

ESTUDO NUMÉRICO DA RECUPERAÇÃO TÉRMICA COM E SEM HIPERTERMIA PARA DETECÇÃO PRECOCE DE TUMORES APÓS HIPOTERMIA

Ana Beatriz Silva Ataide, anaataide@aluno.uema.br¹

Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br¹

¹Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Resumo. O câncer de mama é a principal causa de morte entre as mulheres, e a termografia infravermelha é uma das técnicas capazes de auxiliar a sua detecção. O objetivo deste trabalho é comparar os contrastes térmicos na superfície da pele na recuperação térmica, com e sem hipertermia, após um período de hipotermia em uma mama, por meio de uma análise termográfica no software COMSOL, e verificar se a recuperação térmica por hipertermia aumenta o contraste térmico obtido. A metodologia baseou-se na equação de Pennes em um modelo bidimensional de uma mama similar à anatômica, que apresentava tecido saudável e com tumor. A análise foi realizada por meio das etapas dos estudos estacionário, hipotermia, e recuperação térmica natural ou por hipertermia. Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de hipertermia na recuperação térmica da mama não aumenta o contraste térmico de forma significativa sob as condições do modelo numérico, além de causar dano térmico permanente nas células do tecido, caso permaneçam inalterados o tempo ou intensidade do fluxo de calor. Portanto, ainda são necessários novos estudos visando o aprimoramento das técnicas de termografia infravermelha para que seja possível identificar o câncer de mama de forma precoce.

Palavras-chave: câncer de mama. termografia infravermelha. simulação numérica. hipotermia. hipertermia.

Abstract. Breast cancer is the main cause of death among women, and infrared thermography is one of the techniques capable of assisting its detection. The objective of this work is to compare the thermal contrasts in the skin surface in the thermal recovery, with and without hyperthermia, after a period of hypothermia in a breast, by a thermographic analysis in the COMSOL software and to verify if the thermal recovery by hyperthermia increases the thermal contrast obtained. The methodology was based on Pennes' equation in a two-dimensional model of an anatomically similar breast, which presented healthy tissue and with tumor. The obtained results indicated that the application of hyperthermia in the breast thermal recovery does not increase significantly its thermal contrast under the conditions of the numerical model, in addition to causing permanent thermal damage to tissue cells if the time or intensity of the heat flow remains unchanged. Therefore, further studies are still needed to improve infrared thermography techniques so that it is possible to identify breast cancer early.

Keywords. breast cancer. infrared thermography. numerical simulation. hypothermia. hyperthermia.

1. INTRODUÇÃO

O câncer é um conjunto de mais de 100 doenças caracterizadas pelo crescimento desordenado de células, que invadem os tecidos e órgãos, tendendo a serem muito agressivas e incontroláveis, formando tumores capazes de se espalharem para outras regiões do corpo. No Brasil, o câncer de mama é o tipo mais incidente nas mulheres de todas as regiões, apresentando taxas mais altas nas regiões Sul e Sudeste, sendo a principal causa de morte entre as mulheres em todas as regiões do Brasil, exceto na região Norte. A mamografia é a principal técnica recomendada para as mulheres na faixa etária de 50 a 69 anos, devendo ser realizada de forma bienal. (INCA, 2022).

Segundo o estudo de Nusrat *et al.* (2022), muitas modalidades de escaneamento por imagem estão sendo continuamente desenvolvidas com o intuito de se diagnosticar de forma precoce o câncer de mama, visto que são o principal meio para o seu reconhecimento e diagnóstico. Atualmente, as modalidades de imagem usadas para o auxílio à detecção da doença são a mamografia, ultrassonografia, imagens de ressonância magnética, e histopatologia. E também a termografia, cujas principais vantagens são de apresentar baixo custo relativo em relação às outras técnicas, é não

dolorosa, não invasiva, não apresenta necessidade de contato físico, é inofensiva tanto para o termógrafo quanto para o paciente, e é conveniente para mamas densas, podendo assim ser utilizada para o auxílio da detecção precoce do câncer de mama.

