Considerando que diferentes medições são não-correlacionadas, a média entre sinais consegue reduzi-los (KRÜGER, 1996; CHEN, 1999).

Por conta da baixa relação sinal-ruído e da imprecisão da avaliação de sinais temporais obtidos na varredura de determinados materiais, as técnicas ultrassônicas convencionais tendem a ser acrescidas da aplicação de técnicas de processamento digital de sinais. Desta forma, os resultados encontrados podem ser mais representativos e apresentar maior precisão. Além disso, a obtenção de determinadas características, como constantes elásticas e tensões residuais, exigem valores de velocidade bastante exatos, geralmente conseguidos por meio de algoritmos de processamento mais avançados (BITTENCOURT, 2003).

2.2.1 Transformada Discreta de Fourier (DTFT)

A Transformada de Fourier é uma técnica extensamente utilizada para análise e projeto de sistemas e em aplicações de processamento de sinais. A obtenção do espectro de frequência consiste na decomposição do sinal em senóides constituintes de diferentes frequências, podendo ser avaliado em relação tanto a magnitude quanto a fase (PAGODINAS, 2002).

A Eq. 1 representa a Transformada Discreta de Fourier, DTFT (*Discrete-time Fourier Transform*), e a Eq. 2 mostra a sua inversa IDTFT (*Inverse Discrete-time Fourier Transform*) (SHENOI, 2006).

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad [\text{Eq. 2}]$$

A FFT (*Fast Fourier Transform*) é um algoritmo numérico que se mostra computacionalmente eficiente para encontrar a resposta em frequência DTFT de sinais discretos no tempo. Aplicada aos sinais ultrassônicos, a análise espectral é capaz de descrever o conteúdo de frequência de ecos, ecogramas ou do sinal retroespalhado durante a propagação. O janelamento do sinal para obtenção do espectro se justifica pelo fato de que os componentes de frequência variam ao longo da propagação do som, em virtude das distintas interações entre o ultrassom e o meio (KRÜGER, 1996; BETTAYEB, 2004).

A utilização da Transformada Janelada de Fourier (STFT, *Short Time Fourier Transform*) vem a ser uma alternativa para analisar a ocorrência temporal de diferentes frequências. Neste caso, existe a divisão do domínio tempo-frequência em intervalos regulares e constantes. Portanto, a análise das altas e baixas frequências acontece com a mesma resolução (PAGODINAS, 2002). Muitos sinais, no entanto, exigem uma abordagem mais flexível em que se possa variar o tamanho da janela de tempo-frequência.

2.2.2 Análise e Transformada Discreta Wavelet

A análise através de wavelets consiste em decompor sinais em formas de onda limitadas no tempo e de rápido decaimento, conhecidas como wavelets mãe, capazes de representar mais facilmente um pulso irregular do que com o uso de senóides puras. Desta forma, podem ser obtidos recursos úteis para caracterizar sinais quanto ao tempo, espaço ou no domínio da frequência, de modo menos sensível ao ruído que com a aplicação da Transformada de Fourier.

A correlação do sinal analisado com versões transladadas e dilatadas ou comprimidas da wavelet mãe pode ser obtida com o emprego da Transformada Wavelet, que fornece medidas quantitativas da aparência local do sinal em escalas distintas. Atuando de forma semelhante a um banco de filtros, a Transformada Discreta Wavelet decompõe um sinal em coeficientes de aproximação e detalhes, mantendo a quantidade de amostras, através de um processo denominado sub-amostragem, em contraposição à filtragem digital convencional. Os Coeficientes Wavelet de Aproximação (WACs, *Wavelet Approximation Coefficient*) representam a dinâmica global ou o conteúdo de baixa frequência de um sinal temporal $f(t)$. Por outro lado, as oscilações locais ou o conteúdo de alta frequência são descritos nos Coeficientes Wavelet de Detalhes (WDCs, *Wavelet Details Coefficient*). A capacidade de reconstrução de um filtro wavelet depende da escolha da função wavelet (MISITI, 2002; PAGODINAS, 2002; CHEN, 2007; BETTAYEB, 2008).

