v7.n8.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

REORGANIZAÇÃO ESPACIAL DO CAMPO ELÉTRICO EM *PHANTOM* HEPÁTICO HÍBRIDO MULTICAMADAS COM INCLUSÃO TUMORAL HETEROGÊNEA

SPATIAL REORGANIZATION OF THE ELECTRIC FIELD IN A MULTILAYER HYBRID HEPATIC PHANTOM WITH HETEROGENEOUS TUMOR INCLUSION

REORGANIZACIÓN ESPACIAL DEL CAMPO ELÉCTRICO EN UN PHANTOM HEPÁTICO HÍBRIDO MULTICAPA CON INCLUSIÓN TUMORAL HETEROGÉNEA

Geraldo Medeiros Junior[1]

e788690
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i8.8690

PUBLICADO: 08/2026

RESUMO

Tecidos tumorais apresentam comportamento dielétrico complexo decorrente de heterogeneidade condutiva, alterações estruturais de membrana e interações não lineares com campos elétricos externos. Embora estudos teóricos e computacionais indiquem que microambientes biologicamente heterogêneos possam promover a redistribuição espacial do campo elétrico, ainda existem poucos modelos experimentais capazes de reproduzir simultaneamente interfaces biológicas reais e heterogeneidade eletrofísica controlada. Neste estudo, foi desenvolvido um *phantom* hepático híbrido multicamadas contendo camadas sintéticas com propriedades elétricas ajustadas, tecido hepático bovino real, inclusão tumoral heterogênea multicamadas e meio intersticial derivado da exsudação natural do tecido. O sistema foi submetido à estimulação senoidal AC de 33 kHz associada a offset DC positivo, sendo realizado o mapeamento espacial do potencial elétrico por meio de uma malha de medição 5 × 5 utilizando microssonda invasiva diferencial. O *phantom* contendo inclusão tumoral apresentou redistribuição espacial do potencial elétrico, com concentração local de potencial e corrente elétrica na região correspondente à inclusão, quando comparado ao *phantom* controle. Observou-se ainda propagação elétrica estável durante a estimulação, favorecida pela continuidade dielétrica proporcionada pelo meio intersticial. Os resultados sugerem que inclusões tumorais multicamadas podem atuar como perturbadores dielétricos ativos em meios biologicamente heterogêneos, reforçando a plausibilidade experimental de mecanismos de redistribuição espacial do campo elétrico e contribuindo para o desenvolvimento de modelos bioeletrodinâmicos mais realistas.

PALAVRAS-CHAVE: Bioimpedância Espacial. *Phantom*. Eletrofísica Tumoral. Câncer.

ABSTRACT

Tumor tissues exhibit complex dielectric behavior resulting from conductive heterogeneity, structural membrane alterations, and nonlinear interactions with externally applied electric fields. Although theoretical and computational studies indicate that biologically heterogeneous microenvironments may promote spatial redistribution of the electric field, few experimental models are capable of simultaneously reproducing authentic biological interfaces and controlled electrophysical heterogeneity. In this study, a multilayer hybrid hepatic phantom was developed comprising synthetic layers with controlled electrical properties, real bovine liver tissue, a heterogeneous multilayer tumor inclusion, and an interstitial microenvironment derived from the natural exudation of the tissue.

[1] Biomédico pela Universidade Paulista - UNIP, habilitado em Patologia clínica, pós-graduado e habilitado em Hematologia e Biofotônica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The system was subjected to 33 kHz sinusoidal AC stimulation combined with a positive DC offset, and spatial mapping of the electrical potential was performed using a 5 × 5 measurement grid and a differential invasive microprobe. Compared with the control phantom, the model containing the tumor inclusion exhibited spatial redistribution of the electrical potential, with local concentration of both electrical potential and current in the region corresponding to the inclusion. Stable electrical propagation was also observed during stimulation, favored by the dielectric continuity provided by the interstitial medium. These findings suggest that multilayer tumor inclusions may act as active dielectric perturbators in biologically heterogeneous media, reinforcing the experimental plausibility of electric field redistribution mechanisms and contributing to the development of more realistic bioelectrodynamic models.

KEYWORDS: *Spatial Bioimpedance. Phantom. Tumor Electrophysics. Cancer.*

RESUMEN

Los tejidos tumorales presentan un comportamiento dieléctrico complejo derivado de la heterogeneidad conductiva, alteraciones estructurales de membrana e interacciones no lineales con campos eléctricos externos. Aunque los estudios teóricos y computacionales indican que los microambientes biológicamente heterogéneos pueden promover la redistribución espacial del campo eléctrico, todavía existen pocos modelos experimentales capaces de reproducir simultáneamente interfaces biológicas auténticas y heterogeneidad electrofísica controlada. En este estudio se desarrolló un phantom hepático híbrido multicapa compuesto por capas sintéticas con propiedades eléctricas controladas, tejido hepático bovino real, una inclusión tumoral multicapa heterogénea y un microambiente intersticial derivado de la exudación natural del tejido. El sistema fue sometido a estimulación sinusoidal de corriente alterna de 33 kHz asociada a un offset positivo de corriente continua, realizándose el mapeo espacial del potencial eléctrico mediante una malla de medición de 5 × 5 utilizando una microsonda invasiva diferencial. En comparación con el phantom de control, el modelo con inclusión tumoral presentó redistribución espacial del potencial eléctrico, con concentración local tanto del potencial como de la corriente eléctrica en la región correspondiente a la inclusión. Asimismo, se observó una propagación eléctrica estable durante la estimulación, favorecida por la continuidad dieléctrica proporcionada por el medio intersticial. Estos resultados sugieren que las inclusiones tumorales multicapa pueden actuar como perturbadores dieléctricos activos en medios biológicamente heterogéneos, reforzando la plausibilidad experimental de los mecanismos de redistribución espacial del campo eléctrico y contribuyendo al desarrollo de modelos bioelectrodinámicos más realistas.

PALABRAS CLAVE: *Bioimpedancia Espacial. Phantom, Electrofísica Tumoral. Cáncer.*

INTRODUÇÃO

A interação entre campos elétricos externos e sistemas biológicos heterogêneos constitui uma área emergente da bioengenharia e da biofísica aplicada, com aplicações em diagnóstico por bioimpedância, tomografia por impedância elétrica, eletroterapias e planejamento de procedimentos baseados em radiofrequência. O desempenho dessas técnicas depende diretamente da forma como o campo elétrico se distribui no interior dos tecidos, sendo influenciado por propriedades como condutividade elétrica, permissividade dielétrica, geometria anatômica e organização estrutural dos diferentes compartimentos biológicos (2,4,7).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Estudos experimentais e computacionais demonstram que tecidos tumorais apresentam heterogeneidade eletrofísica decorrente de alterações na composição celular, na organização da matriz extracelular, na vascularização e no conteúdo hídrico. Essas características modificam a distribuição espacial do campo elétrico e da densidade de corrente, produzindo padrões distintos daqueles observados em tecidos homogêneos (8–11).

Apesar dos avanços obtidos por meio de simulações numéricas e *phantoms* sintéticos, muitos modelos experimentais ainda apresentam limitações para representar simultaneamente a complexidade das interfaces biológicas reais e a heterogeneidade dielétrica característica do microambiente tumoral. Em especial, poucos modelos incorporam tecido biológico verdadeiro associado a inclusões multicamadas capazes de reproduzir gradientes estruturais e elétricos mais próximos das condições encontradas *in vivo* (12–15).

