



ANÁLISE NUMÉRICA DA DETECÇÃO DE TUMOR EM UM MODELO DA MAMA UTILIZANDO O MÉTODO DE IMPEDÂNCIA TÉRMICA

Alexandre Miguel Costa Barcelos, amcbarcelos11@gmail.com¹

Gilmar Guimarães, gguima@ufu.br¹

Cleudmar Araújo, cleudmar.araujo@ufu.br¹

Gabriela Lima Menegaz, Gabriela.menegaz@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia/MG.

Resumo. O câncer de mama é o tipo de câncer mais comum entre as mulheres brasileiras, atualmente representa 28% dos novos casos. A detecção precoce é essencial para redução da mortalidade devido a esta doença, por isso novos métodos de detecção devem ser estudados. Neste trabalho, o método dos elementos finitos foi utilizado para estudar a detecção de um tumor de 10 mm em um modelo com geometria e propriedades equivalentes à mama aplicando o método da impedância térmica, que consiste na razão entre a variação da temperatura superficial em função da aplicação de um fluxo de calor externo. A detecção das inclusões torna-se possível devido a definições de métricas de dano que são parâmetros estatísticos capazes de representar numericamente as diferentes medições, sem e com a presença do tumor. Foram analisadas três profundidades do tumor, obtendo-se as impedâncias térmicas e a partir delas foram calculados os índices de dano. Nas condições consideradas nos modelos numéricos analisados, o tumor foi detectado nas três profundidades determinadas usando o método da impedância térmica.

Palavras chave: Impedância térmica. Detecção. Tumor mamário. Método dos elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

O câncer é considerado um problema de saúde pública em todo o mundo, sendo a segunda principal causa de morte nos Estados Unidos e na Europa, atrás apenas das doenças cardíacas (Statistics, 2017; Explained, 2017). A Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC, International Agency for Research on Cancer), que é uma agência intergovernamental que faz parte da Organização Mundial de Saúde das Nações Unidas, estima que em 2018 ocorreram 559 371 novos casos de câncer no Brasil, sendo que deste novos casos, aproximadamente, 280 764 afetaram à população feminina. Dentre esses, o tumor maligno mais frequente é o câncer de mama que atingiu 85 620 mulheres (30,5 %). Para o ano de 2020 é esperado que esse número aumente para 90 225, podendo chegar até 133 118 casos em 2040.

Câncer é o termo usado para denominar mais de 100 diferentes tipos de doenças em que ocorre o crescimento desordenado de células anormais com potencial invasivo. Diversos fatores podem agir em conjunto ou em sequência para iniciar ou promover essas doenças. Considerado multifatorial, o câncer de mama envolve fatores biológicos, endócrinos, vida reprodutiva, comportamento e estilo de vida (INCA, 2015).

A detecção precoce do câncer de mama pode reduzir significativamente as taxas de mortalidade causadas pela doença. Existem várias técnicas de diagnóstico que são usadas para a detecção de câncer de mama. A mamografia é tida como o principal exame para detecção precoce e diagnóstico de câncer de mama. No entanto, ressonância magnética e ultrassom também são úteis para a avaliação da doença. A termografia infravermelha, capaz de captar mudanças de temperatura na superfície da pele, também tem sido explorada como uma possível ferramenta de triagem para detecção de tumores mamários. O tecido tumoral tem maior vascularização e geração metabólica do que o tecido saudável, assim o calor produzido pelo tumor pode se propagar através dos tecidos para a superfície da pele, onde gera uma variação de padrão de temperatura. Embora, as autoridades médicas no assunto ainda não aceitem o uso de apenas imagens térmicas como um substituto para a mamografia. Diante disso, tem-se a necessidade de desenvolver novos métodos de detecção precoce do câncer de mama que possibilitem a detecção de anomalias de forma não invasiva, sem causar desconforto ao paciente e sem a emissão de radiação (Menegaz, *et al.*, 2019).

