

## DETECÇÃO DE INCLUSÕES UTILIZANDO TRANSFORMADA DE HILBERT VISANDO A APLICAÇÃO EM TUMORES MAMÁRIOS

Pedro Henrique Franco Serrano Vieira, [pedrofrancovieira@gmail.com](mailto:pedrofrancovieira@gmail.com)<sup>1</sup>

Gabriela Lima Menegaz, [gabriela.menegaz@gmail.com](mailto:gabriela.menegaz@gmail.com)<sup>1</sup>

Gilmar Guimarães, [gguimagilmar@gmail.com](mailto:gguimagilmar@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121 – Bloco 1M – CEP 38400-902, Uberlândia-MG,

**Resumo.** O câncer de mama é um grande problema de saúde pública no Brasil, sendo o tipo de neoplasia que mais atinge as mulheres e também a que apresenta os maiores índices de mortalidade. Visto isso, diversos métodos de detecção foram desenvolvidos nos últimos tempos. As propostas possuem as suas vantagens, mas os benefícios existentes não excluem a necessidade de novos estudos a respeito. Com base nessa conjuntura, a proposta desta pesquisa é contribuir com o desenvolvimento de uma nova técnica que contribua com diagnósticos mais assertivos. A metodologia consiste na aplicação da transformada de Hilbert em sinais de impedância eletromecânica e térmica, a fim de se detectar inclusões esféricas adicionadas a um modelo de silicone. Os resultados alcançados até então ficaram próximos aos já encontrados em trabalhos anteriores que não utilizaram Hilbert. Esse fato contribui com a continuidade do trabalho, fazendo crer que essa abordagem de análise de sinais pode contribuir para o futuro do diagnóstico oncológico.

**Palavras chave:** Detecção, Impedância Eletromecânica, Impedância Térmica e Transformada de Hilbert

**Abstract.** Breast cancer is a major public health problem in Brazil, being the type of neoplasia that most affects women and also the one with the highest mortality rates. Therefore, several research methods have been developed recently. The proposals have their advantages, but the existing disadvantages do not exclude the need for new studies on the subject. Based on this situation, the proposal of this research is to contribute to the development of a new technique that aims at contributing to diagnoses that are more assertive. The methodology consists in applying Hilbert's transform in electromechanical and thermal impedance signals in order to detect spherical inclusions added to a silicone model. The results achieved so far were close to those already found in previous works that did not use Hilbert. This fact contributes to the continuity of the work, making this signal analysis approach the possible path for the future of oncologic diagnosis.

**Keywords:** Detection, Electromechanical Impedance, Thermal Impedance and Hilbert's Transform

### 1. INTRODUÇÃO

Etimologicamente, a palavra câncer vem do latim *cancer* e significa caranguejo. O nome foi associado à doença devido ao fato de Hipócrates (400 a.C) nomear o câncer KARKINOS, cuja morfologia tumoral que possuía vasos inchados ao redor lembrou-lhe um caranguejo enterrado na areia. Embora curiosa essa nomeação, tal doença é um grande problema para a saúde pública mundial, sobretudo em países onde o desenvolvimento ainda está se consolidando.

No Brasil, o Instituto Nacional de Câncer (INCA) é o órgão que auxilia o Ministério da Saúde no desenvolvimento e coordenação de ações que visam à prevenção e o controle do câncer. A análise de ocorrência, distribuição e evolução da doença é importante na criação de perfis dos seus diferentes tipos, bem como na caracterização de mudanças no cenário ao longo dos tempos. Segundo estatísticas apontadas pelo INCA (2020), o câncer de mama e o câncer de próstata lideram o ranking de neoplasias que mais acometem mulheres e homens, respectivamente (29,7% para mulheres e 29,2% para homens). Ainda conforme o INCA (2020), o câncer de mama é o que mais mata dentre todas as outras formas de manifestação da doença, liderando o ranking de óbitos (das mortes por neoplasias, 16,4% são devidas ao câncer de mama).

De maneira objetiva, o câncer é caracterizado como uma multiplicação incontrolável de células anormais. Alguns casos da doença podem ser evitados com a diminuição da exposição do indivíduo aos fatores considerados como de risco. Em outras circunstâncias, o diagnóstico precoce é de suma importância para o sucesso do tratamento e consequente melhora do paciente.

Com o passar dos anos, a ciência foi se desenvolvendo e, então, métodos de diagnóstico foram criados. No início do século XX, técnicas envolvendo raios X começaram a ser utilizadas nos processos investigativos. Em 1913, deu-se início a radiografia das mamas, mas foi só na década de 1970 que foi desenvolvido o mamógrafo: aparelho utilizado na mamografia. Nos anos posteriores, diversos métodos para caracterizar tecidos e órgãos quanto a possíveis anomalias foram criados. No entanto, tais métodos possuem desvantagens, como: expor os pacientes à cargas radioativas, utilizar

agentes de contraste que causam desconforto ao examinado, necessitar de análise dos resultados pelo examinador, entre outras.