Nesse contexto, os *phantoms* híbridos representam uma alternativa promissora, pois permitem combinar materiais sintéticos com propriedades elétricas controladas e tecidos biológicos reais, possibilitando investigações experimentais mais próximas da realidade fisiológica sem as limitações inerentes aos estudos *in vivo*. Diferentemente dos modelos homogêneos geralmente empregados em estudos eletrofísicos, o *phantom* proposto incorpora simultaneamente tecido hepático bovino, uma inclusão tumoral multicamadas e um microambiente intersticial derivado da exsudação natural do tecido, aproximando o modelo experimental das condições eletrofísicas encontradas no fígado *in vivo* (16–18).

Diante dessa lacuna metodológica, o presente estudo descreve o desenvolvimento de um *phantom* hepático híbrido multicamadas contendo tecido hepático bovino, inclusão tumoral heterogênea multicamadas e meio intersticial derivado da exsudação natural do tecido, com o objetivo de investigar experimentalmente como a presença de uma inclusão tumoral heterogênea influencia a reorganização espacial do campo elétrico sob estimulação alternada de 33 kHz associada a *offset* positivo em corrente contínua.

REFERENCIAL TEÓRICO

A bioimpedância corresponde à oposição apresentada pelos tecidos biológicos à passagem de corrente elétrica alternada, sendo determinada pela interação entre componentes resistivos e capacitivos do sistema. Em tecidos biológicos, a resposta elétrica resulta da combinação entre a condutividade dos meios intra e extracelulares, as propriedades dielétricas das membranas celulares e a organização estrutural dos tecidos (3,6).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Diversos estudos demonstram que tecidos tumorais frequentemente apresentam propriedades elétricas distintas dos tecidos normais adjacentes. Alterações como aumento do conteúdo hídrico, edema intersticial, desorganização arquitetural, remodelamento de membranas celulares, necrose e redistribuição iônica podem modificar significativamente a condutividade elétrica efetiva e a permissividade dielétrica do microambiente tumoral. Como consequência, diferenças mensuráveis de impedância complexa podem ser observadas em diferentes faixas de frequência (7,10).

Essas alterações tornam os tumores sistemas eletrofisiologicamente heterogêneos, nos quais as propriedades elétricas variam espacialmente em função da composição celular, da vascularização, do grau de hidratação e da organização estrutural. Como consequência, a propagação da corrente elétrica e a distribuição espacial do campo elétrico tornam-se fortemente dependentes da arquitetura interna do tecido.

Heterogeneidade elétrica e redistribuição espacial do campo elétrico

A distribuição espacial do campo elétrico em sistemas biológicos depende diretamente das propriedades dielétricas e condutivas dos materiais que compõem o meio. Em estruturas relativamente homogêneas, as linhas de corrente tendem a seguir trajetórias previsíveis e a distribuição do potencial elétrico apresenta comportamento mais uniforme.

Entretanto, a presença de regiões com diferentes condutividades e permissividades promove deformação das equipotenciais, redirecionamento das linhas de corrente e redistribuição local da densidade de corrente elétrica. Em sistemas multicamadas contendo inclusões heterogêneas, diferenças locais de impedância podem resultar em regiões de concentração ou dispersão do campo elétrico (4,11).

Esse fenômeno tem sido descrito em estudos de bioimpedância, tomografia por impedância elétrica, radiofrequência médica e modelagem computacional de campos elétricos aplicados a tecidos biológicos. Consequentemente, estruturas que apresentam propriedades elétricas distintas do meio circundante podem atuar como perturbadores dielétricos capazes de reorganizar espacialmente a distribuição do potencial elétrico e da corrente elétrica (11).

Sob essas condições, a densidade de corrente elétrica em meios dielétricos pode ser expressa por:

$$\mathbf{J = (\sigma + j\omega\varepsilon)E}$$

onde:

• J representa a densidade de corrente elétrica;

• σ representa a condutividade elétrica;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

• ε representa a permissividade dielétrica;
• ω representa a frequência angular;
• E representa o campo elétrico aplicado.

Em meios heterogêneos, essa relação evidencia que tanto propriedades condutivas quanto dielétricas podem influenciar a distribuição espacial da corrente elétrica.

Polarização interfacial e teoria de Maxwell-Wagner

A teoria de Maxwell-Wagner descreve fenômenos de polarização que surgem em meios heterogêneos compostos por materiais com diferentes propriedades dielétricas e condutivas. Quando um campo elétrico externo é aplicado, cargas elétricas podem acumular-se nas interfaces entre materiais distintos, produzindo redistribuição local do potencial elétrico e modificando a propagação da corrente.

Em sistemas biológicos multicamadas, interfaces entre regiões com diferentes condutividades e permissividades podem favorecer acúmulo de cargas, reorganização espacial das equipotenciais e alterações locais da densidade de corrente. Esses fenômenos tornam-se particularmente relevantes em frequências nas quais efeitos capacitivos e dielétricos passam a contribuir significativamente para o comportamento global do sistema.

A impedância complexa de um sistema pode ser representada genericamente por:

$$Z = R + 1/(j\omega C)$$

onde:

• Z representa a impedância complexa;
• R representa a componente resistiva;
• C representa a componente capacitiva;
• ω representa a frequência angular;
• j representa a unidade imaginária.

Em sistemas multicamadas biologicamente heterogêneos, a resposta elétrica observada resulta da interação simultânea entre esses componentes distribuídos ao longo das diferentes interfaces presentes no meio. Dados experimentais obtidos em modelos multicamadas indicam que descontinuidades de condutividade podem promover redistribuição espacial do potencial elétrico, com redução do gradiente no interior de inclusões e intensificação em regiões de interface. Esses fenômenos são compatíveis com previsões derivadas da equação de condução elétrica em meios heterogêneos e reforçam a relevância da heterogeneidade dielétrica como determinante da organização espacial dos campos elétricos. No que concerne o presente estudo, essa fundamentação fornece suporte físico para a hipótese de que uma inclusão tumoral

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

heterogênea, inserida em um *phantom* hepático multicamadas contendo tecido biológico real, seja capaz de modificar localmente a distribuição do potencial elétrico e da corrente elétrica durante a estimulação por corrente alternada (9,11).

Campos elétricos alternados em meios biológicos heterogêneos

A interação entre campos elétricos alternados e tecidos biológicos depende fortemente da frequência aplicada. Em baixas frequências, as membranas celulares comportam-se predominantemente como barreiras capacitivas, restringindo a penetração da corrente elétrica nos compartimentos intracelulares. À medida que a frequência aumenta, ocorre redução progressiva da reatância capacitiva, favorecendo maior penetração do campo elétrico através das estruturas biológicas (1,3,6).

Na faixa de dezenas de quilohertz, os efeitos associados à heterogeneidade dielétrica e à polarização interfacial tornam-se particularmente relevantes. Nessa condição, diferenças locais de impedância podem promover redistribuição espacial da corrente elétrica e do potencial, especialmente em sistemas compostos por múltiplas camadas ou inclusões com propriedades elétricas distintas.

Além disso, a associação entre estimulação AC e offset DC pode introduzir assimetrias adicionais de polarização e distribuição de cargas, potencialmente ampliando os efeitos de reorganização espacial observados em meios biologicamente heterogêneos.

Essa dependência da frequência constitui um dos fundamentos para a utilização de estimulação senoidal em 33 kHz neste estudo, frequência escolhida por favorecer a manifestação de efeitos relacionados à heterogeneidade dielétrica e à polarização interfacial.

***Phantoms* híbridos biologicamente plausíveis**

Phantoms experimentais são amplamente utilizados na investigação de fenômenos elétricos, térmicos e eletromagnéticos em sistemas biológicos simulados. Tradicionalmente, esses modelos são construídos a partir de materiais sintéticos com propriedades físicas controladas, permitindo elevada reprodutibilidade experimental e ajuste preciso da condutividade elétrica (12,14).