Existem inúmeros estudos que buscam auxiliar a detecção do câncer de mama de forma precoce utilizando a termografia infravermelha. Recentemente, um estudo realizado por Mukhmetov *et al.* (2020) comparou vários perfis de temperatura em diferentes tamanhos e localizações de tumores em mamas em tecido fantoma, e concluiu que, tumores em estágios precoces não alteram significativamente o perfil de temperatura da superfície da pele, em comparação aos tumores em estágios avançados, e desenvolveu uma nova estrutura de procedimentos para o diagnóstico do tumor auxiliado por termografia estática.

Um outro estudo, realizado por Korczak *et al.* (2020), apresentou uma técnica simples, utilizando a ultrassonografia e a termografia passiva em conjunto, pelo modelo numérico de biotransferência de calor para prever a estrutura anatômica interna da mama. O estudo foi feito com 14 mulheres, onde 4 estavam saudáveis e 10 com câncer de mama, e preocupou-se com o tamanho e localização do tumor, sendo realizado por meio de um modelo geométrico 2D para estimar a distribuição de temperatura obtidas pela termografia e as simuladas pelo modelo numérico. Os dados da ultrassonografia foram exportados para o software MATLAB, e em seguida, para o software AbacusFEM, sendo realizada, por fim, uma comparação da distribuição de temperatura obtida pela termografia e a simulada pelo modelo numérico. Observou-se que mesmo variando todos os parâmetros do modelo, sendo a distância do tumor da superfície da pele, raio ou malignidade do tumor, ou porcentagem de gordura, em todas as 10 mamas com câncer, as suas temperaturas de superfície foram maiores do que as mamas saudáveis.

Outro estudo, realizado por Iljaž *et al.* (2019), analisou um tecido de pele não homogêneo, composto por diferentes camadas, com a modelagem de dois tumores diferentes, Clark II e Clark IV. O problema de transferência de calor, cuja equação governante foi a de biocalor de Pennes, foi analisado como assimétrico 2D, utilizando coordenadas cilíndricas, e o modelo de termorregulação desenvolvido analisou a geração de calor metabólico e a taxa de perfusão sanguínea como dependentes da temperatura, com base no efeito de van't Hoff, obtendo o campo de temperatura para o domínio do tecido. Observou-se no estudo, que os dois tumores, em estágio inicial, não são fáceis de serem detectados com a termografia estática, sendo indicado fazer a modelagem por meio de termografia dinâmica.

Com base nos estudos anteriores, será realizada neste trabalho uma modelagem numérica, para um mesmo modelo de mama, para um caso saudável e um caso com a presença de um tumor, através da análise de termografia dinâmica utilizando o software COMSOL Multiphysics, no problema de biotransferência de calor, identificando o comportamento térmico da superfície da pele na recuperação térmica após a aplicação de hipotermia. O objetivo do trabalho, é verificar como, após um período de hipotermia, a aplicação de uma hipertermia na recuperação térmica altera o contraste térmico na superfície da pele, realizando uma comparação do contraste térmico da recuperação térmica por convecção natural e por hipertermia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelo Numérico

A geometria para o estudo é uma estrutura bidimensional de uma mama composta de tecido com um tumor que possui diâmetro de 0,4 cm, localizado próximo à superfície da pele, conforme mostrado na Fig. 1a. O modelo numérico assume as condições de contorno de convecção e temperatura conhecidas, e, para a modelagem com aplicação de hipertermia, também é conhecido o fluxo de calor, conforme é mostrado na Fig. 1b. A Figura 1c mostra a malha utilizada na simulação, composta por 26.722 elementos triangulares.