A mamografia hoje é o método mais utilizado para diagnóstico de câncer de mama, considerado como padrão ouro. Embora seja esse um fato, tal técnica não é ainda a melhor existente, uma vez que apresenta limitações. Carney et al. (2003) apontaram em seus estudos algumas características da mamografia, como a sua especificidade e sensibilidade. A sensibilidade diz respeito a capacidade do teste identificar corretamente um caso da doença, enquanto a especificidade se relaciona a capacidade do teste identificar corretamente os indivíduos que não possuem a doença. Sob essa ótica, os resultados da mamografia sofreram variações desses parâmetros de acurácia: a sensibilidade variou de 62,9% em mulheres com seios extremamente densos (com grande quantidade de tecido glandular) a 87% em mulheres com seios quase totalmente constituídos por camada de gordura; a especificidade aumentou de 89,1% em mulheres com seios extremamente densos para 96,9% em mulheres com seios quase totalmente constituídos por camada de gordura. Esses resultados apontam que a densidade mamária é um importante fator de influência no resultado da mamografia, fato esse que pode levar a diagnósticos finais errôneos.

Diante do apresentado, fica evidente a necessidade do desenvolvimento de novos métodos que contribuirão com maior eficácia no diagnóstico do câncer de mama. A proposta deste trabalho é contribuir com o desenvolvimento dessa nova tecnologia. Resultados promissores já foram encontrados, tanto nesta pesquisa quanto no trabalho de Menegaz (2018). Novas estratégias utilizando impedância térmica, impedância eletromecânica e a análise de tais sinais podem ser o futuro do diagnóstico oncológico. Nos tópicos a seguir a fundamentação teórica necessária à pesquisa será abordada com maior ênfase, bem como os objetivos do trabalho, metodologia, seus resultados e conclusões.

## 2. Objetivos

Observa-se que o tratamento e processamento de sinais, bem como o desenvolvimento de aparatos experimentais que incluem o desenvolvimento de uma amostra adequada (que simule a mama), o uso e aplicação de sensores, definição de tempo de duração, tempo de aquisição, calibração dos sensores, aquecimento externo, aquecimento interno, escolha do tipo de sensor e do tipo de resposta adequado são variáveis fundamentais para a execução da metodologia proposta. Assim, este trabalho se dedicará à análise e processamento dos sinais resultantes da aplicação das técnicas de impedância eletromecânica e térmica para detecção das inclusões no modelo experimental, buscando-se a obtenção dos seguintes objetivos específicos:

- Análise e processamento de sinais oriundos de um aparato experimental composto por um modelo de silicone e uma inclusão simulando o tumor mamário. O aparato deve considerar o uso de sensores de fluxo de calor, temperatura, fontes infravermelhas e sensores piezoelétricos;
- Os sinais de temperatura, fluxo de calor e tensão dos sensores piezoelétricos deverão ser processados de forma a serem utilizados na detecção de inclusões simuladas. Tal tratamento de dados será realizado usando os conceitos da transformada de Hilbert;
- Uso da transformada de Hilbert para a detecção de comportamento não linear dos sinais oriundos do aparato experimental.

## 3. Fundamentação Teórica

As técnicas de Monitoramento Estrutural, doravante SHM, trazem conceitos muito próximos dos necessários para a formulação de novas tecnologias para a investigação do câncer de mama. Por isso, entender primeiro os fundamentos de tais técnicas soa como algo próspero.

Conforme Silva Junior (2018), o processo de SHM, utilizado para detecção de danos em estruturas, depende de um acompanhamento de uso que contenha respostas dinâmicas da estrutura analisada ao longo do tempo. Em outras palavras, é necessário que se tenha uma base de dados (conhecida como *baseline*, a qual se refere a um sistema sem dano) que permita, através da comparação de estados, dizer se uma estrutura possui ou não um dano. Em linhas gerais, um dano pode ser definido como a alteração em um sistema estrutural que ocasione perda do desempenho desse sistema frente àquilo que lhe compete realizar.

No processo citado, é necessária a presença de sensores e atuadores para a aquisição de sinais da estrutura que se quer analisar. As cerâmicas PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) são comumente utilizadas como parte do *hardware* de aquisição, uma vez que possuem baixo custo, baixo consumo de energia (em geral), trabalham em uma faixa de alta frequência (acima de 30 kHz, normalmente) e proporcionam alta sensibilidade para os sensores (ROCHA, 2017). Tais cerâmicas são transdutores que podem funcionar, simultaneamente, como atuadores e sensores. Elas, portanto, podem tanto gerar como captar um sinal (uma perturbação do meio - onda) que viaja pela estrutura investigada. Um impedancímetro também é necessário na composição do *hardware* de aquisição, uma vez que é necessário gerar um sinal de excitação, captar o sinal dos PZT's utilizados e processar numericamente esses dois para que se obtenha uma função de impedância. Tal função depende das características elétricas do transdutor e das características físicas da estrutura. A avaliação de rigidez e massa da estrutura devido à existência de danos é realizada com o auxílio das chamadas curvas

características da impedância (RAJU, 1997). Todo esse processo descrito caracteriza a técnica conhecida como impedância eletromecânica.