Entretanto, materiais artificiais frequentemente apresentam limitações na reprodução de características estruturais encontradas em tecidos biológicos reais. Elementos como matriz extracelular nativa, compartimentalização hídrica, interfaces biológicas autênticas e heterogeneidade estrutural podem influenciar significativamente a propagação elétrica e dificilmente são reproduzidos por materiais sintéticos isoladamente (12).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Como alternativa, modelos híbridos combinam materiais artificiais e componentes biológicos reais em uma mesma arquitetura experimental (12,14). Essa abordagem permite preservar o controle das propriedades elétricas globais do sistema ao mesmo tempo em que introduz heterogeneidades estruturais e dielétricas adicionais.

Dessa forma, *phantoms* híbridos representam uma estratégia intermediária entre modelos totalmente sintéticos e sistemas biológicos vivos, possibilitando a investigação de fenômenos eletrofísicos em condições mais próximas das encontradas em ambientes fisiológicos complexos. A incorporação de tecido hepático bovino e de um microambiente intersticial derivado da exsudação natural do tecido amplia a plausibilidade biológica do modelo experimental proposto.

Aquisição digital de sinais e *aliasing*

A análise de sinais elétricos depende da correta aquisição digital dos dados experimentais. Quando a frequência de amostragem é insuficiente para representar adequadamente o sinal original, componentes espectrais podem ser reconstruídos incorretamente, produzindo um fenômeno conhecido como *aliasing* (15).

De acordo com o teorema de Nyquist-Shannon, a frequência de amostragem deve ser superior ao dobro da maior frequência presente no sinal para permitir sua reconstrução adequada. A observância desse critério é particularmente importante em estudos envolvendo análise espectral, identificação de harmônicos e avaliação da estabilidade de sinais elétricos de média e alta frequência (15).

A minimização do *aliasing* contribui para aumentar a confiabilidade das medições experimentais e reduz a possibilidade de que artefatos de aquisição sejam interpretados como alterações eletrofisiológicas do sistema experimental.

A fundamentação apresentada indica que a interação entre propriedades dielétricas, condutividade elétrica, polarização interfacial e organização estrutural pode modificar significativamente a distribuição espacial do campo elétrico em meios biologicamente heterogêneos. Entretanto, permanecem escassos modelos experimentais capazes de reproduzir simultaneamente tecido biológico real, heterogeneidade multicamadas e um microambiente intersticial biologicamente derivado. Nesse contexto, o *phantom* hepático híbrido desenvolvido neste estudo foi concebido para investigar experimentalmente a reorganização espacial do campo elétrico decorrente da heterogeneidade eletrofísica do modelo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CONTROLE EXPERIMENTAL, REPRODUTIBILIDADE E ANÁLISE DOS DADOS

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade das medições eletrofísicas, todos os experimentos foram conduzidos sob condições experimentais padronizadas. Antes de cada aquisição, o gerador de funções foi configurado para produzir sinal senoidal de 33 kHz associado a offset DC positivo, sendo os parâmetros elétricos conferidos por osciloscópio digital para verificação da frequência, amplitude e estabilidade do sinal aplicado ao sistema experimental.

Durante a montagem do *phantom*, o tecido hepático bovino permaneceu inicialmente refrigerado, sendo posteriormente mantido em temperatura ambiente até atingir equilíbrio térmico antes do início das medições. Esse procedimento teve como finalidade reduzir variações elétricas decorrentes de diferenças de temperatura entre os componentes do sistema experimental.

As medições do potencial elétrico foram realizadas de maneira sistemática utilizando malha espacial 5 × 5 previamente definida, mantendo-se a sequência de aquisição para os *phantom*s controle e tumoral. A posição dos eletrodos de estimulação, da microssonda diferencial e da inclusão tumoral foi mantida constante durante todas as etapas experimentais, reduzindo fontes de variabilidade relacionadas ao posicionamento instrumental.

Os dados obtidos foram organizados em mapas bidimensionais e tridimensionais para análise comparativa da distribuição espacial do potencial elétrico. Adicionalmente, foram comparadas as medidas de corrente elétrica obtidas no interior da inclusão tumoral e em regiões periféricas adjacentes, buscando identificar padrões compatíveis com redistribuição espacial do campo elétrico induzida pela heterogeneidade eletrofísica do modelo experimental.

Considerando o caráter exploratório do estudo e o objetivo de demonstrar a viabilidade experimental do *phantom* híbrido proposto, a análise concentrou-se na comparação descritiva dos padrões espaciais observados, complementada pela avaliação da estabilidade do sinal elétrico durante a aquisição e pela consistência interna das medições obtidas.

Objetivo geral

Investigar experimentalmente a reorganização espacial do campo elétrico em um *phantom* hepático híbrido multicamadas contendo tecido biológico real e inclusão tumoral heterogênea sob estimulação AC de alta frequência associada a *offset* DC positivo.

Objetivos específicos

• Desenvolver um *phantom* híbrido, ou seja, contendo camadas sintéticas com propriedades elétricas controladas e tecido hepático bovino real;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

• Construir uma inclusão tumoral multicamadas heterogênea capaz de introduzir descontinuidades dielétricas e condutivas no sistema experimental;

• Mapear espacialmente o potencial elétrico por meio de uma malha de medição 5×5 utilizando microssonda invasiva diferencial;

• Comparar a distribuição espacial do potencial elétrico entre o *phantom* controle e o *phantom* contendo inclusão tumoral;

• Avaliar a distribuição da corrente elétrica no interior da inclusão tumoral e em regiões adjacentes;

• Investigar a influência do meio líquido intersticial na estabilidade dielétrica e na propagação do sinal elétrico;

• Analisar evidências experimentais de redistribuição espacial do campo elétrico em um sistema biologicamente heterogêneo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Desenho experimental

Foi desenvolvido um *phantom* hepático híbrido multicamadas destinado à investigação da reorganização espacial do campo elétrico em um sistema biologicamente heterogêneo. O modelo combinou camadas sintéticas com propriedades elétricas controladas e tecido hepático bovino real, contendo uma inclusão tumoral heterogênea multicamadas inserida na região hepática.

Foram avaliadas duas condições experimentais: um *phantom* controle sem inclusão tumoral e outro contendo a inclusão heterogênea. Ambos os sistemas foram submetidos à mesma condição de estimulação elétrica, permitindo comparação direta da distribuição espacial do potencial elétrico e da corrente elétrica.

Arquitetura do *phantom* híbrido multicamadas

Foi desenvolvido um *phantom* híbrido com dimensões aproximadas de 10 cm × 6 cm, projetado para reproduzir gradientes espaciais de condutividade elétrica semelhantes aos encontrados em tecidos biológicos.

A estrutura foi organizada de forma simétrica em configuração tipo sanduíche, composta pelas seguintes camadas sucessivas:

• Pele (condutividade aproximada: 200 µS/cm; espessura aproximada: 3 mm);

• Tecido adiposo (condutividade aproximada: 100 µS/cm; espessura aproximada: 7 mm);

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

• Músculo (condutividade aproximada: 750 µS/cm; espessura aproximada: 12 mm);

• Tecido hepático bovino (condutividade aproximada: 1500 µS/cm; espessura aproximada: 20 mm);

• Músculo (condutividade aproximada: 750 µS/cm; espessura aproximada: 12 mm);

• Tecido adiposo (condutividade aproximada: 100 µS/cm; espessura aproximada: 7 mm);

• Pele (condutividade aproximada: 200 µS/cm; espessura aproximada: 3 mm).