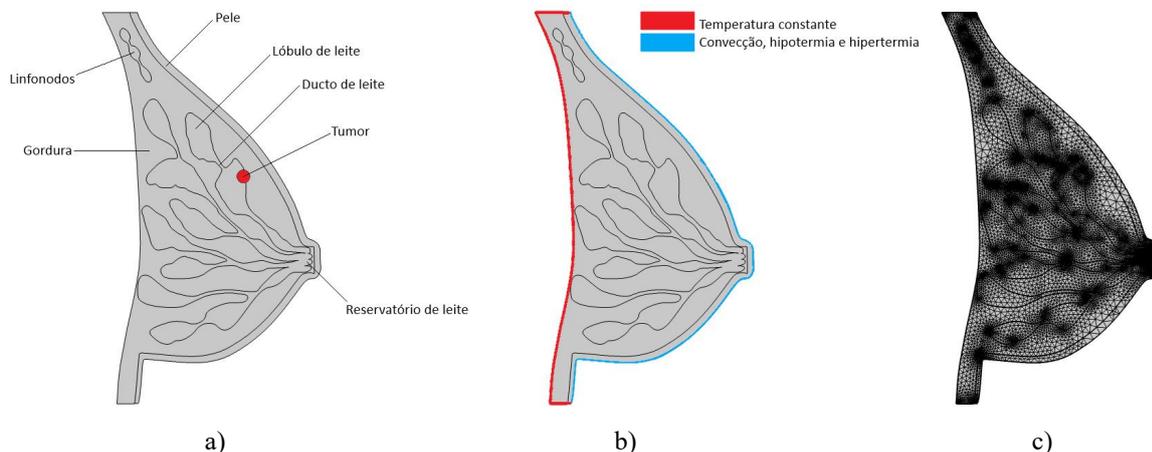


Figura 1. Modelo numérico 2D de uma mama: (a) Com tumor, (b) Condições de contorno, e (c) Malha numérica

A equação que modela a transferência de calor em tecidos biológicos é descrita na Eq. (1) como a equação de Pennes (1948), e foi utilizada para a modelagem da simulação numérica.

$$k\nabla^2 T + \omega_b \rho_b c_b (T_b - T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde as propriedades k , c , ω e ρ são, respectivamente, a condutividade térmica, calor específico, perfusão sanguínea, e densidade do tecido. O subscrito b representa as propriedades para o sangue. A geração de calor metabólico e temperatura do tecido são Q e T , respectivamente. Durante as simulações numéricas, as temperaturas interna e sanguínea foram consideradas iguais a T_{sangue} , $T_{\text{corpo}} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$. A condição externa na superfície da mama foi caracterizada como convecção natural, cujo coeficiente de convecção térmico escolhido foi de $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e a temperatura do ambiente de $T_\infty = 22 \text{ }^\circ\text{C}$. A condição de hipotermia foi definida como sendo uma temperatura constante de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, já a hipertermia como um fluxo de calor aplicado de $400 \text{ W}/\text{m}^2$, e ambas na superfície da mama. A Tabela 1 apresenta as propriedades biológicas da mama utilizadas na simulação.

Tabela 1. Propriedades dos tecidos biológicos (Barros e Figueiredo, 2022) e (Mukhmetov *et al.*, 2020)

Tecidos mamários	Condutividade térmica k (W/m K)	Calor específico c (J/kg K)	Perfusão sanguínea ω_b (1/s)	Densidade ρ (kg/m ³)	Fonte de calor Q_m (W/m ³)
Pele e gordura	0,21	4186	0,00022	1000	420
Nódulos linfáticos, ductos e lóbulo	0,52	4186	0,00052	1000	420
Tumor	0,62	4186	0,01600	1000	9818

Com base no estudo realizado por Korczak *et al.* (2020), as mamas com tumor apresentam temperatura de superfície da pele maior que uma mama saudável, então, para a modelagem do contraste térmico, foi utilizada a equação descrita em Eq. (2).

$$C = T_t - T_s \quad (2)$$

onde C é o contraste térmico, e T é a temperatura na superfície externa da mama. Os subscritos t e s indicam as temperaturas para uma mama com tumor e saudável, respectivamente.

2.2. Simulação numérica

A modelagem considerou uma simulação de termografia dinâmica utilizando o software comercial COMSOL Multiphysics pelo método de elementos finitos, em uma biotransferência de calor, com a aplicação de hipotermia na superfície da mama, com temperatura constante de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, e, após isso, dividiu-se a simulação, para o mesmo modelo de mama, em dois casos com e sem aplicação de hipertermia, no intuito de compará-los. A condição de hipotermia manteve-se por um intervalo de 100 s em ambos os casos, e após esse período de tempo, para o primeiro caso, manteve-se a convecção natural na recuperação térmica, avaliada em um intervalo de 1800 s. Para o segundo caso, no instante em que se cessou a hipotermia, foi imposta a condição de hipertermia, tendo a intensidade do fluxo de calor de $400 \text{ W}/\text{m}^2$, durante 1800 s da recuperação térmica. As etapas da simulação são mostradas no fluxograma da Fig. 2.