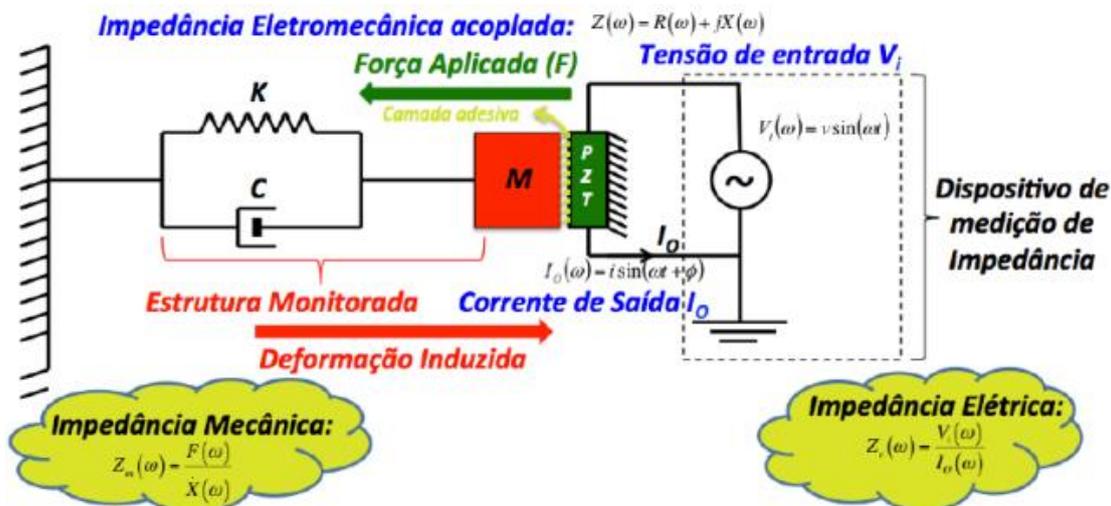


Figura 1. Impedância Eletromecânica (RABELO, 2014)

A Fig. 1 ilustra o processo de medição da impedância eletromecânica em um sistema Massa-Mola-Amortecedor. Os parâmetros indicados por  $M$ ,  $K$  e  $C$  são, respectivamente, a massa do sistema, a rigidez da mola e a constante de amortecimento. A imagem indica também a excitação do PZT a partir de uma fonte de corrente variável que fornece uma tensão de aspecto senoidal,  $V_i(\omega)$ , de amplitude  $v$  e frequência angular  $\omega$ . A partir do modo atuador, o PZT induz uma deformação na estrutura a partir da aplicação de uma força; através do modo sensor, ele consegue recuperar a resposta dinâmica do sistema, a qual se expressa como uma corrente  $I_o(\omega)$  de amplitude  $i$  e fase  $\phi$ . A impedância mecânica pode ser calculada através da razão entre a força  $F(\omega)$  aplicada na estrutura e a velocidade com a qual essa última se desloca,  $X(\omega)$ . Analogamente, para um circuito elétrico, essa relação se traduz na Eq. (1). Vale frisar que toda a sequência de cálculo a seguir está abordada também no trabalho de Menegaz (2018).

$$Z_E = \frac{V_i(\omega)}{I_o(\omega)} = \frac{h_a}{j\omega w_a l_a} \left[ \epsilon_{33}^{-T} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right]^{-1} \quad (1)$$

Onde  $Z_E$  representa a impedância eletromecânica acoplada,  $Z_s(\omega)$  a impedância mecânica da estrutura,  $Z_a(\omega)$  a impedância mecânica do PZT,  $V_i(\omega)$  é a tensão elétrica de entrada do atuador PZT,  $I_o(\omega)$  indica a corrente de saída do PZT,  $\bar{Y}_{22}^E$  é o módulo de Young do PZT com campo elétrico nulo,  $d_{3x}^2$  é a constante de acoplamento piezoeletrico,  $\epsilon_{33}^{-T}$  a constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula,  $\delta$  o fator de perda dielétrica do PZT,  $\eta$  é o fator de perda mecânica do PZT e  $j$  a unidade imaginária. Os parâmetros  $w_a$ ,  $l_a$  e  $h_a$  representam a largura, o comprimento e a espessura do PZT, respectivamente.

Para a análise do sinal captado pelo receptor é necessário a presença de um *software* (desenvolvido em MATLAB) que compare o mesmo com o *baseline*. Essa comparação ocorre a partir da Métrica de Dano, uma análise estatística que permite quantificar a diferença dos sinais (estado atual e *baseline*) e dizer, a partir de um *threshold*, se uma estrutura possui ou não um dano. A escolha dessa métrica se deu a partir da análise de Palomino (2008), a qual apontou a RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada) como sendo a métrica que obteve os melhores resultados nos testes realizados. O seu cálculo é evidenciado na Eq. (2).

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i})]^2}{n} \right\}} \quad (2)$$

Onde  $Re(Z_{1,i})$  representa a parte real da impedância sem danos em uma frequência  $i$ ,  $Re(Z_{2,i})$  indica a parte real da impedância sob um novo estado e  $n$  é o número de pontos de frequência utilizados na medição.

Para o cálculo do *threshold* foi necessária a utilização do Conceito Estatístico de Processo (SPC) para a determinação dos Limites de Controle Superior e Inferior (LCS e LCI) dos índices de dano. Para tal análise apenas o limiar superior é

importante, sendo que a sua obtenção se deu a partir do conceito de intervalo de confiança. Esse último foi estabelecido para o valor médio  $\mu_x$  com base na média da amostra  $\bar{x}$  conforme a Eq. (3).

$$\left[ \bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right] \quad (3)$$

Onde  $\mu_x$  e  $\sigma_x$  representam, respectivamente, a média da população e o desvio padrão,  $\bar{x}$  é a média amostral,  $N$  indica o tamanho da amostra e  $Z_{\alpha/2}$  é a variável padronizada dada pela Eq. 4 com base em um nível de significância  $\alpha = 5\%$ .