Os valores de condutividade atribuídos às camadas sintéticas de pele, tecido adiposo e músculo foram definidos com base em faixas de condutividade elétrica descritas para os respectivos tecidos humanos na literatura especializada (3,6). O tecido hepático foi representado por fígado bovino *ex vivo*, utilizado como componente biológico real do sistema devido à sua elevada condutividade elétrica e à presença de heterogeneidades estruturais naturais (2,12). Dessa forma, o *phantom* foi concebido para reproduzir gradientes relativos de propriedades elétricas observados em tecidos biológicos, sem a pretensão de constituir uma réplica anatômica exata.

As camadas sintéticas foram preparadas utilizando matrizes de ágar com ajuste controlado da condutividade elétrica por adição de cloreto de sódio (NaCl). A montagem foi realizada de forma sequencial, permitindo gelificação parcial entre as camadas e favorecendo continuidade estrutural e elétrica nas interfaces.

Preparação das camadas sintéticas

As camadas artificiais foram produzidas a partir de soluções aquosas de ágar preparadas sob aquecimento até completa solubilização. A condutividade elétrica de cada camada foi ajustada mediante adição controlada de NaCl, buscando reproduzir gradientes relativos de condutividade compatíveis com os tecidos simulados.

Após homogeneização, as soluções foram vertidas sequencialmente no recipiente experimental. O resfriamento parcial entre etapas permitiu a formação de interfaces estáveis, reduzindo mistura excessiva entre as camadas adjacentes.

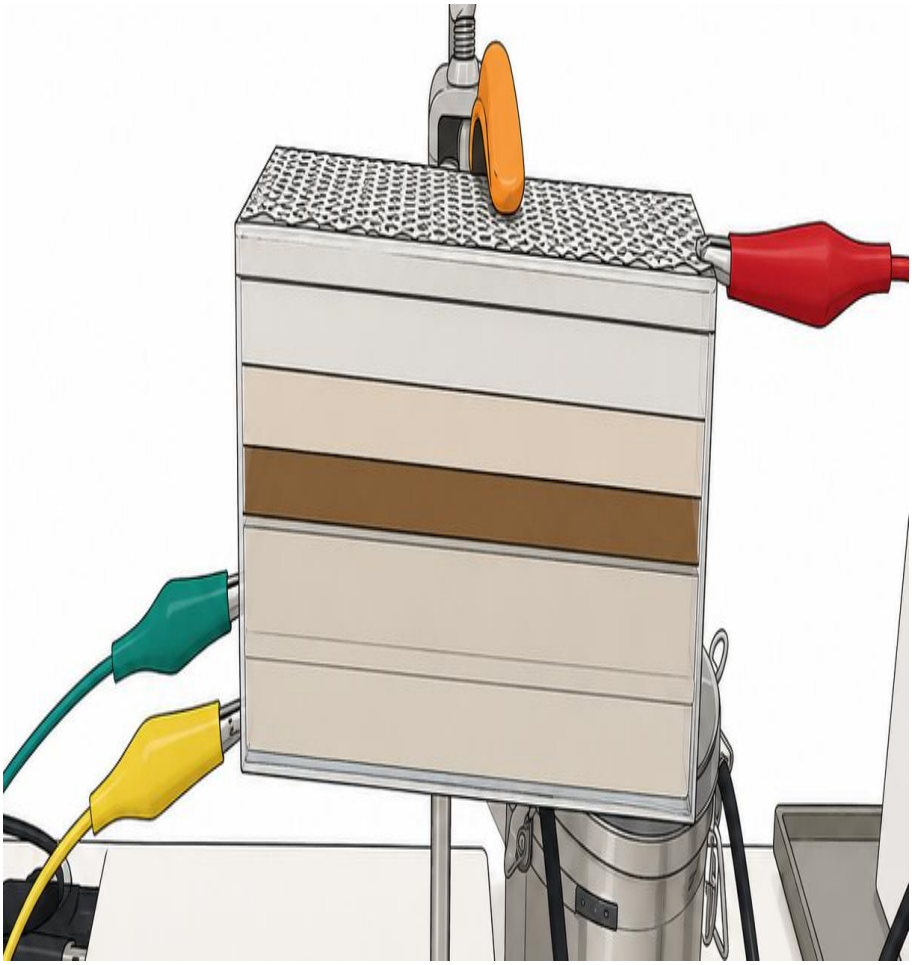
Incorporação do tecido hepático bovino

O tecido hepático bovino foi adquirido em estabelecimento comercial local poucas horas antes da realização dos experimentos. O material permaneceu refrigerado até o preparo do *phantom* e posteriormente foi mantido em temperatura ambiente (~25 °C) até a equalização térmica necessária para as medições elétricas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A região hepática foi posicionada na porção central da arquitetura multicamadas, constituindo o componente biológico real do *phantom* híbrido. A utilização do tecido bovino teve como objetivo introduzir heterogeneidades estruturais e dielétricas dificilmente reproduzíveis por materiais sintéticos isoladamente, incluindo compartimentalização hídrica, matriz extracelular nativa e interfaces biológicas autênticas (12,14).

Figura 1. Representação esquemática da configuração experimental do *phantom* hepático híbrido multicamadas, evidenciando as camadas estruturais do modelo, o tecido hepático bovino, a inclusão tumoral heterogênea, o microambiente intersticial derivado da exsudação natural do tecido, os eletrodos de estimulação e o eixo de propagação do campo elétrico.



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Construção da inclusão tumoral heterogênea multicamadas

A inclusão tumoral foi concebida como uma estrutura cilíndrica multicamadas concentricamente organizadas, contendo regiões com diferentes propriedades elétricas e dielétricas.

Etapa 1: O núcleo central foi preparado utilizando 2,5 mL de água deionizada, 0,05 g de ágar e 0,025 g de cloreto de sódio (NaCl), formando uma estrutura com aproximadamente 7,2 mm de diâmetro e 18 mm de comprimento. Essa região foi projetada para apresentar maior condutividade elétrica relativa em comparação às camadas periféricas.

Etapa 2: A zona intermediária de heterogeneidade elétrica foi composta por 4 mL de água deionizada, 0,06 g de ágar, 0,024 g de NaCl, 0,2 mL de glicerol, 0,10 mL de óleo vegetal e 0,04 g de sílica. Essa camada apresentava espessura radial aproximada de 3,5 mm, resultando em diâmetro total de aproximadamente 13,2 mm. A combinação desses materiais foi utilizada para introduzir heterogeneidade dielétrica local e múltiplas interfaces internas.