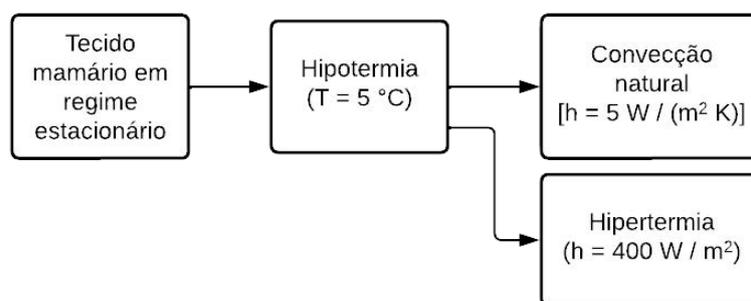


Figura 2. Fluxograma das etapas da termografia infravermelha

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, nas Figuras 3a e 3b é mostrada a distribuição de temperatura dos tecidos com e sem tumor após a termografia estacionária. As Figuras 4a e 4b representam as linhas da superfície 2D para analisar a temperatura da superfície da pele do tecido.

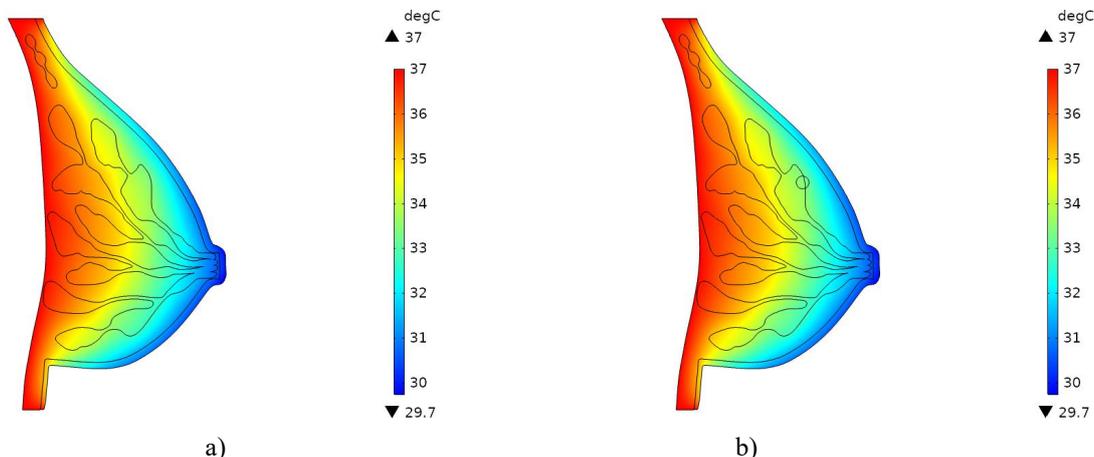


Figura 3. Distribuição de temperatura no Regime Estacionário: (a) Sem tumor e (b) Com tumor



Figura 4. Superfícies selecionadas para a análise de temperatura: (a) Sem tumor e (b) Com tumor

Na Figura 5a são mostradas as curvas de temperatura obtidas nas superfícies selecionadas do tecido mamário saudável e com a presença do tumor, e na Figura 5b é mostrado o contraste térmico entre as duas superfícies determinado pela Eq. (2). Com base nessa análise, foi localizado o ponto na linha de superfície onde se obteve maior contraste térmico, de $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir das coordenadas cartesianas do sistema, estando nos valores de 1,78 e 1,55 cm respectivamente, mostrado na Fig.6.