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4)$$

Como  $\sigma_x$  é desconhecido, os intervalos de confiança para a média  $\mu_x$  e variância  $\sigma_x^2$  devem ser determinados a partir das Eqs. (5) e (6), considerando uma amostra de tamanho  $N$ .

$$\left[ \bar{x} - \frac{s t_{v;\alpha/2}}{\sqrt{n}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{s t_{v;\alpha/2}}{\sqrt{n}} \right], v = N - 1 \quad (5)$$

$$\left[ \frac{vs^2}{\chi_{v;\alpha/2}^2} \leq \sigma_x^2 < \frac{vs^2}{\chi_{v;1-\alpha/2}^2} \right], v = N - 1 \quad (6)$$

Onde  $s^2$  é a variância amostral,  $t_{v;\alpha/2}$  é uma variável  $t$  de *student* e  $\chi_{v;\alpha/2}^2$  é uma variável Qui-Quadrado com  $v$  graus de liberdade.

Por fim, o LCS (que é o próprio *threshold*) pode ser calculado pela Eq. (7).

$$PZT_{Threshold} = \mu_{X_{MAX}} + 3\sigma_{X_{MAX}} \quad (7)$$

Onde  $\mu_{X_{MAX}}$  e  $\sigma_{X_{MAX}}$  representam, respectivamente, o limite superior para a média da população e o limite superior para o desvio padrão da população.

Neste trabalho, a impedância térmica também é objeto de estudo. Dessa vez o objetivo torna-se observar a resposta térmica do sistema a partir de um fluxo de calor ao invés de um estímulo mecânico. A abordagem já foi utilizada por Guimarães, Phillip e Thery (1995) para estimativa da difusividade térmica no domínio da frequência e também por Borges, Sousa e Guimarães (2008) para a identificação de um sistema térmico tridimensional transiente, portanto sendo um conceito já conhecido. De maneira análoga à impedância eletromecânica, a análise do ponto de vista térmico também é realizada no intuito de detectar danos e utiliza as mesmas técnicas de análise de sinais aplicadas no primeiro método. Para tanto, o seguinte esquema de tecido humano é utilizado.

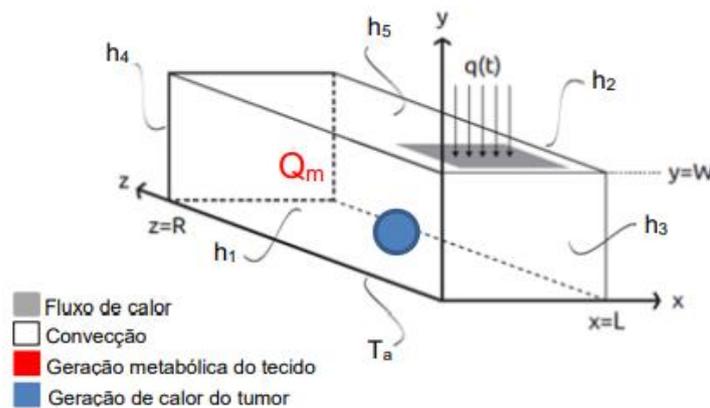


Figura 2. Esquema de um problema térmico em um tecido humano (MENEGAZ, 2018)

O modelo da Fig. 2 busca a maior proximidade das condições reais de um tecido mamário e, por isso, apresenta superfícies expostas a meios convectivos ( $X=0$ ,  $X=L$ ,  $Z=0$ ,  $Z=R$  e  $Y=W$ ) e temperaturas prescritas ( $Y=0$ ). Além dessas condições, o modelo prevê também a geração de calor própria do tecido e a geração provocada pelo aumento do metabolismo local em casos onde há inclusão. Utilizando o conceito de sistemas de controle, a impedância térmica poderá então ser obtida partindo do conceito da integral de convolução, descrita na Eq. (8).

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t h(x, y, z, t - \tau) q(\tau) d\tau \quad (8)$$

Onde  $h(x, y, z, t - \tau)$  representa a função de transferência do sistema térmico,  $q(\tau)$  o fluxo térmico medido em um dado ponto e  $T(x, y, z, t)$  indica a diferença entre a temperatura superficial medida nesse mesmo ponto e a temperatura inicial (considerada como sendo a temperatura ambiente).

De modo a simplificar os cálculos, a análise anterior pode ser realizada no domínio da frequência a partir da transformada direta de Laplace. Desse modo, a relação mostrada na Eq. (8) se transforma em uma equação puramente algébrica, como apresentada na Eq. (9).

$$T(s) = H(s) \cdot q(s) \quad (9)$$

Onde os termos encontrados são os mesmos já apresentados para a Eq. 8, porém no domínio  $s$  (frequência). Portanto, a impedância térmica pode ser encontrada a partir da Eq. (10).

$$Z(s) = \frac{T(s)}{q(s)} \quad (10)$$

Onde  $Z(s)$  representa a impedância térmica, ou seja, ela é a própria função de transferência do sistema térmico. Para obter a resposta no domínio do tempo, basta realizar a transformada inversa de Laplace.

Assim como a impedância eletromecânica, a impedância térmica também é representada por um número complexo. Para quantificar as diferenças obtidas em medições e estabelecer um sistema livre ou não de dano, a mesma análise de *baseline* e *threshold* abordada anteriormente deve ser novamente aplicada.

Para encerrar a Fundamentação Teórica, ainda é necessário tratar sobre o conceito da transformada de Hilbert. Segundo Odra et al (2016), a transformada de Hilbert é uma transformação integral da mesma família das transformadas de Fourier, sendo definida como na Eq. (11).

$$\tilde{H}(\omega) = \frac{-1}{i\pi} pv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H(\Omega)}{\Omega - \omega} d\Omega \quad (11)$$

Onde  $\tilde{H}(\omega)$  representa a transformada de Hilbert da função de resposta em frequência  $H(\Omega)$ ,  $\omega$  é a frequência angular e  $pv$  o valor principal de Cauchy da integral.