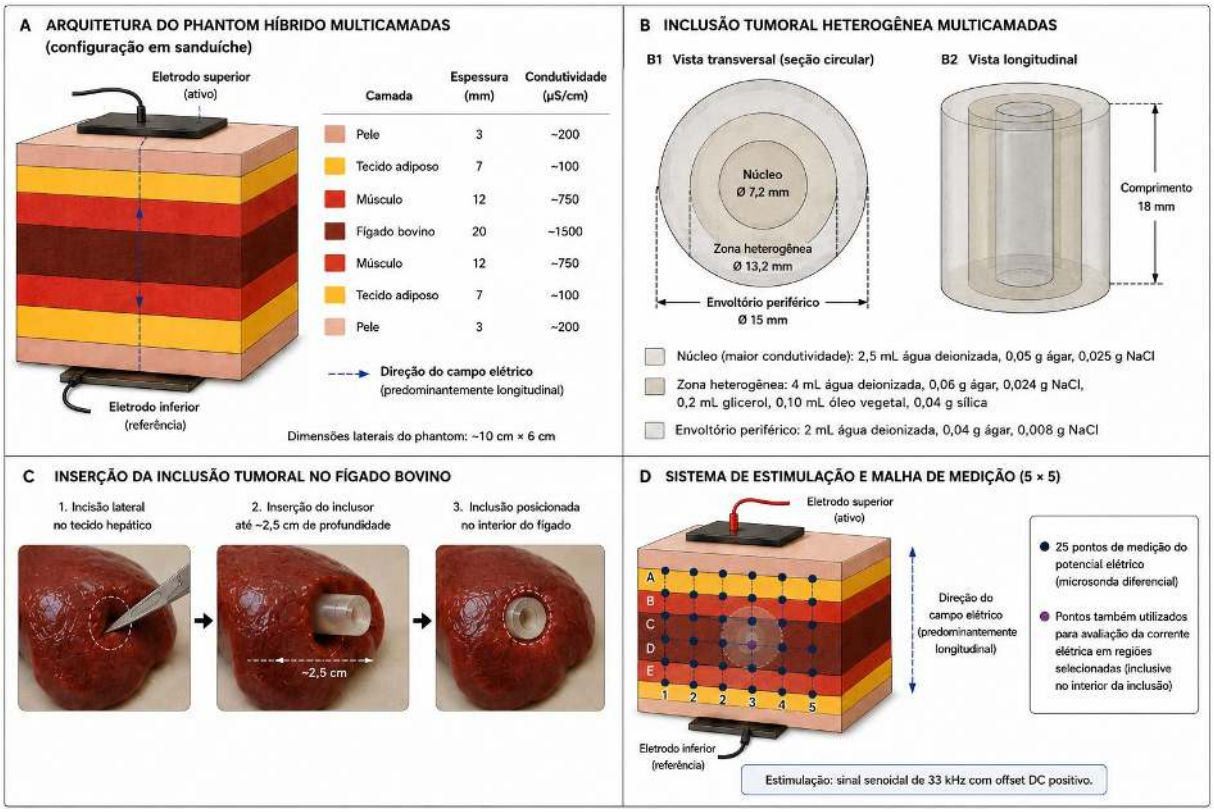
Etapa 3: O envoltório periférico foi confeccionado utilizando 2 mL de água deionizada, 0,04 g de ágar e 0,008 g de NaCl, formando uma camada externa com espessura radial aproximada de 0,8 mm e diâmetro final de cerca de 15 mm.

As três regiões foram montadas de forma concêntrica e sequencial durante o processo de gelificação, resultando em uma inclusão multicamadas com gradientes internos de composição e propriedades eletrofísicas.

A organização concêntrica em três compartimentos foi adotada com o objetivo de reproduzir, de forma simplificada, a heterogeneidade eletrofísica frequentemente observada em tumores sólidos (7,10). Em neoplasias reais, regiões centrais, intermediárias e periféricas podem apresentar diferenças significativas de hidratação, composição iônica, integridade estrutural e propriedades dielétricas. Embora a inclusão utilizada neste estudo não tenha sido concebida para reproduzir características histológicas específicas, sua arquitetura multicamadas buscou introduzir gradientes controlados de condutividade e permissividade elétrica, permitindo investigar experimentalmente a influência da heterogeneidade interna sobre a distribuição espacial do potencial elétrico e da corrente elétrica (9).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Desenho experimental do *phantom* hepático híbrido multicamadas



(A) Arquitetura do *phantom* em configuração simétrica tipo sanduíche, composta por camadas de pele, tecido adiposo, músculo e tecido hepático bovino. (B) Estrutura da inclusão tumoral heterogênea multicamadas em vistas transversal e longitudinal. (C) Inserção da inclusão tumoral no interior do tecido hepático bovino por incisão lateral, com posicionamento aproximado a 2,5 cm de profundidade. (D) Sistema de estimulação elétrica e malha de medição espacial 5 × 5 empregada para o mapeamento da distribuição espacial do potencial elétrico e avaliação da distribuição da corrente elétrica

Inserção da inclusão tumoral

Após a preparação da região hepática, foi realizada uma incisão lateral no tecido bovino para inserção da inclusão tumoral. O inclusor foi introduzido até aproximadamente 2,5 cm de profundidade em relação à superfície lateral do *phantom*, permanecendo completamente circundado pelo tecido hepático.

Essa configuração permitiu avaliar a influência da heterogeneidade elétrica local em uma estrutura posicionada profundamente no interior do sistema, reduzindo efeitos associados à proximidade das superfícies externas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Formação do meio intersticial

Durante a montagem e estabilização do *phantom* observou-se a formação espontânea de líquido intersticial derivado da exsudação natural do tecido hepático bovino. Esse líquido distribuiu-se entre as interfaces do sistema, contribuindo para a continuidade dielétrica entre os diferentes componentes do *phantom* e reduzindo descontinuidades elétricas abruptas.

Sistema de estimulação elétrica

O sistema foi estimulado por meio de gerador de funções configurado para produzir sinal senoidal de 33 kHz associado a offset DC positivo. A tensão aplicada foi monitorada por osciloscópio digital durante os experimentos.

A estimulação foi realizada utilizando eletrodos metálicos planos posicionados nas extremidades do *phantom*, estabelecendo um campo elétrico predominantemente longitudinal através da estrutura multicamadas.

Mapeamento espacial do potencial elétrico

A distribuição espacial do potencial elétrico foi avaliada utilizando uma malha de medição 5 × 5. As medições foram realizadas por meio de microssonda invasiva diferencial, permitindo registrar variações locais do potencial elétrico em diferentes regiões do *phantom*.

Os pontos de medição foram distribuídos de forma sistemática ao longo da superfície experimental, permitindo construção de mapas espaciais comparativos entre o *phantom* controle e outro contendo inclusão tumoral.

Avaliação da corrente elétrica

Além do potencial elétrico, foram realizadas medições de corrente elétrica em regiões periféricas e no interior da inclusão tumoral. Os valores obtidos foram utilizados para comparar a distribuição da corrente elétrica entre as diferentes regiões do sistema e avaliar possíveis efeitos de concentração associados à heterogeneidade eletrofísica da inclusão.

Aquisição de sinais e controle de *aliasing*

Os sinais elétricos foram monitorados utilizando osciloscópio digital com taxa de amostragem compatível com a frequência empregada nos experimentos. A aquisição foi realizada respeitando o critério de Nyquist-Shannon, reduzindo a possibilidade de *aliasing* e de reconstrução incorreta dos componentes espectrais do sinal.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A presença de harmônicos e distorções relevantes foi avaliada durante as medições, permitindo verificar a estabilidade da propagação elétrica no sistema experimental.

ANÁLISE DOS DADOS

Os dados de potencial elétrico e corrente elétrica foram organizados em planilhas eletrônicas e posteriormente representados por mapas bidimensionais (*hotspot*) e modelos tridimensionais de distribuição espacial. A análise concentrou-se na comparação qualitativa e quantitativa entre o *phantom* controle e o *phantom* contendo inclusão tumoral, considerando a distribuição espacial do potencial elétrico, a intensidade da corrente elétrica em regiões centrais e periféricas e a estabilidade do sinal durante a estimulação. Em razão do caráter exploratório desta investigação, os resultados foram interpretados segundo os princípios da bioimpedância e da teoria de Maxwell-Wagner, buscando identificar evidências experimentais compatíveis com redistribuição espacial do campo elétrico em um sistema biologicamente heterogêneo.