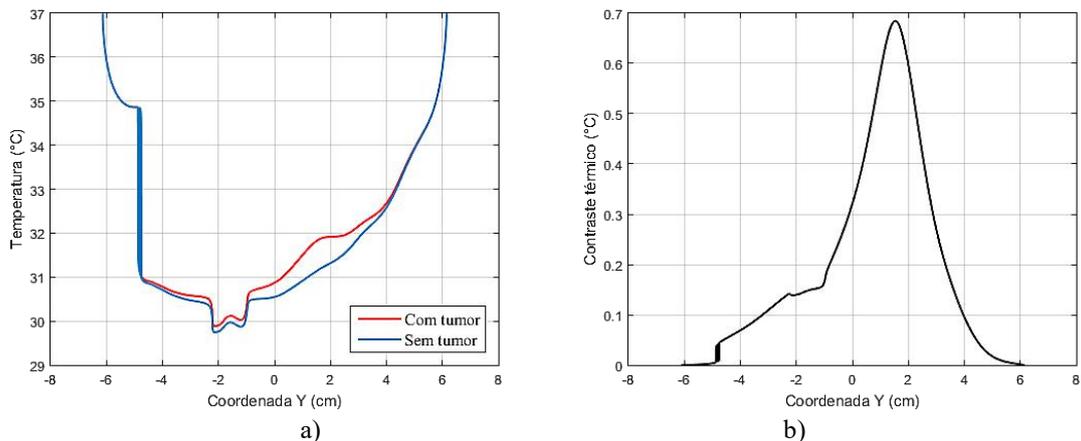


Figura 5. Resultados da análise de termografia passiva: (a) Curvas de temperatura na superfície e (b) Contraste térmico da superfície

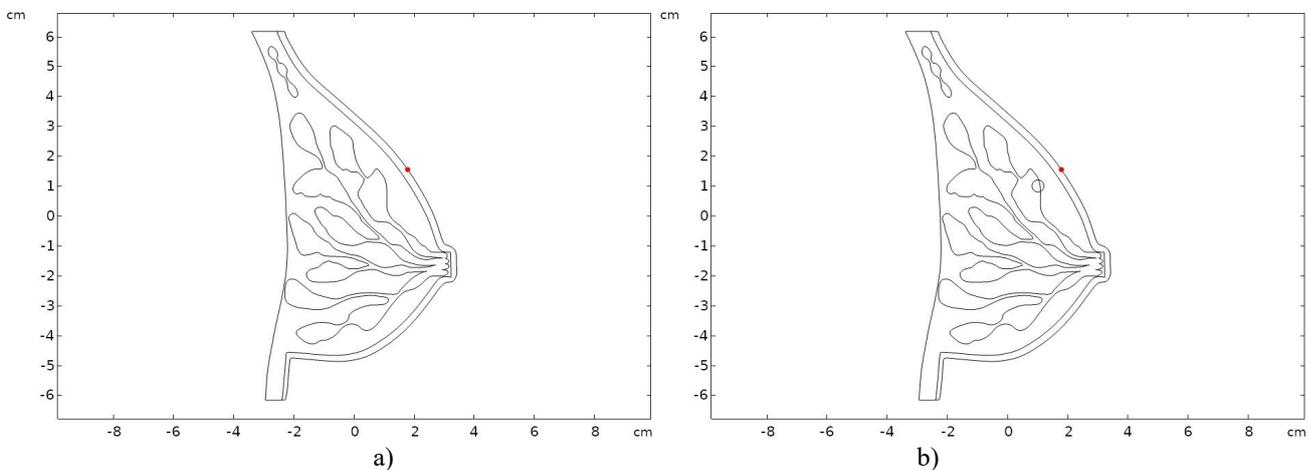


Figura 6. Localização do ponto com maior contraste passivo em coordenadas cartesianas: (a) Sem tumor e (b) Com tumor

Após isso, a mama foi submetida a uma análise em regime transiente de hipotermia no intervalo de tempo de 0 a 100 s. A aplicação de uma bolsa de gelo foi simulada, capaz de manter uma temperatura constante de 5 °C na superfície externa da mama. Tendo realizada esta etapa, o estudo dividiu-se em duas partes para a recuperação térmica, analisando o contraste térmico, obtido a partir da Eq. (2), sendo as variáveis T dadas pela temperatura do ponto encontrado.