Diferente da transformada de Fourier, a transformada de Hilbert não altera o domínio dos sinais ao ser aplicada, ou seja, ela não é uma forma para representar um sinal em outro domínio. Isso é uma informação importante porque enquanto Fourier não altera o dado, Hilbert o muda completamente mantendo-o no mesmo domínio e alterando sua fase em  $\frac{-\pi}{2}$ . Inicialmente esse comportamento pode não parecer vantajoso, mas o principal motivo do estudo dessa transformada neste trabalho é mesmo a possível independência do *baseline* que ela pode proporcionar. No entanto, esse atributo, que será tratado posteriormente com maiores detalhes, ainda está sob investigação.

#### 4. Metodologia

A presente pesquisa deu continuidade ao trabalho já iniciado por Menegaz (2018), utilizando os dados de impedância eletromecânica e térmica já coletados na ocasião. O *hardware* utilizado para aquisição dos dados de impedância eletromecânica consistiu em um modelo de silicone retangular (Fig. 3A) instrumentado com 7 pastilhas PZT, as quais estavam conectadas a um impedancímetro (Fig. 3B).



Figura 3. Aparato experimental: (A) Modelo de Silicone; (B) Impedancímetro (MENEGAZ, 2018)

Esse modelo de silicone contava também com cavidades esféricas de diferentes diâmetros (10 mm, 20 mm e 30 mm) para acomodação de inclusões que buscaram simular um estado de dano (Fig. 4A). No estabelecimento do *baseline*, as esferas utilizadas eram do mesmo silicone do modelo, já que é esse o estado de referência para dano zero; para as demais medições, esferas de poli (ácido lático) foram adicionadas. O material deveria ser diferente para que a situação modelo se aproximasse mais do contexto real, uma vez que o tumor possui diferentes propriedades mecânicas quando comparado ao tecido mamário circundante. De modo a tornar o aparato ainda mais verdadeiro, algumas inclusões já eram confeccionadas com uma cavidade que receberia a instalação de uma resistência elétrica (Fig. 4B). A energia térmica gerada por essas resistências era necessária para simular o aumento da temperatura da mama em virtude do maior calor metabólico proporcionado pelo tumor.



Figura 4. Modelo de Silicone: (A) Cavidades do Modelo de Silicone; (B) Inclusões com resistências (MENEGAZ, 2018)

Para a medição da impedância térmica, alguns itens tiveram de ser adicionados ao modelo retangular de silicone. Como era necessário um aquecimento externo para que fosse obtida uma resposta térmica, um transdutor de fluxo de calor foi acoplado a superfície do modelo juntamente com um sensor de temperatura. Para que a maior parte do calor gerado fosse direcionado para a amostra, a parte superior do modelo foi isolada com o auxílio de poliestireno expandido.

A bancada de instrumentação utilizada na medição da impedância térmica consistiu em um gerador de funções para modular o fluxo de calor imposto ao modelo (Fig. 5A) e em um dispositivo para aquisição dos sinais de temperatura e fluxo de calor (Fig. 5B).

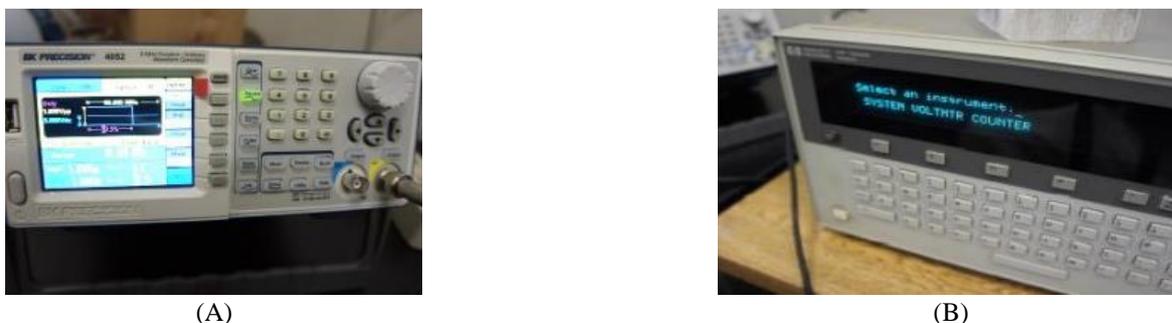


Figura 5. Bancada de Instrumentação para medição de impedância térmica: (A) Gerador de funções; (B) Dispositivo para aquisição (MENEGAZ, 2018)