RESULTADOS

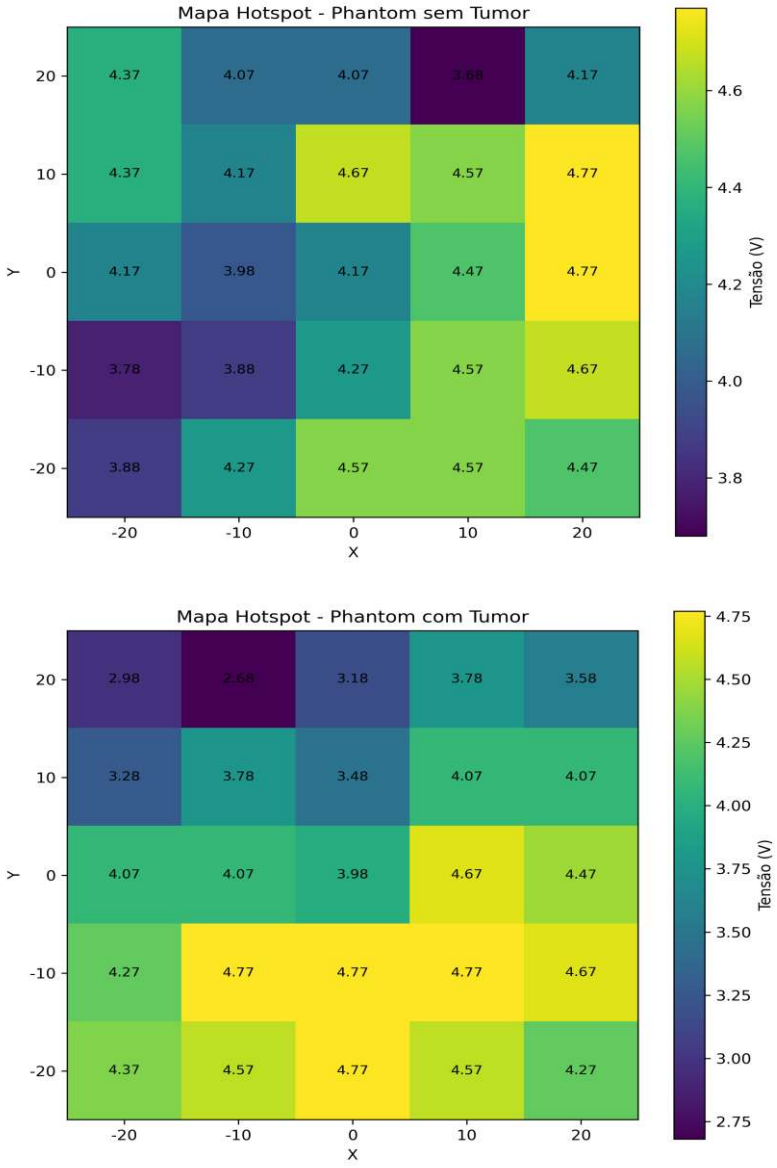
Distribuição espacial do potencial elétrico no *phantom* controle

O *phantom* controle apresentou distribuição espacial relativamente homogênea do potencial elétrico na malha de medição 5 × 5. Os valores observados variaram aproximadamente entre 3,68 V e 4,77 V, sem evidência de regiões localizadas de concentração elétrica.

A distribuição obtida foi compatível com a arquitetura multicamadas do sistema, sugerindo propagação elétrica relativamente uniforme na ausência de estruturas heterogêneas inseridas no interior da região hepática.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Mapas *hotspot* bidimensionais da distribuição espacial do potencial elétrico obtidos nos *phantoms* controle e tumoral, evidenciando as diferenças no padrão de organização do campo elétrico entre os dois modelos experimentais



Distribuição espacial do potencial elétrico no *phantom* com inclusão tumoral

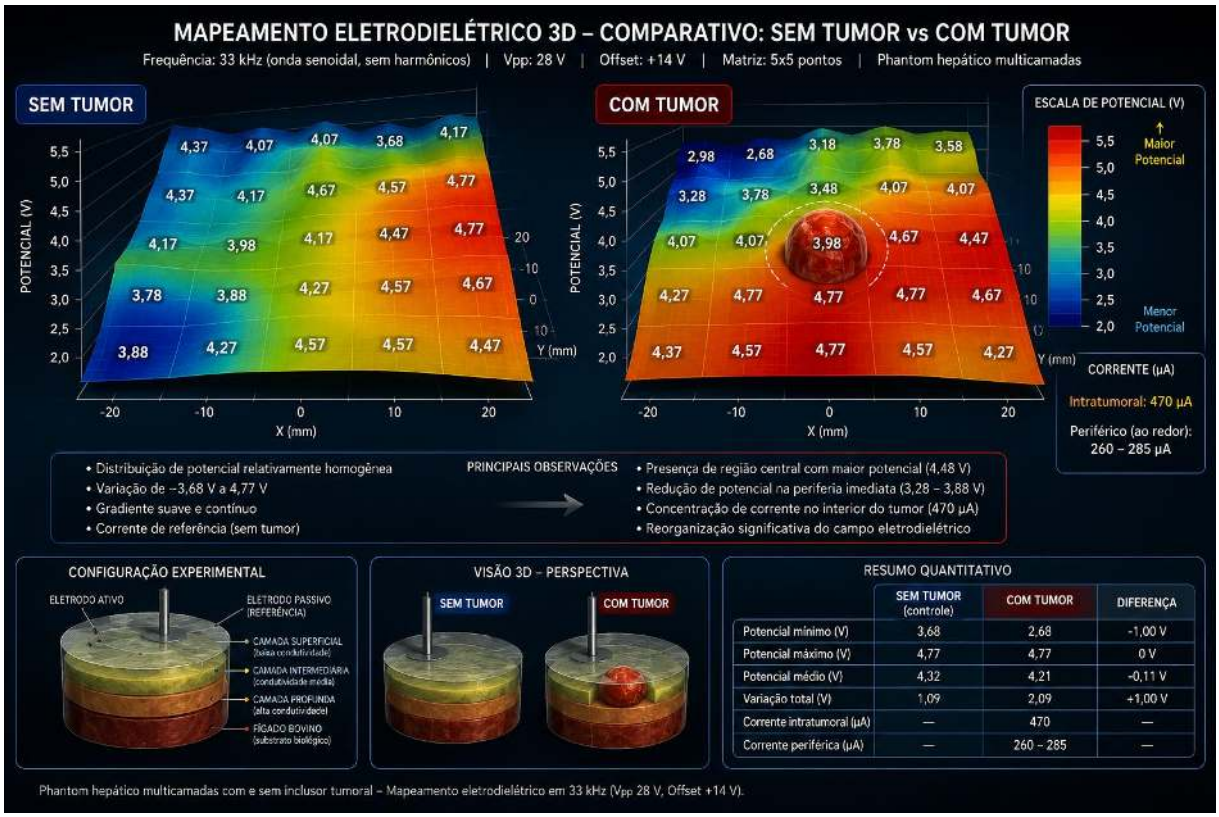
A introdução da inclusão tumoral heterogênea multicamadas promoveu alterações mensuráveis na distribuição espacial do potencial elétrico. Em comparação ao *phantom* controle,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

observou-se reorganização das regiões equipotenciais e surgimento de áreas de maior intensidade elétrica associadas à localização da inclusão.

Os mapas espaciais evidenciaram modificação da distribuição do potencial elétrico na região hepática, indicando influência da heterogeneidade eletrofísica introduzida pelo inclusor multicamadas.