Simulações computacionais que utilizam do Método de Elementos Finitos (MEF) permitem o aumento da capacidade de processamento de dados, podendo auxiliar na modelagem numérica de geometrias complexas e com propriedades térmicas e mecânicas variadas. Neste método, um problema formulado em um domínio contínuo é subdividido em elementos de dimensões finitas, chamados de elementos finitos, interconectados através de um número reduzido de pontos, denominado nós. O comportamento de cada elemento é arbitrariamente aproximado, com a condição de que a malha de elementos apresente um comportamento como o modelo contínuo original, permitindo a obtenção de soluções

aproximadas para diversos problemas, na área médica o MEF tem ampla utilização para avaliação do comportamento biomecânico de tecidos biológicos.

Existem diversos trabalhos na literatura que utilizam simulações numéricas para estudar a identificação de tumores mamários. O trabalho de Mitra e Balaji (2010) utilizou o software COMSOL[®] para determinar a posição e o tamanho de um tumor esférico usando temperaturas simuladas obtidas na superfície de um modelo mamário esférico. Das e Mishra (2015) relataram um estudo numérico referente à estimativa simultânea de tamanho, localização radial e localização angular de um tumor maligno em uma mama humana tridimensional, obtendo os perfis de temperatura com a resolução da equação de biotransferência de calor de Pennes. Figueiredo (2018) propôs em seu trabalho uma metodologia baseada no uso de correlações de temperaturas superficiais da pele da mama para detectar a origem da fonte de calor (metabolismo anormal de um câncer). A influência das propriedades e parâmetros termofísicos foram analisadas, mostrando que o conhecimento prévio das características do tumor não é necessário para a detecção do seu centro. Inicialmente, a estimativa da localização do câncer foi realizada usando termografias simuladas no software comercial COMSOL[®] a partir de uma geometria tridimensional hemisférica da mama.

A impedância térmica tem sido utilizada para a identificação de propriedades térmicas, como o calor específico, difusividade e condutividade térmica. Entretanto, no trabalho de Menegaz e Guimarães (2019) o método da impedância térmica foi proposto para a detecção de inclusões em modelos, fazendo uma analogia à detecção de danos a partir do método da impedância eletromecânica.

O principal objetivo do trabalho é avaliar, a partir de simulações pelo método dos elementos finitos, a aplicação da técnica de impedância térmica para detecção de um tumor maligno em um modelo da mama. Um aquecimento externo será aplicado na superfície do modelo e o tumor será posicionado em três diferentes profundidades, possibilitando a avaliação da influência deste parâmetro na detecção. Os valores de impedância térmica são calculados a partir dos fluxos externos e temperaturas obtidas nos modelos. As assinaturas de impedância térmica são plotadas e a análise quantitativa da detecção é dada pelo cálculo estatístico feito pelas métricas de dano.

Este estudo tem como principal motivação possibilitar informações e análises na detecção de diferentes tipos de anormalidades em tecidos, como o câncer, a fim de oferecer novos métodos de detecção e diagnósticos aos profissionais da área médica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Células do tecido humano, saudáveis ou cancerígenas, são estruturas físicas com massa, rigidez e amortecimento, por isso podem ser representadas por um sistema dinâmico. Portanto, é possível estabelecer um sistema térmico equivalente do tecido. A transferência de calor ocorre nos tecidos através da geração de calor metabólico, perfusão, difusão de calor e troca de calor com o ambiente. Assim, uma analogia entre sistemas térmicos, elétricos e mecânicos pode ser estabelecida. A impedância térmica pode ser expressa como mostrado na Eq. (1) (Menegaz e Guimarães, 2019).

$$Z_t = \frac{\Delta V(\omega)}{I(\omega)} = \frac{\Delta T(\omega)}{q_0(\omega)} = \frac{T_{y=0}(\omega) - T_a(\omega)}{q_0(\omega)} \quad (1)$$

O parâmetro $q_0(\omega)$ é a excitação térmica representada pelo fluxo de calor imposto na superfície, $T(\omega)$ é a resposta a este fluxo medido na temperatura da superfície do sistema, a variável ω representa o domínio da função de frequência obtida na aplicação da transformada de Fourier aos sinais de tempo de $\Delta T(t)$ e $q(t)$ é a medida por transdutores de calor e temperatura. Como o sistema térmico é uma função das propriedades térmicas, da perfusão e do metabolismo, a impedância térmica também deve assumir valores diferentes se o meio tiver inclusões com propriedades térmicas ou se a geração interna de calor for diferente do ambiente.