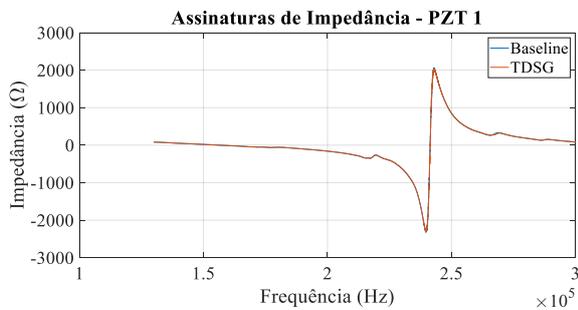
Uma vez coletados os dados, o passo seguinte consistiu na análise desses com o auxílio do *software* MATLAB. Era nesse momento que era calculada, para cada PZT, a métrica de dano já mencionada. Como o trabalho levou em consideração cinco condições distintas de avaliação (*baseline*, sem aquecimento externo, com aquecimento externo, aquecimento externo sem geração de calor na inclusão e aquecimento externo com geração de calor na inclusão) com dez medidas cada, tinha-se ao todo 50 arquivos de dados oriundos das pastilhas PZT. Cada conjunto de dez medidas também possuía dez valores da métrica RMSD, o que tornaria a visualização gráfica dos dados um tanto confusa pela quantidade de informação. Por isso, os resultados são apresentados na forma de caixa, como poderão ser observados posteriormente. Cada gráfico também possui traçado o limiar de dano conhecido como *threshold*, limite esse que permite dizer se há ou não uma inclusão no modelo proposto. O intuito é comparar o *baseline* com todas as demais condições de medição através do valor RMSD, o qual leva em consideração a diferença entre os sinais simultaneamente avaliados. Quando esse valor ultrapassar o limiar de dano, ter-se-á 95% de certeza de que naquela condição há uma inclusão. Toda essa metodologia apresentada se sustenta no fato de o sistema se comportar de maneira diferente quando acompanhado de um dano. São

essas peculiaridades que são procuradas ao se comparar o estado *baseline* com todos os demais: respostas mecânicas ou térmicas distintas da condição ideal em virtude da presença de uma inclusão.

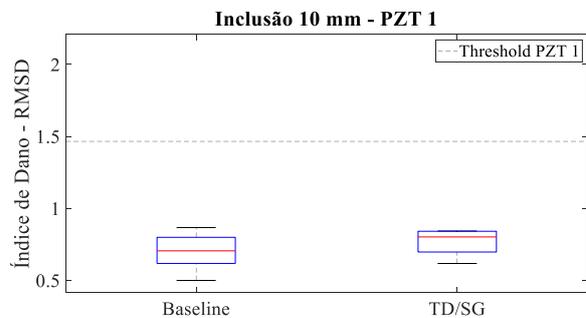
A análise a partir da transformada de Hilbert foi iniciada recentemente, sendo aplicada até então apenas nas informações de impedância eletromecânica. Como já mencionado, o principal motivo de seu estudo é avaliar a possibilidade da independência do *baseline*. Ainda segundo Odra et al (2016), é possível comparar dados de resposta em frequência com a sua transformada de Hilbert a partir de índices de não linearidade. Caso esses dois sinais fossem iguais, o sistema estaria livre de não linearidade (que neste trabalho se configura como uma inclusão); de maneira contrária, sinais distintos representariam um sistema não linear, isto é, com inclusão. A grande vantagem seria o estabelecimento de padrões de detecção a partir de técnicas de inteligência artificial, os quais livrariam o método da análise de um estado ideal. Essa técnica utilizando Hilbert vem se mostrando promissora até então, embora seu estudo ainda esteja nas etapas iniciais. Na seção seguinte, os resultados encontrados a partir da aplicação desse método serão apresentados.

## 5. Resultados

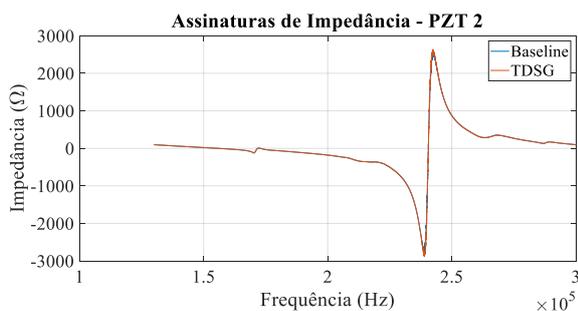
Como já mencionado, os testes realizados com a transformada de Hilbert se mantiveram, até então, apenas no domínio da impedância eletromecânica. Inicialmente, foi avaliado se os dados transformados demonstrariam o esperado, ou seja, se os novos resultados permitiriam as mesmas conclusões dos anteriormente analisados por Menegaz (2018). Os testes realizados foram restringidos apenas a duas condições de medição (*baseline* e sem aquecimento externo, doravante tratado como TD/SG) utilizando as esferas de 10 mm. A seguir serão apresentados os gráficos de assinatura de impedância e índice de dano para cada PZT instalado.



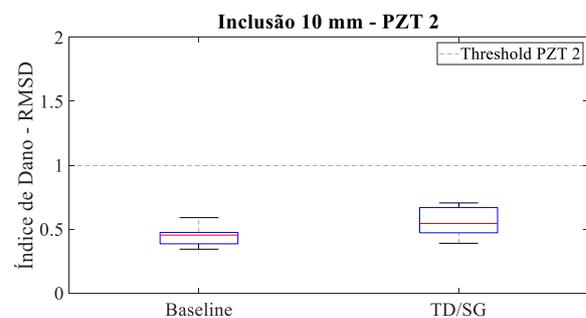
(A)



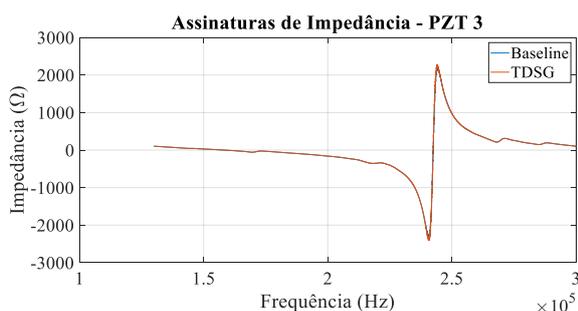
(B)