O processo de decomposição apresenta sucessivas aproximações e detalhes sendo decompostas em aproximações e detalhes (árvore de decomposição da Análise Wavelet Hierárquica), conforme ilustrado na Fig. 3, ou com decomposição iterativa apenas das aproximações (Transformada Discreta Wavelet). O número de níveis da decomposição é definido baseado na natureza do sinal (PAGODINAS, 2002). Segundo

Siqueira (2004), a Transformada Wavelet discreta pode ser considerada como uma sub-classe da Análise Wavelet Hierárquica, que é uma ferramenta mais ampla e versátil (SANTOS, 2006). As saídas dos filtros (passa-baixa e passa-alta) da Análise Wavelet podem ser representadas matematicamente pelas Eq. 3 e 4.

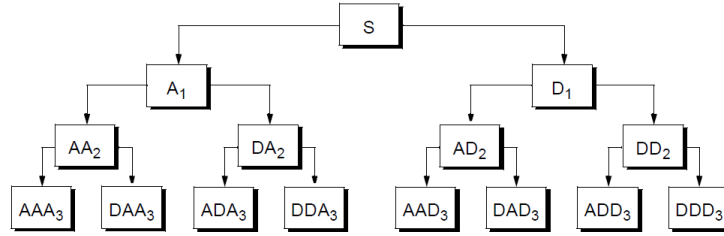


Figura 3 - Árvore de decomposição hierárquica wavelet (MISITI, 2002)

$$y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[2n-k] \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[2n+1-k] \quad [\text{Eq. 4}]$$

Onde: g e h são as respostas ao impulso dos filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

A Transformada Wavelet pode ser aplicada na detecção de sinais de baixa energia, em contraposição à Transformada de Fourier, cuja eficiência é proporcional à relação sinal-ruído. As modificações no espectro de Fourier não são facilmente detectadas para fenômenos que apresentam descontinuidades, curta duração, baixa energia, entre outros. As wavelets podem ainda ser utilizadas para remoção de ruídos, a partir da eliminação de detalhes cujas amplitudes são inferiores a determinado limiar (SIQUEIRA, 2004; SANTOS, 2006).

2.3 Técnicas de Inteligência Computacional Aplicadas aos Sinais Ultrassônicos

A complexidade dos sinais ultrassônicos requer qualificação na análise, principalmente quando se trata de ensaios manuais, onde muitas variáveis de operacionalidade influenciam nos resultados. Características como forma, amplitude e posição temporal do eco são combinadas pelo operador, de forma a diagnosticar um problema ou estimar parâmetros. Empregadas no ensaio não destrutivo ultrassônico, técnicas de inteligência computacional (IC) podem otimizar o mapeamento de grandezas físicas e classificar padrões na varredura quanto a parâmetros predefinidos. Além disso, a dificuldade de interpretação em casos específicos, como a inspeção de materiais muito atenuantes, motiva o uso da IC. Tais técnicas tendem a aumentar o grau de detecção e interpretação de defeitos, tornando mais confiáveis os resultados obtidos da análise dos sinais ultrassônicos.

A extração de parâmetros relevantes à análise dos sinais, juntamente com o projeto de redes neurais artificiais (RNA) para reconhecimento de padrões em descontinuidades, tem sido uma estratégia útil na avaliação automática da integridade estrutural. O potencial das redes quando aplicados ao processamento de sinais está associado a algumas características das RNAs, especialmente a não linearidade inerente às redes, a organização estrutural dos neurônios artificiais, além da habilidade de aprender através de informações extraídas do meio (MASNATA, 1995; CHEN, 2007).

O desenvolvimento de uma RNA se inicia com a etapa de aprendizagem da rede, que exige a aplicação de um vetor de treinamento na entrada da rede, sendo processado por unidades básicas de processamento, em diferentes camadas. Cada nó de processamento fornece uma saída através da função de ativação e do *bias* adicionado a cada valor de entrada multiplicado por um peso. A entrada total de cada neurônio, exceto na camada de entrada, é resultado da soma de todos os valores de saída das camadas anteriores, multiplicados pelos seus respectivos pesos, de acordo com a Eq. 4 (HU, 2002).

$$net_j^k = \sum_{i=1}^m w_{ji}^k \cdot \theta_i^{k-1} \quad [\text{Eq. 4}]$$

O erro entre o valor atual da saída e o valor desejado é minimizado através do retro-propagação e reconfiguração dos neurônios e matrizes de pesos, até que o algoritmo convirja para um erro menor (BETTAYEB, 2004).