As assinaturas de impedância fornecem uma informação apenas qualitativa acerca da integridade estrutural e, para quantificar a diferença entre um sinal de referência e outro, utiliza-se as chamadas métricas de dano (Raju, 1997). O dano no trabalho em questão é o tumor existente na mama. Neste trabalho foi utilizada a métrica de dano conhecida como RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada), descrita pela Eq. (2).

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

Em que, $Re(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição sem danos em uma frequência i ; $Re(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura e n é o número total de pontos de frequências utilizados na medição.

Um nível de limite confiável é determinado com base nas informações obtidas para a condição saudável da estrutura, usando o valor calculado de métricas de danos. O limiar, denominado *threshold*, foi determinado de acordo com a Eq. (3).

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

Onde, $\mu_{X_{max}}$ é o limite superior para a média populacional e $\sigma_{X_{max}}$ é o limite superior para o desvio padrão populacional, ambos obtidos escolhendo um nível de significância $\alpha = 5\%$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Geometria do modelo tridimensional

O modelo tridimensional para o estudo em questão foi composto por um modelo com geometria similar a mama humana direita. Esta geometria foi obtida pelo escaneamento, usando o scanner de laser 3D Picza® LPX-600RE, da geometria de um fantoma da mama da empresa 3B Scientific®, mostrado na Fig.1. O tumor maligno foi simulado por uma esfera de diâmetro de 10 mm posicionado no quadrante superior direito da mama. Essa escolha foi feita com base na estatística da ocorrência de câncer de mama encontrada na literatura, que aponta a maior ocorrência de tumores neste quadrante, Fig. 2 (Aguillar *et al.*, 2009).

Assim, foi realizada a simulação de um modelo sem tumor, simulando um tecido saudável, denominado *baseline*, e a simulação de modelos com tumor variando a profundidade em que este se encontrava, Fig. 3. A posição do tumor variou em três profundidade medidas a partir da superfície do modelo: P1 – 40 mm, posição mais afastada da superfície; P2 – 20 mm, profundidade intermediária; e P3 – 10 mm, próxima a superfície do modelo.

Figura 1. Fantoma da mama direita (3B Scientific®).



Figura 2. Quadrantes da mama com porcentagem de ocorrência de câncer de mama (Byer *et al.*, 2002).

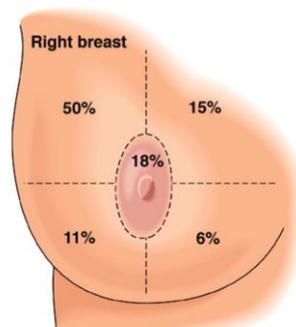
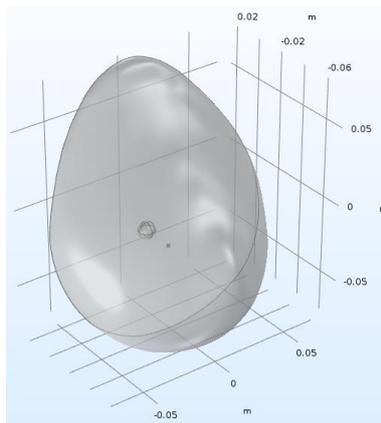


Figura 3. Geometria tridimensional da mama usada nas simulações.



3.2. Propriedades térmicas dos materiais

As propriedades térmicas consideradas nos modelos numéricos para o tecido mamário e o tumor são detalhadas na Tab. 1.

Tabela 1. Propriedades dos materiais considerados no modelo (Gautherie, 1980; Hossain e Mohammadi, 2016, Figueiredo, 2018).

Propriedades dos materiais	Tecido Saudável	Tumor
Condutividade térmica, k [W/mK]	0,21	0,62
Perfusão sanguínea, ω [1/s]	0,00022	0,016
Calor específico, c [J/kgK]	3000	3000
Geração de calor metabólica volumétrica, Q_m [W/m ³]	420	100000
Massa específica, ρ [kg/m ³]	920	920