A Figura 7 mostra a temperatura no ponto para uma mama com e sem tumor, comparando a termografia infravermelha, com e sem aplicação de hipertermia na superfície externa da pele. Observa-se que a superfície externa da pele, em uma mama saudável e com tumor, alcança uma temperatura aproximada ao intervalo de 52 °C no final da recuperação térmica com aplicação de hipertermia, ocasionando um dano térmico permanente nas células do tecido, indicando que o fluxo de calor deve ser reduzido ou ser aplicado periodicamente. Com base na análise realizada por Barros e Figueiredo (2022), há a necessidade de avaliar se o procedimento de termografia proposto neste trabalho está dentro dos limites do dano térmico causado pelo aquecimento da superfície da mama.

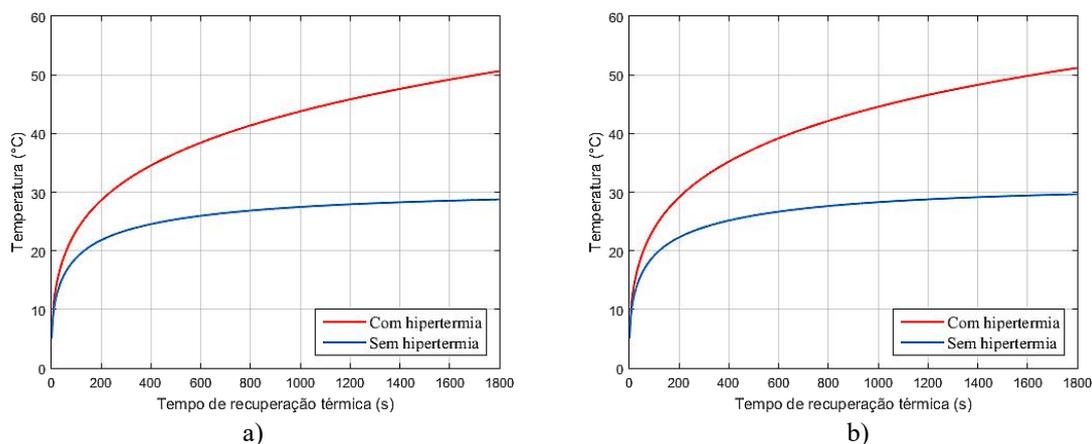


Figura 7. Temperatura no ponto para: (a) Mama sem tumor e (b) Mama com tumor

Na Figura 8 é mostrada uma comparação dos contrastes térmicos dados pela Eq. (2) para uma recuperação térmica com e sem a hipertermia, e o contraste térmico obtido de uma termografia passiva. Na termografia passiva observou-se que o seu contraste térmico alcançava um valor constante de $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na recuperação térmica por hipertermia, foi verificado que o valor máximo do contraste térmico é atingido aos 880 s, de $0,79\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ maior em relação à termografia passiva. Na recuperação térmica por convecção natural o valor máximo do contraste térmico é atingido ao final da recuperação térmica, de $0,90\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo aproximadamente $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ maior em relação à termografia passiva. Apesar de a aplicação de hipertermia nessa etapa do estudo ter antecipado o pico de contraste térmico se comparada à recuperação por convecção natural, não se obteve um ganho significativo de contraste térmico, pois observa-se que quando a recuperação por hipertermia atinge seu valor máximo, o contraste da recuperação natural continua crescendo até o final da termografia infravermelha, sendo $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ maior em relação à hipertermia.

Ambas as recuperações térmicas iniciam com valores muito próximos, e é possível observar que antes de 850 s, a recuperação térmica por hipertermia é $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ maior em relação à natural, sendo uma diferença mínima. Portanto, o uso da hipertermia na recuperação térmica após um período de hipotermia, sob as condições apresentadas, não apresenta um ganho significativo de contraste térmico, ainda que se atinja o valor máximo em um menor tempo. Além disso, foi verificado que a aplicação de hipertermia após a hipotermia, influi em dano térmico permanente às células do tecido mamário, não devendo ser aplicada na medicina.