3. METODOLOGIA

A aplicação de técnicas de processamento digital de sinais e inteligência computacional ao ensaio ultrassônico têm sido comum a diversos autores, citados nesta seção.

3.1. Eliminação de ruído

A eliminação de ruídos presentes nos sinais ultrassônicos e que podem acabar por mascarar informações relevantes aos resultados obtidos a partir do ensaio tem sido objetivo de trabalhos científicos e algumas técnicas já são aplicadas em situações reais na indústria. Ribeiro (2009) desenvolveu um filtro FIR passa-banda de 20ª ordem, a partir da análise da Transformada Discreta de Fourier dos ecos de interesse. Implementado através do método clássico de janelamento Hamming, com frequências de corte de 3.27 e 6.37 MHz, e aplicado a sinais ultrassônicos, conseguiu aumentar a relação sinal-ruído, maximizando a eficiência quanto aos resultados de algoritmo para determinação automática da espessura remanescente de corpos de prova.

Pipa (2008) aplicou a Transformada Wavelet na filtragem de sinais ultrassônicos reais e com ruídos sintéticos. Como resultado, foram encontradas as wavelets que melhor representaram o sinal de interesse. Em Siqueira (2004), a análise Wavelet aplicada a sinais de ondas guiadas, obtidos em modo pulso-eco em tubo de aço carbono, permitiu o aumento da relação sinal-ruído de aproximadamente 12 dB.

3.2. Aumento da precisão de resultados

A Transformada de Fourier e a Transformada de Wavelet significativamente têm o potencial de aumentar a precisão dos resultados do ensaio não destrutivo ultrassônico, visto que permitem realizar avaliação não convencional dos sinais adquiridos.

A análise espectral ultrassônica pode ser utilizada para diversos fins na avaliação não destrutiva. A fim de medir propriedades reológicas na linha, em tempo real, Wiklund (2007) empregou técnica ultrassônica, utilizando metodologias baseadas no domínio do tempo e em FFT. O perfil de velocidade foi calculado no domínio do tempo por algoritmo em um processador digital de sinais (DSP), enquanto que os deslocamentos médios de frequência Doppler em cada ponto radial foram usados para calcular as velocidades na direção do fluxo, a partir da equação mostrada na Fig. 2 (b).

Oliveira (2010) analisou sinais de ultrassom, obtidos em corpos de prova de aço inoxidável austenítico AISI 316L tratados termicamente, no domínio temporal e espectral, de forma a encontrar parâmetros capazes de correlacioná-los à microestrutura. A análise no domínio do tempo, com média e variância das amplitudes, apresentou distinção satisfatória entre as microestruturas apenas com sinais de eco de fundo adquiridos a partir de transdutor de ondas longitudinais. No espectro, observou-se mudança para os sinais retroespalhado e de eco de fundo obtidos com transdutor de ondas transversais.

Como etapa de pré-processamento para teste de classificador linear, Borges Junior (2010) utilizou a Transformada Discreta Wavelet multinível em cinco estágios nos sinais obtidos em modo pulso eco em chapas de compósito laminado de alumínio e epóxi reforçado por fibra de carbono. Verificou-se que o momento de terceira ordem da diferença entre os coeficientes, tendo como base o sinal sem defeito, é uma característica discriminante entre a região sem defeito, com delaminação e com fratura de fibra.

Farias (2006) utilizou a avaliação no domínio da frequência visando otimizar o uso da técnica de inspeção por ondas de Lamb. Foram determinadas as frequência central via FFT e comparados os espectros de fase e frequência em regiões com e sem defeito, a fim de correlacioná-los com a presença das descontinuidades.

3.3. Classificação de padrões

Com fins de realizar classificação automática através de uma rede neural artificial utilizando algoritmo de treinamento *backpropagation*, Bettayeb (2004) aplicou a Transformada Wavelet em sinais ultrassônicos obtidos por meio de sistema automatizado em corpos de prova em aço, com defeitos planos e volumétricos. A utilização da função sigmóide e da função de erro médio quadrático como processo de minimização da função objetivo, permitiram alcançar uma taxa de reconhecimento médio de 97.5%.