3.3. Condições de contorno

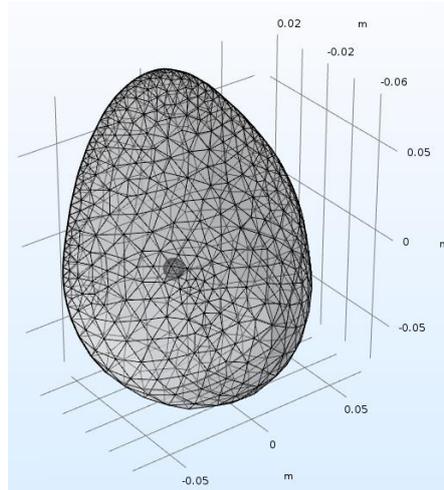
As condições de contorno variam em duas etapas, inicialmente é simulado o regime permanente e, em seguida, o regime transiente. No regime permanente são consideradas quatro condições de contorno. A primeira condição aplicada foi a convecção natural na superfície do modelo, considerando o coeficiente de convecção de 5 W/m²K e a temperatura ambiente de 25 °C, representando o contato da mama com o ambiente. A segunda condição considerada foi a temperatura de 37 °C constante aplicada na parte inferior do modelo, simulando a temperatura do corpo humano. A terceira condição de contorno é uma geração interna de calor de 100 000 W/m³ aplicada no tumor e uma segunda geração de calor da própria mama de 420 W/m³, representando o metabolismo do tecido. Este valor de geração de calor é baseado nas propriedades termofísicas dos tecidos biológicos (Gautherie, 1980; Hossain e Mohammadi, 2016; Figueiredo, 2018).

Os resultados da simulação do modelo em regime permanente foram utilizados como condições iniciais do regime transiente. Além das condições de contorno anteriormente consideradas no regime permanente, foi aplicado um fluxo de calor periódico na superfície da mama. O fluxo periódico de calor consistiu na aplicação de 2 W a cada 60 s por 8 ciclos. Durante o minuto inicial, não foi aplicado o fluxo de calor e assim foi simulado um teste com tempo total de 540 s, alternando entre resfriamento e aquecimento. Todos os modelos com a presença do tumor foram comparados com o modelo de referência, *baseline*, que simula a mama saudável, ou seja, sem tumor.

3.4. Malha

A malha atribuída ao modelo foi obtida através da opção de sequência de malha controlada e do tamanho dos elementos como fino, devido à complexidade do modelo. A malha completa apresentou 8 421 elementos de domínio (tetraédricos), 1 582 elementos de contorno (triangulares) e 119 elementos de borda, como mostrado na Fig. 4.

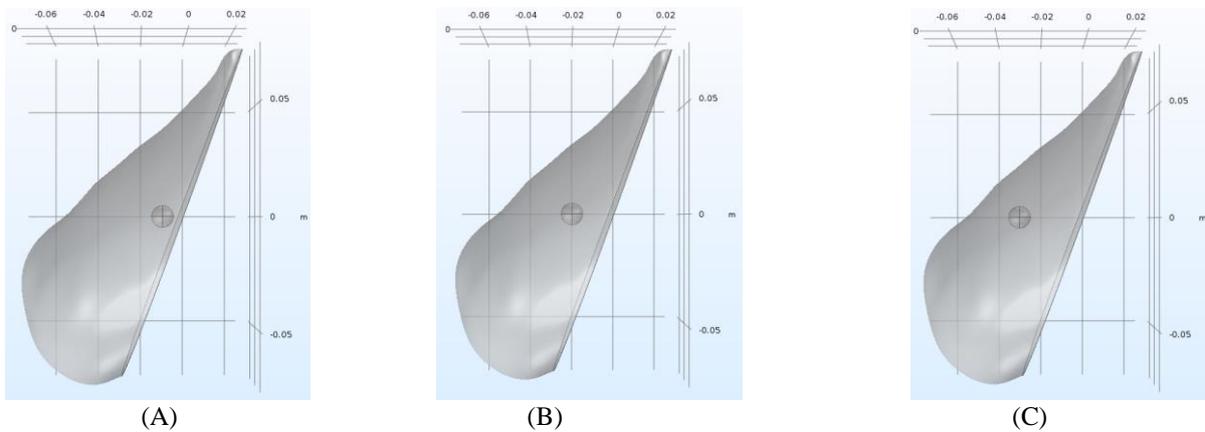
Figura 4. Modelo com a malha de elementos finitos.