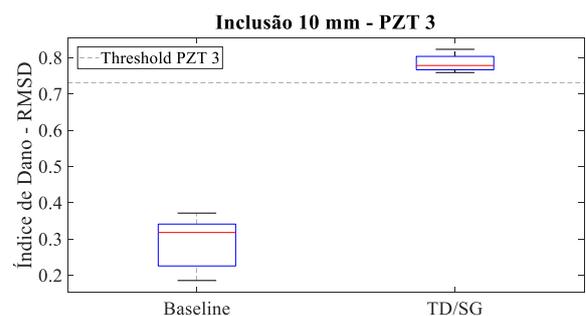
(C)



(D)



(E)



(F)

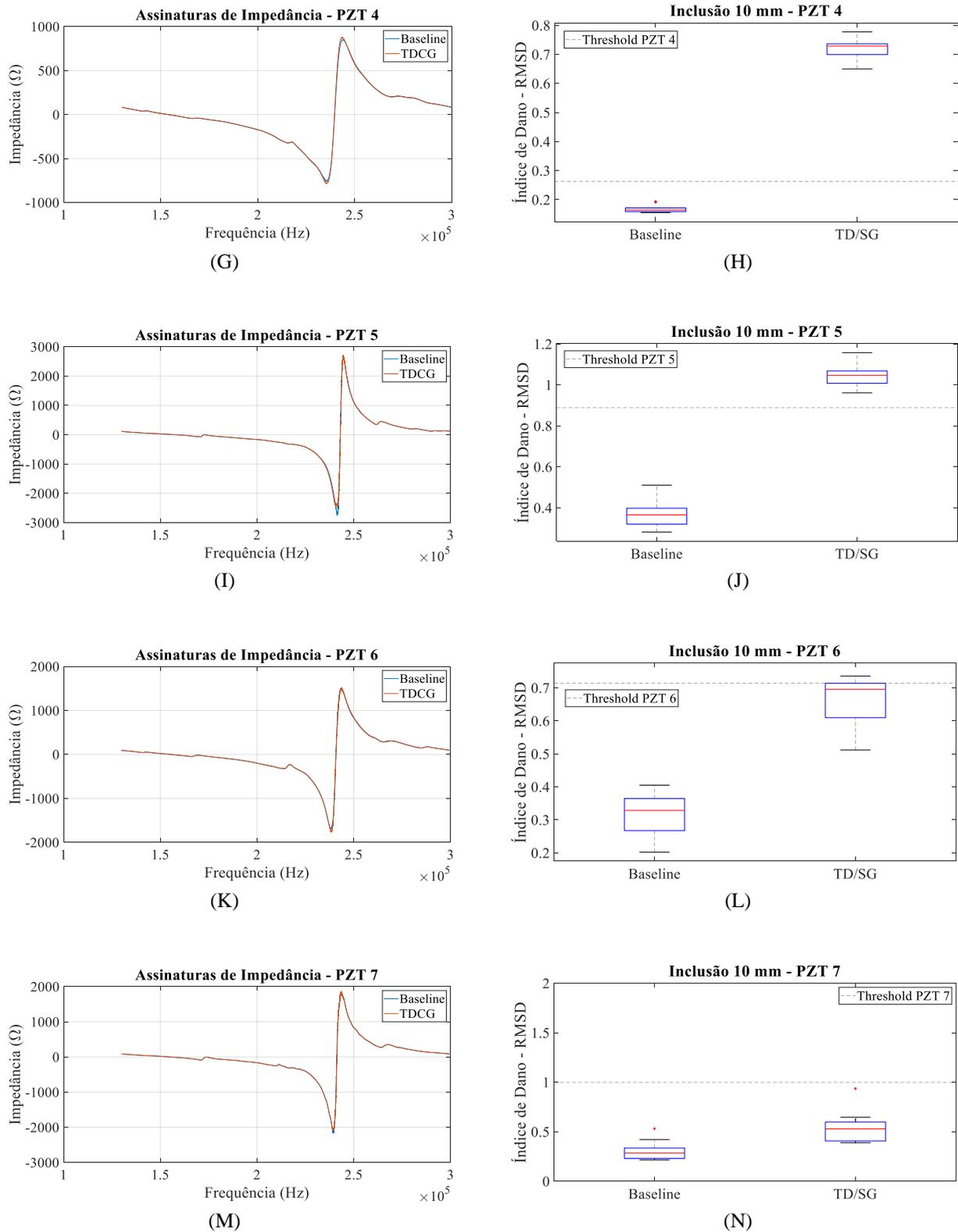


Figura 6. Gráficos dos resultados: (A) Assinatura de Impedância para o PZT 1; (B) Índice de dano para o PZT 1; (C) Assinatura de Impedância para o PZT 2; (D) Índice de dano para o PZT 2; (E) Assinatura de Impedância para o PZT 3; (F) Índice de dano para o PZT 3; (G) Assinatura de Impedância para o PZT 4; (H) Índice de dano para o PZT 4; (I) Assinatura de Impedância para o PZT 5; (J) Índice de dano para o PZT 5; (K) Assinatura de Impedância para o PZT 6; (L) Índice de dano para o PZT 6; (M) Assinatura de Impedância para o PZT 7; (N) Índice de dano para o PZT 7 (autoria própria)

Os gráficos de assinatura de impedância representam, conforme Raju (1997), uma informação apenas qualitativa acerca da integridade estrutural. De uma forma mais simples, a representação gráfica permite a visualização das diferenças entre os sinais oriundos das diferentes medições. No entanto, tais formas de ilustração não são claras em todo momento, já que as diferenças procuradas podem ser sutis sob uma perspectiva qualitativa. Já os diagramas de caixa são sempre bem compreensíveis e transmitem a informação desejada de forma simples e objetiva, como pôde ser observado. Com relação as inferências de cada gráfico, a tabela a seguir as resumirá no tocante da detecção do dano.