Figura 4. Representação 3D do *phantom* controle evidenciando continuidade espacial do campo elétrico no sistema multicamadas



Potencial elétrico e corrente elétrica medidos na inclusão tumoral

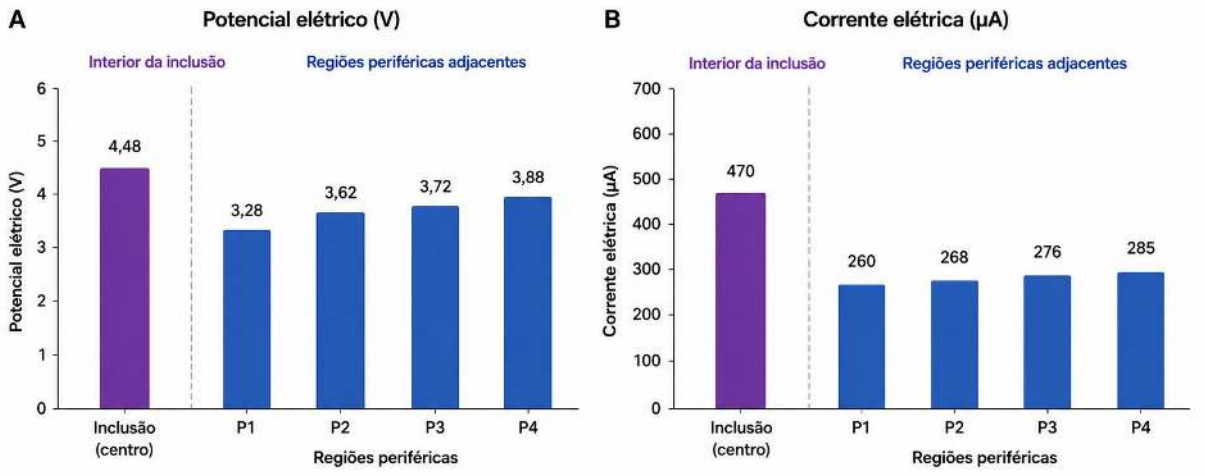
As medições realizadas no interior da inclusão tumoral demonstraram potencial elétrico aproximadamente igual a 4,48 V. Em contraste, as regiões periféricas adjacentes apresentaram valores compreendidos entre aproximadamente 3,28 V e 3,88 V.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

De forma semelhante, a corrente elétrica medida no interior da inclusão atingiu aproximadamente 470 µA, enquanto as regiões periféricas apresentaram valores entre 260 µA e 285 µA.

Esses resultados indicaram concentração local de potencial elétrico e corrente elétrica na região correspondente à inclusão heterogênea multicamadas.

Figura 5. Comparação do potencial elétrico (A) e da corrente elétrica (B) medidos no interior da inclusão tumoral e em regiões periféricas adjacentes do *phantom* hepático híbrido multicamadas



Potencial elétrico (V)	
Localização	Valor (V)
Inclusão (centro)	4,48
P1 (periferia)	3,28
P2 (periferia)	3,62
P3 (periferia)	3,72
P4 (periferia)	3,88

Corrente elétrica (µA)	
Localização	Valor (µA)
Inclusão (centro)	470
P1 (periferia)	260
P2 (periferia)	268
P3 (periferia)	276
P4 (periferia)	285

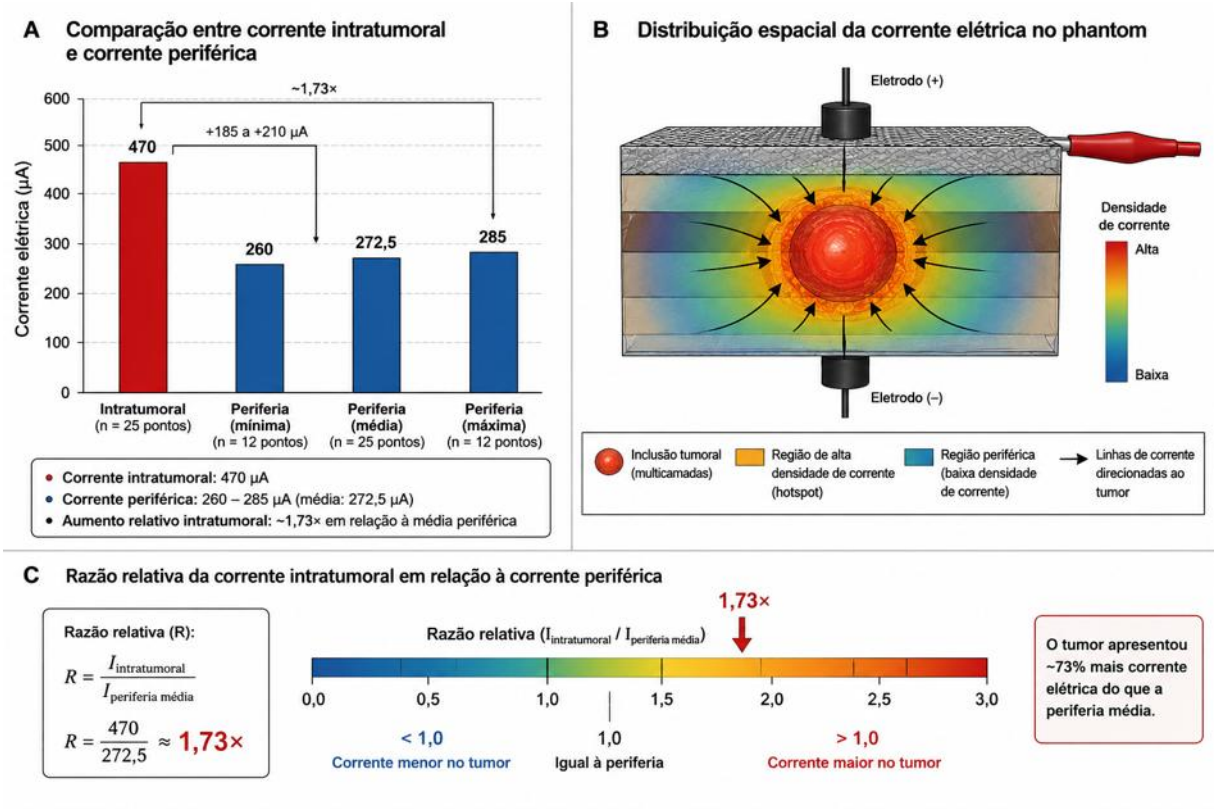
Avaliação da estabilidade do sinal elétrico

A análise do sinal elétrico por osciloscopia demonstrou forte acoplamento entre o sistema experimental e a fonte de estimulação, com amplitude observada próxima de 9,89 V.

Durante as medições, o sinal manteve frequência estável de 33 kHz, não sendo observados harmônicos significativos ou distorções relevantes. O comportamento registrado indicou propagação elétrica estável através da arquitetura multicamadas do *phantom* híbrido.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