4. RESULTADOS

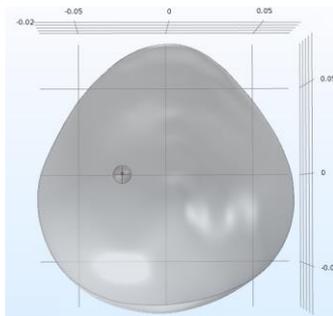
A partir da aplicação do fluxo de calor na superfície do modelo verificou-se a distribuição de temperatura nas seguintes condições: Baseline: modelo sem tumor; P1: modelo com tumor de 10 mm na profundidade 30 mm em relação a superfície; P2: modelo com tumor de 10 mm na profundidade 20 mm em relação a superfície; P3: modelo com tumor de 10 mm na profundidade 10 mm em relação a superfície. As profundidades do tumor que foram testadas podem ser vistas na Fig. 5.

Figura 5. Posições do tumor no modelo da mama: (A) Posição P1 – 30 mm; (B) Posição P1 – 20 mm; (C) Posição P1 – 10 mm.



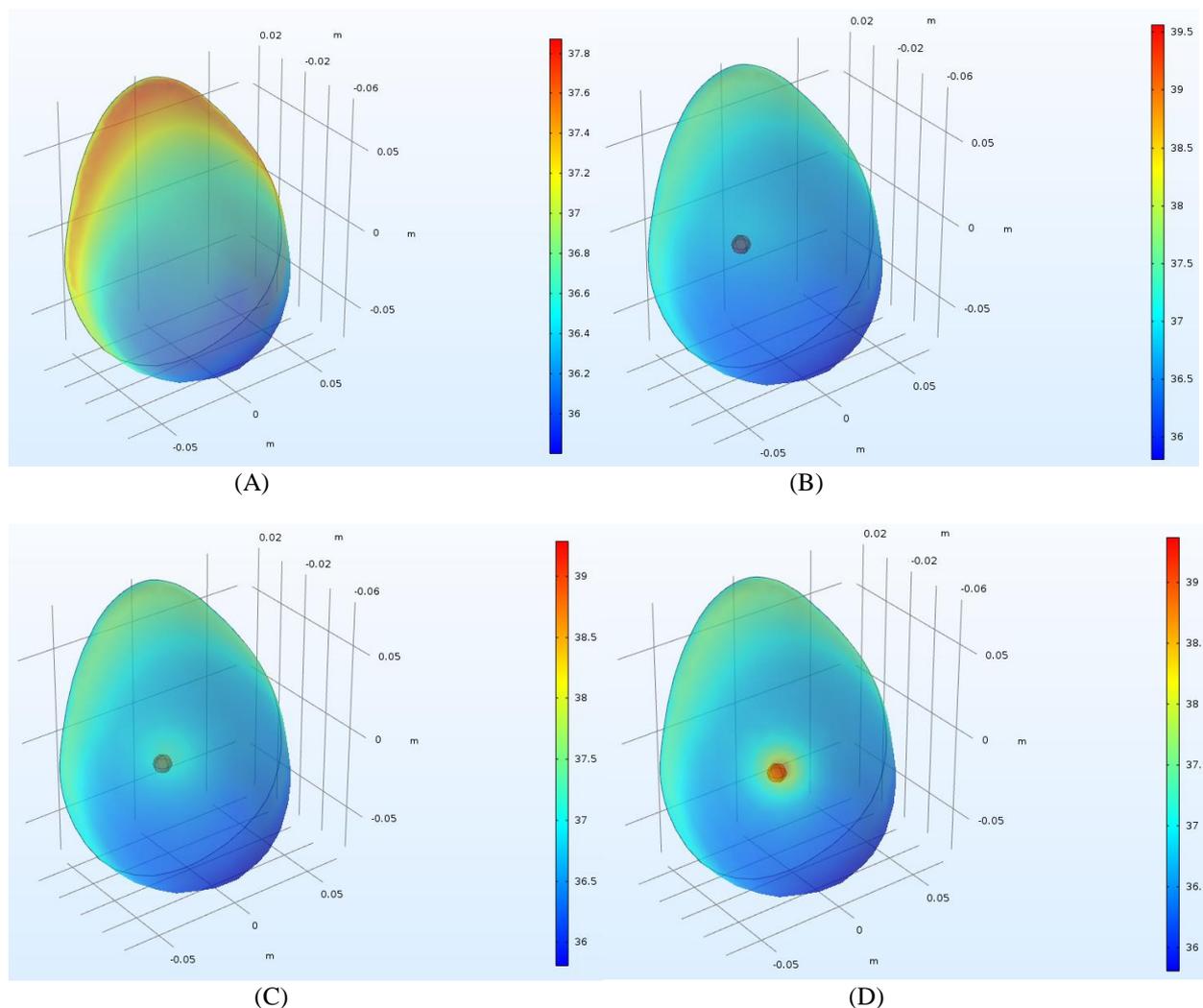
Os valores das temperaturas e do fluxo de calor foram obtidos em um ponto na superfície da mama no mesmo quadrante onde foi posicionado o tumor, como mostra a Fig. 6.