Lopes (2009) implementou uma rede neural tipo *backpropagation* para classificação de defeitos em corpo de prova em aço SAE 1020 do tipo perda de espessura e furos transversais. A rede foi alimentada com sinais ultrassônicos obtidos por varredura manual, por contato, em configuração pulso eco. Os resultados obtidos para duas classes de defeitos foram satisfatórios, tendo a rede apresentado um percentual de acerto de 85% defeito do tipo perda de espessura e 60% para a detecção de furo.

Lopes (2010) utilizou RNA para classificar sinais ultrassônicos provenientes de regiões sem defeito, com delaminação e com fratura de fibras, em corpos de prova de compósitos laminados de alumínio e epóxi reforçado por fibra de vidro. Durante a etapa de pré-processamento, foram obtidos os espectros dos sinais, janelados no intervalo de 0 a 10 MHz, que alimentaram a rede. Os resultados mostram acerto médio de 80%.

O mesmo autor empregou RNA para detectar semi-automaticamente pites de corrosão em aço inoxidável AISI 304. Utilizando transdutor com feixe focalizado, se conseguiu acerto de 95,54% para detecção de pites e 87,10% para regiões sem defeito (LOPES, 2010).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A varredura em determinados materiais pode impor limitações aos métodos não destrutivos ultrassônicos convencionais, por introduzirem ruídos aos sinais ou devido à pouca sensibilidade da análise temporal nestes casos. Somando-se a isto, a necessidade de alta precisão nos resultados da inspeção e na obtenção de parâmetros de processos industriais vem contribuindo para o desenvolvimento e emprego de técnicas de processamento digital de sinais cada vez mais avançadas.

Este trabalho propôs abordar as principais técnicas de PSD e IC aplicadas na inspeção, caracterização e no monitoramento não invasivo de processos, através de técnicas ultrassônicas, explorando as metodologias aplicadas. Nota-se que as técnicas empregadas possibilitaram melhorias significativas dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- BETTAYEB, F., HACIANE, S., AOUDIA, S., **Improving the Time Resolution and Signal Noise Ratio of Ultrasonic Testing of Welds by the Wavelet Packet**. NDT&E International, n. 38, p. 478-484, 2005;
- BETTAYEB, F., RACHEDI, T., BENBARTAOUI, H., **An Improved Automated Ultrasonic NDE System by Wavelet and Neuron Networks**. Ultrasonics, n. 42, p. 853-858, 2004;
- BITTENCOURT, M. S. Q., PINHEIRO, M. A. A., LAMY, C. A., PAYÃO FILHO, J. C., **Medida do Tempo de Percurso de Onda Ultra-Sônica para Avaliação de Tensões**. PANNDT, Rio de Janeiro, 9 p., junho, 2003;
- BORGES JUNIOR, E. A. T., RIBEIRO, I. S., SIMAS FILHO, E. F., FARIAS, C. T. T., SILVA, L. A. S., OLIVEIRA, T. A. S., **Avaliação Não Destrutiva da Integridade Estrutural de Chapas de Compósito Laminado de Alumínio e Epóxi Reforçado por Fibra de Carbono com Auxílio de Técnicas de Processamento Digital de Sinais Ultrassônicos**. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 12p., agosto, 2010, Campina Grande-PB (a ser apresentado);
- CHEN, C. H., **Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization**. World Scientific, 2007;
- CHEN, J., SHI, Y., SHI, S., **Noise analysis of digital ultrasonic nondestructive evaluation system**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, n. 76, p. 619-630, 1999;
- FARIAS, C. T., **Utilização das ondas ultra-sônicas de Lamb na inspeção de materiais compósitos laminados fibra-metal**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006;
- HAUPTMANN, P., HOPPE, N., PÜTTMER, A., **Application of Ultrasonic Sensors in the Process Industry**. Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, n. 13, p. 73-83, 2002;
- HELIER, C. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. McGraw-Hill Professional, 2001. 603 p.;
- HENNING, B., RAUTENBERG, J. **Process Monitoring Using Ultrasonic Sensors Systems**. Ultrasonics, n. 44, p.1395-1399, 2006;
- HU, Y. H.; HWANG, J. N., **Handbook of Neural Network Signal Processing**. CRC Press, 2002;

KRÜGER, S. E., **Análise Espectral de Ecos e Sinal Retroespalhado Ultra-sônicos Aplicada a Detecção de Danos por Hidrogênio em Aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996;

KUNDU, T., **Advanced Ultrasonic Methods for Material and Structure Inspection**. CRC Press, 2007;