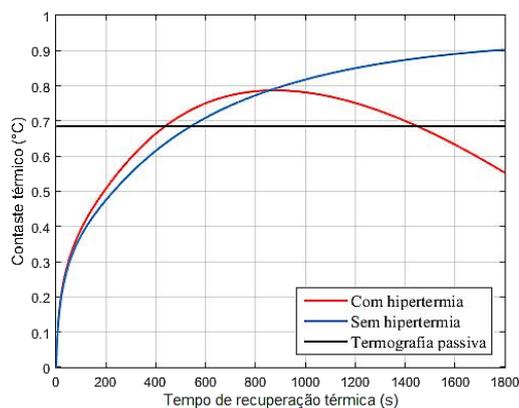


Figura 8. Comparação dos contrastes térmicos obtidos na recuperação térmica

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a simulação de uma mama com várias camadas por meio do software comercial COMSOL Multiphysics para um tumor de $0,8\text{ cm}$ de diâmetro próximo à superfície da pele. Uma análise em estado estacionário foi realizada para o mesmo modelo geométrico de mama saudável e com tumor, e posicionado um ponto na superfície externa da pele onde se observava uma maior temperatura com base nas coordenadas cartesianas do sistema. Primeiramente, foi realizada uma termografia passiva na superfície da mama e após essa etapa foi iniciada a hipotermia na superfície externa do tecido durante o intervalo de tempo de 0 a 100s, seguida de uma comparação de diferentes recuperações térmicas, onde a primeira ocorreu por convecção natural, e a segunda por aplicação de hipertermia na

superfície externa da pele. As temperaturas geradas no ponto selecionado foram obtidas e comparadas, onde observou-se que a superfície externa da mama, após 30 minutos de hipertermia, alcança temperatura aproximada de 52 °C, resultando em dano térmico permanente na superfície externa da pele, devendo ser realizada uma manipulação do fluxo de calor para que esse dano não ocorra, enquanto que por convecção natural, alcança até 35 °C. Em seguida, obteve-se o contraste térmico a partir das curvas de temperatura, avaliando a termografia passiva, e as recuperações térmicas em fluxo convectivo natural e por hipertermia. Finalmente, foi possível observar que o uso da hipertermia para recuperar termicamente o tecido após este ser resfriado na hipotermia não resultou em grandes ganhos de contraste térmico em relação a deixar o tecido se recuperar naturalmente, e que também ocasionou dano térmico permanente nas suas células. Portanto, conclui-se que a técnica é inviável sob as condições apresentadas, devendo-se prosseguir com o estudo de novas técnicas para o aumento do contraste térmico, e assim impulsionar a medicina para que a detecção de tumores em mama seja realizada de forma precoce.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Universidade Estadual do Maranhão e das agências de fomento ABCM, CNPq, CAPES e FAPEMA.

6. REFERÊNCIAS

- Barros, 2022. “Análise numérica comparativa do contraste térmico e dano térmico durante as condições de hipertermia constante e periódica em casos de câncer de mama” Em *XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - CREEM2022*. Santa Maria, Brasil.
- INCA, 2022. “O que é câncer?”. 14 Jul. 2022 <<https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/cancer/o-que-e-cancer>>.
- INCA, 2022. “Dados e números sobre câncer de mama”. Nov. 2022 <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files//media/document/dados_e_numeros_site_cancer_mama_novembro2022_0.pdf>.
- Korczak, 2020. “Numerical prediction of breast skin temperature based on thermographic and ultrasonographic data in healthy and cancerous breasts” *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. Dez. 2020 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0208521620301273?via%3Dihub>>.
- Migowski, 2020. “Recomendações para a detecção precoce de câncer durante a pandemia de Covid-19 em 2021” *Revista de APS*. 23 Mar. 2020 <<https://periodicos.ufjf.br/index.php/aps/article/view/33510/22826>>.
- Mukhmetov, 2020. “Thermal modeling for breast tumor detection using thermography” *International Journal of Thermal Sciences*. 1 Nov. 2020 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072920311583>>.
- Nusrat, 2022. “Breast cancer detection using deep learning: Datasets, methods, and challenges ahead” *Computers in Biology and Medicine*. 31 Ago. 2022 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010482522007818>>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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