Figura 6. Ponto para aquisição dos dados de temperatura e fluxo de calor.



A Figura 7 (A) mostra a distribuição de temperatura no modelo *baseline*, com as temperaturas mais altas na região que simula a união com o tronco, que seria a parte inferior do modelo. Na Figura 7 (B) é apresentada a distribuição de temperatura da mama com o tumor de 10 mm na primeira posição (P1), que após o regime permanente, apresentou uma temperatura de 34,34 °C e ao final do regime transiente a temperatura chegou até 36,12 °C. A Figura 7 (C) mostra a distribuição de temperatura do modelo com o tumor na segunda posição (P2). Neste caso, foi observada uma temperatura de 34,61 °C após o regime permanente e de 36,49 °C após o final da simulação. A distribuição de temperatura do tumor com a terceira posição (P3) é representado na Fig. 7 (D), o valor após o regime permanente foi de 35,79 °C e na sequência na simulação foi obtida uma temperatura de 37,91 °C, observando-se maiores temperaturas na região em que o tumor está presente.

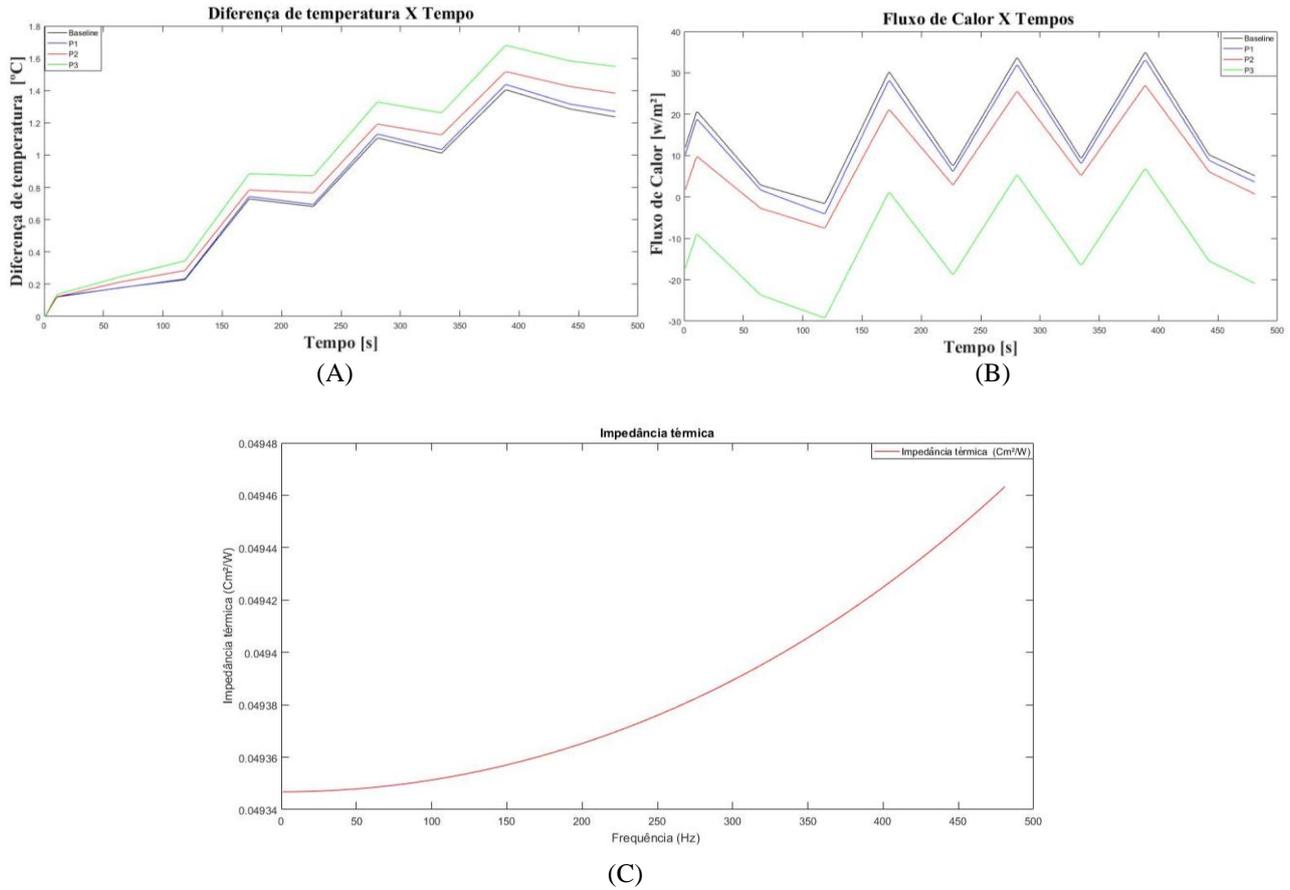
Figura 7. Distribuição de temperatura dos modelos numéricos analisados: (A) Modelo *baseline*; (B) Modelo com tumor de 10 mm a na posição P1; (C) Modelo com tumor de 10 mm a na posição P2; (D) Modelo com tumor de 10 mm a na posição P3.