LOPES, D. B. P., FARIAS, C. T. T., SILVA, I. C., SILVA, J. C. B., **Utilização de Redes Neurais Artificiais na Classificação de Padrões de Sinais Ultrassônicos**. In: IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 10 p., dezembro, 2009, Belém-PA;

LOPES, D. B. P., SIMAS FILHO, E. F., FARIAS, C. T. T., SILVA, J. C. B., OLIVEIRA, M. A., RIBEIRO, I. S., LOPES, J. L. S., SANTOS, Y. T. B., **Uso de Rede Neural Artificial Aplicada à Classificação Automática de Descontinuidades em Chapas de Compósito Laminado de Alumínio e Epóxi Reforçado por Fibra de Vidro**. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10 p., agosto, 2010, Campina Grande-PB (a ser apresentado);

LOPES, D. B. P., FARIAS, C. T. T., SIMAS FILHO, E. F., SILVA, J. C. B., SILVA, I. C., SILVA, L. A. S., LOPES, J. L. S., **Utilização de Redes Neurais Artificiais como Ferramenta de Auxílio na Detecção e Dimensionamento de Pites de Corrosão em Aços Inoxidáveis 304**. In: XVIII Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, 11 p., junho, 2010, Santos-SP;

MARTINHON, G. **Avaliação e Implementação de Métodos de Estimação de Tempo de Atraso de Sinais de Ultra-som**. 2007. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007;

MASNATA, A., SUNSERI, M. **Neural Network Classification of Flaws Detected by Ultrasonic Means**. NDT&E International, vol. 29, n. 2, p. 87-93, 1996;

MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, J., **Wavelet Toolbox for Use with MATLAB®. User's Guide**, version 2, The MathWorks, 2002;

OLIVEIRA, M. A., FARIAS, C. T. T., SANTOS, Y. T. B., OLIVEIRA, T. A. S., RIBEIRO, I. S., SOBRAL, M. D. C., BARRA, S. R., **Estudo do Conteúdo Espectral e Perfil do Feixe Ultrassônico em Aço Inoxidável 316L Submetido a Diferentes Ciclos Isotérmicos**. In: XVIII Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, 14 p., junho, 2010, Santos-SP;

PAGODINAS, D., BARSAUSKAS, K., **Ultrasonic Signal Processing Methods for Detection of Defects in Composite Materials**, Ultragarsas, n. 4, p. 47-54, 2002;

PEREZ, G. B. **Detecção de micro-danos induzidos por hidrogênio através da análise espectral ultra-sônica**. 1998. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1998;

PIPA, D. R., **Denoising de Sinais de Ultra-Som Utilizando Wavelets**. XXVI CONAEND&IEV, 14 p., junho, 2008, São Paulo;

RIBEIRO, I. S., FARIAS, C. T. T., SANTOS, Y. T. B., SILVA, L. A. S., LOPES, J. L. S., **Ensaio Não Destrutivo Ultrassônico por Imersão em Trecho de Duto Utilizando Filtragem Digital**. In: IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 9 p., dezembro, 2009, Belém-PA;

SANTOS, G. R., **Desenvolvimento de Técnicas de Ultra-som para Medida de Espessura de Filme de Líquido em Escoamentos Gás-Líquido e Líquido-Líquido**. 2006. 227p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006;

SCHVARTZMAN, M. M. A. M., QUINAN, M. A. D., CAMPOS, W. R. C., LIMA, L. I. L., **Avaliação da suscetibilidade à corrosão sob tensão da ZAC do aço inoxidável AISI 316L em ambiente de reator nuclear PWR**. Soldagem & Inspeção, vol.14, n.3, pp. 228-237. São Paulo, 2009;

SHENOI, B. A., **Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design**. Wiley-Interscience, 2006;

SIQUEIRA, M. H. S., GATTS, C. E. N., SILVA, R. R., REBELLO, J. M. A., **The Use of Ultrasonic Guided Waves and Wavelets Analysis in Pipe Inspection**. Ultrasonics, n. 41, p. 785-797, 2004;

WIKLUND, J., SHAHRAM, I., STADING, M., **Methodology for in-line rheology by ultrasound Doppler velocity profiling and pressure difference techniques**. Chemical Engineering Science, n. 62, p. 4277-4293, 2007.