Tabela 1. Tabela resumo de resultados (autoria própria)

A inclusão de 10 mm foi detectada?	
PZT	TD/SG
1	Não
2	Não
3	Sim
4	Sim
5	Sim
6	Não
7	Não

Os resultados apresentados estiveram de acordo com os já reportados em Menegaz (2018), com exceção do PZT 6 que na nova análise não conseguiu mais detectar a inclusão de 10 mm adicionada. Embora encontrada essa pequena diferença, as perspectivas são boas e o trabalho continua em curso. A etapa atual consiste na análise dos índices de não linearidade mencionados, a qual ainda não produziu resultados concretos e possíveis de serem publicados.

## 6. Conclusão

A presente pesquisa surgiu da necessidade do desenvolvimento de novas técnicas de detecção do câncer de mama, haja vista que os métodos atuais mais difundidos não são acessíveis em casos nos quais a mulher seja cadeirante ou tenha mobilidade reduzida. Além disso, há também a necessidade de diagnósticos mais assertivos, isto é, exames que proporcionem menor margem de erro e que, ao mesmo tempo, demonstrem por si só informações que contribuirão com um tratamento mais direcionado.

Os testes realizados no modelo de silicone abordado foram realizados previamente por Menegaz (2018), sendo o trabalho atual uma continuação de seus estudos com o objetivo de analisar os sinais já conhecidos sob a ótica da transformada de Hilbert. Inicialmente a meta estipulada foi verificar se, com o uso dessa transformada, os resultados já conhecidos se repetiriam. Os testes foram realizados com os dados da inclusão de 10 mm e em um domínio reduzido de medição (apenas as condições *baseline* e TD/SG foram avaliadas), reproduzindo quase que por completo o que já era esperado. A diferença se deu no resultado apresentado pelo PZT 6, o qual não mais conseguiu detectar o dano adicionado.

Atualmente, a pesquisa se preocupa com o estudo dos índices de não linearidade associados ao uso da transformada de Hilbert. Como descrito, passa por investigação a possível independência do estado *baseline* que essa abordagem pode gerar. Perspectivas futuras objetivam a combinação desse modelo em estudo com técnicas de inteligência artificial, no intuito de gerar padrões de detecção que contribuirão com diagnósticos mais eficientes.

## 3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento (FAPEMIG, CNPq e CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/UFU pelo apoio. Agradecem também ao Laboratório de Transferência de Calor: Modelagem e Experimento (LTCME), ao Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM), ao Cento de Inovação Tecnológica em Esportes Paraolímpicos (CINTESP) e ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst).

## 4. REFERÊNCIAS

- BORGES, V. L.; SOUSA, P. F. B.; GUIMARÃES, G. Experimental determination of thermal conductivity and diffusivity using a partially heated surface method without heat flux transducer. *Inverse Problems in Science and Engineering*, v. 16, n. 8, p. 1047–1067, 2008. <https://doi.org/10.1080/17415970802166659>.
- CARNEY, P. A.; MIGLIORETTI, D. L.; YANKASKAS, B. C.; KERLIKOWSKA, K.; ROSENBERG, R.; RUTTER, C. M.; GELLER, B. M.; ABRAHAM, L. A.; TAPLIN, S. H.; DIGNAN, M.; CUTTER, G.; BALLARD-BARBASH, R. Individual and Combined Effects of Age, Breast Density, and Hormone Replacement Therapy Use on the Accuracy of Screening Mammography. *American College of Physicians–American Society of Internal Medicine*, v. 138, p. 168–175, 2003. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-138-3-200302040-00008>.

- GUIMARÃES, G.; PHILIPPI, P. C.; THERY, P. Use of parameters estimation method in the frequency domain for the simultaneous estimation of thermal diffusivity and conductivity. *Review of Scientific Instruments*, v. 66, n. 3, p. 2582-2588, 1995. <https://doi.org/10.1063/1.1145592>.
- INCA. Estatísticas de câncer. 2020. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/numeros-de-cancer>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- INCA. Institucional. 2020. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/institucional>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- MENEGAZ, Gabriela Lima. USO DOS MÉTODOS DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA E TÉRMICA PARA A DETECÇÃO DE INCLUSÕES VISANDO A APLICAÇÃO EM TUMORES MAMÁRIOS. 2018. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- PALOMINO, L. V. Análise das métricas de dano associadas à técnica da Impedância Eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural. 117 p. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- RABELO, D. S. Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Técnica da Impedância Eletromecânica Incorporando Compensação do Efeito da Variação da Temperatura. 103 p. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ROCHA, Lucas Altamirando de Andrade da. IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS UTILIZANDO UMA METODOLOGIA QUE INTEGRA A TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA E ONDAS DE LAMB. 2017. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- SILVA JUNIOR, Anorosalvo Pedro Leirias da. Monitoramento Estrutural Baseado na Técnica de Ondas LAMB para Detecção de Falhas em Estruturas Metálicas Parafusadas. 2018. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.
- V. Ondra, et al., A method for detection and characterisation of structural non-linearities using the Hilbert transform and neural networks, *Mech. Syst. Signal Process.* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.008>.

## **5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.