A partir dos resultados de fluxo de calor e diferença de temperatura obtidos no ponto na superfície de cada modelo simulado, foram calculados os valores de impedância térmica usando o *software* Matlab®.

A Figura 8 (A) mostra o gráfico das curvas de fluxo de calor variando com o tempo para cada modelo. As curvas de diferença de temperatura variando com o tempo para as quatro condições são mostradas no gráfico da Fig. 8 (B). Após a obtenção do fluxo de calor e da temperatura em cada um dos modelos foram calculadas as impedâncias térmicas respectivas. A Figura 8 (C) mostra o gráfico da curva de impedância térmica obtida para o modelo sem tumor.

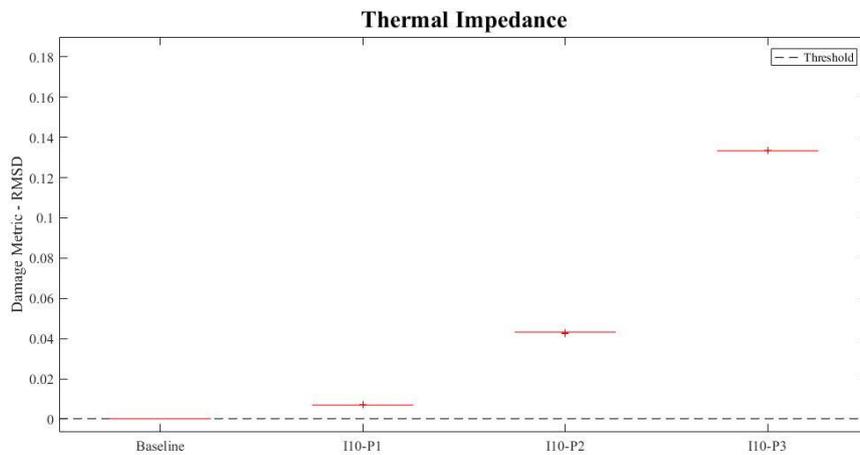
Figura 8. (A) Gráfico das curvas de fluxo de calor x tempo; (B) Gráfico das curvas de diferença de temperatura x tempo; (C) Gráfico de impedância térmica x frequência para o modelo *baseline*.



As curvas de impedância térmica indicam de forma qualitativas as variações no sistema que ocorreram devido a presença do tumor nas diferentes profundidades. Entretanto, o cálculo das métricas de dano RMSD possibilitam a avaliação quantitativa das variações. Assim, é possível determinar se o tumor foi detectado para as condições simuladas modelo usando a metodologia da técnica da impedância térmica. O valor limiar *threshold* foi apresentado, garantindo 95% de confiança na probabilidade de detecção do tumor. Os resultados acima do limiar indicam que a detecção ocorreu com sucesso. Nos casos em que os resultados cruzam a linha do *threshold* os resultados foram considerados inconclusivos.

A Figura 9 mostra o resultado obtido para a métrica RMSD e indica que, nas condições testadas, o tumor de 10 mm simulado na mama foi detectado com sucesso a partir da técnica da impedância térmica para as três profundidades consideradas.

Figura 9. Gráfico do índice de dano.



5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram feitas simulações pelo método dos elementos finitos de modelos da mama saudável e da mama com a presença de um tumor maligno de 10 mm em diferentes profundidades, com o intuito de detectar o tumor usando o método da impedância térmica. Para isso, foi aplicado um fluxo de calor na superfície do modelo e pelas simulações foram obtidas as distribuições de temperatura nos modelos, que possibilitaram o cálculo da impedância térmica e, posteriormente, do índice de dano.

Observou-se que os modelos apresentaram o comportamento térmico esperado e as assinaturas de impedância térmica puderam ser obtidas. A partir da análise do índice de dano obtido, observou-se que o tumor de 10 mm foi detectado com sucesso, para as condições adotadas nas simulações, independente da profundidade em que este se encontrava.

Estes resultados fazem parte de estudos preliminares com o método dos elementos finitos para auxiliarem nos estudos envolvendo a detecção de tumores utilizando o método da impedância térmica. Os trabalhos estão sendo desenvolvidos para a consolidação da técnica e o seu futuro uso em tecidos *in vivo*, possibilitando a detecção de tumores e outras anomalias usando uma técnica não invasiva, sem emissão de radiação e acessível para pessoas com deficiência ou baixa mobilidade.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Aguillar, V. L. N., Bauab, S. P., Maranhão, N. M., 2009. *Mama: diagnóstico por imagem: mamografia, ultra-sonografia, ressonância magnética*. 1st edition. Rio de Janeiro: Revinter.
- Byer, C. O.; Galliano, G.; Shriver, S. P., 2002. "Dimensions of human sexuality". [S.l.]: McGraw – Hill Humanities Social.
- Das, K., Mishra, S. C., 2015. "Simultaneous estimation of size, radial and angular locations of a malignant tumor in a 3-D human breast-a numerical study". *Journal of thermal biology*, Vol.52, pp. 147-156.
- Explained, E. S. Causes of death statistics. 2017. Disponível em : http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Causes_of_death_statistics.
- Figueiredo, A.A.A., 2018. *Uso de correlações entre temperaturas superficiais e qualificação da técnica de imagens infravermelhas para a detecção e localização de tumores de mama*. PhD Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Gautherie, M., 1980. "Thermopathology of breast cancer: measurement and analysis of in vivo temperature and blood flow". *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 335, n. 1, pp. 383-414.
- Hossain, S.; Mohammadi, F. A., 2016. "Tumor parameter estimation considering the body geometry by thermography". *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 76, pp. 80-93.
- INCA, 2015. "Estimativa 2016, Incidência de Câncer no Brasil". Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. Coordenação de Prevenção e Vigilância, Rio de Janeiro, pp. 122.
- Mitra, S.; Balaji, C., 2010. "A neural network based estimation of tumor parameters from a breast thermogram". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, n.21, pp.4714-4727.
- Menegaz, G.L. and Guimarães, G., 2019. "Development of a new technique for breast tumor detection based on thermal impedance and a damage metric". *Infrared Physics and Technology*, Vol. 97, pp. 401-410.
- Menegaz, G. L., Tsuruta, K. M., Finzi Neto, R. M., Steffen Junior, V., Araujo, C. A., Guimarães, G., 2019. "Use of the electromechanical impedance method in the detection of inclusions: application to mammary tumors". *Structural Health Monitoring*, pp. 1-16.
- Raju, V., 1997. "Implementing impedance-based health monitoring". *Virginia Polytechnic Institute - State University. Blacksburg*.
- Statistics, N. C. for H. Leading causes of death. 2017. Disponível em : <http://www.cdc.gov/nchs/fastats/leading-causes-of-death.htm>.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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