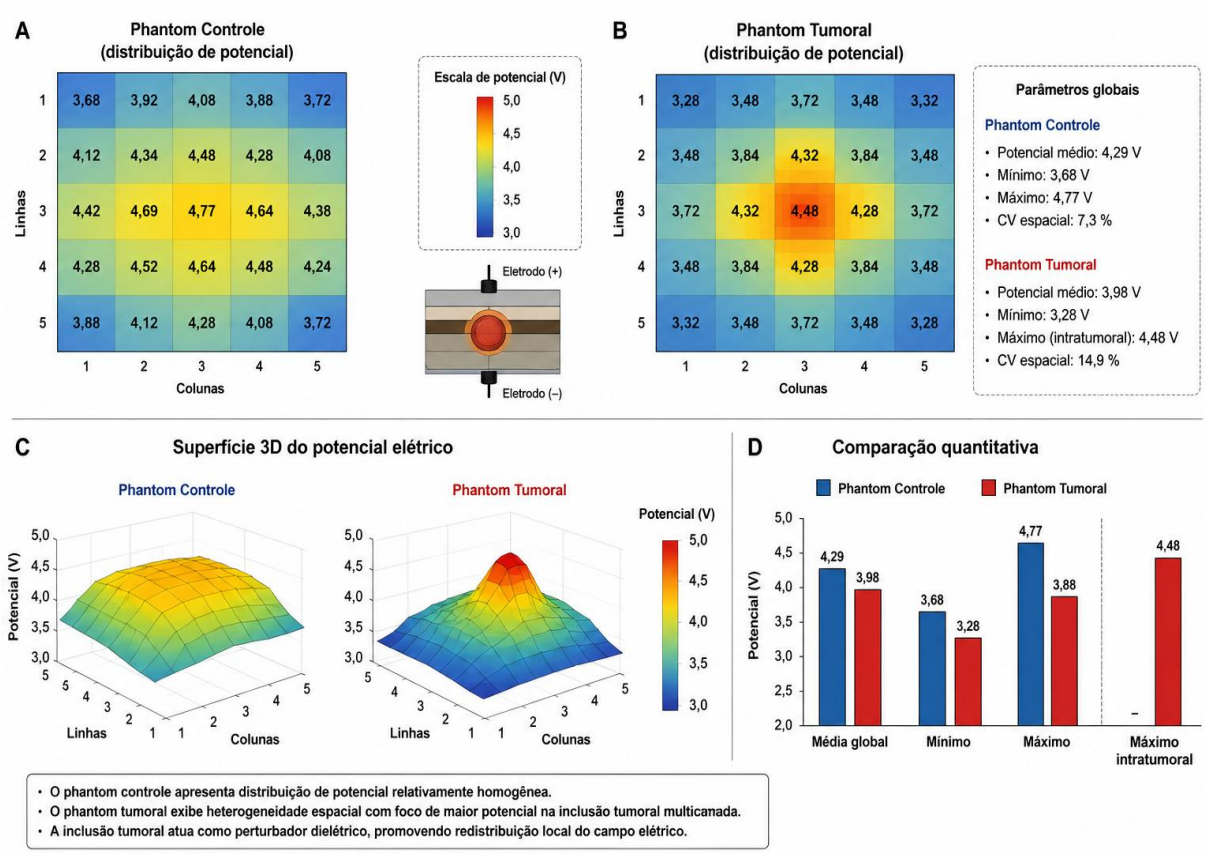
Figura 6. Comparação da corrente elétrica medida no interior da inclusão tumoral e em regiões periféricas do *phantom* hepático híbrido multicamadas



(A) Valores de corrente elétrica registrados na inclusão tumoral e em regiões periféricas adjacentes. (B) Representação esquemática da redistribuição espacial da corrente elétrica inferida a partir das medições experimentais. (C) Razão relativa entre a corrente elétrica medida no interior da inclusão e a corrente periférica média, evidenciando aumento local da corrente elétrica associado à presença da inclusão multicamadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 7. Comparativo da distribuição espacial de potencial entre *phantom* controle e *phantom* tumoral



DISCUSSÃO

Os resultados sugerem que a resposta elétrica observada em sistemas biologicamente heterogêneos depende não apenas dos parâmetros de estimulação, mas também da arquitetura espacial e das propriedades dielétricas locais do meio (4,11).

Os resultados observados neste estudo expandem evidências previamente obtidas em *phantoms* multicamadas sintéticas, nos quais a presença de heterogeneidades elétricas e diferenças geométricas já havia demonstrado capacidade de reorganizar espacialmente a distribuição do potencial elétrico (9). Enquanto estudos anteriores utilizaram estruturas integralmente sintéticas para investigar princípios físicos fundamentais da redistribuição do campo elétrico, o presente trabalho avança ao incorporar tecido hepático bovino real, interfaces

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

biológicas fusionadas e uma inclusão multicamadas concebida para reproduzir gradientes internos de condutividade observados em tumores sólidos. A concordância qualitativa entre os resultados fortalece a plausibilidade física dos mecanismos de reorganização espacial observados (9).

A comparação entre os dois modelos experimentais indicou que a simples presença de uma estrutura com propriedades elétricas distintas do meio circundante foi suficiente para alterar o padrão de propagação elétrica observado (9). O potencial elétrico medido no interior da inclusão tumoral foi superior aos valores registrados nas regiões periféricas adjacentes, enquanto a corrente elétrica apresentou aumento ainda mais pronunciado. Esses resultados sugerem que a arquitetura interna da inclusão favoreceu a concentração local da corrente elétrica e modificou a distribuição espacial das equipotenciais no interior do sistema.

Esse comportamento pode ser compreendido à luz dos princípios clássicos da bioimpedância e da teoria de Maxwell-Wagner (11). Em meios compostos por materiais com diferentes propriedades dielétricas e condutivas, as interfaces podem promover redistribuição local de cargas elétricas, alterando trajetórias preferenciais de condução e produzindo regiões de maior ou menor densidade de corrente (4,11). No presente estudo, a coexistência de múltiplas interfaces elétricas entre as camadas do *phantom* e entre os compartimentos da inclusão tumoral provavelmente contribuiu para os padrões observados de redistribuição espacial.

A própria arquitetura da inclusão tumoral pode ter desempenhado papel relevante nesse processo. A escolha de uma inclusão multicamadas foi motivada pela tentativa de representar, de forma simplificada, a heterogeneidade elétrica descrita em tumores sólidos, nos quais diferentes regiões podem apresentar propriedades dielétricas distintas em função de variações estruturais e bioquímicas (7,10). O núcleo central apresentou maior concentração relativa de eletrólitos, enquanto a zona intermediária incorporou materiais com características dielétricas distintas, incluindo glicerol, óleo vegetal e sílica. Essa organização produziu um sistema internamente heterogêneo capaz de introduzir gradientes locais de impedância e múltiplas interfaces de polarização.

A maior corrente elétrica observada no interior da inclusão é compatível com a hipótese de que regiões de menor impedância efetiva podem atuar como trajetórias preferenciais para a condução elétrica em meios heterogêneos. Embora o campo elétrico não tenha sido medido diretamente, as alterações observadas na distribuição espacial do potencial e da corrente são consistentes com processos de redistribuição espacial do campo elétrico no interior do sistema (4,11).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Outro aspecto relevante refere-se à utilização de um *phantom* híbrido contendo tecido hepático bovino real. Grande parte dos estudos experimentais emprega exclusivamente materiais sintéticos, o que oferece elevado controle experimental, porém reduz a representação de características estruturais presentes em tecidos biológicos (12,14). A incorporação do tecido hepático introduziu heterogeneidades adicionais relacionadas à matriz extracelular, compartimentalização hídrica e organização tecidual nativa. Embora não reproduza integralmente as condições fisiológicas encontradas *in vivo*, essa abordagem aproxima o sistema experimental de um ambiente biologicamente mais complexo.

A estabilidade observada durante a estimulação elétrica também merece destaque. O sinal manteve frequência constante de 33 kHz e não apresentou evidências relevantes de distorção ou geração de harmônicos detectáveis. Esse comportamento sugere que o *phantom* apresentou acoplamento elétrico adequado com a fonte de estimulação, permitindo que as diferenças observadas entre os grupos fossem predominantemente associadas às características estruturais do sistema e não a instabilidades instrumentais.

Os resultados obtidos não devem ser interpretados como representação direta do comportamento elétrico de tumores reais. A inclusão utilizada foi concebida para reproduzir heterogeneidade eletrofísica controlada e não para mimetizar integralmente a complexidade biológica tumoral. Aspectos como vascularização funcional, metabolismo celular, perfusão sanguínea, resposta inflamatória e dinâmica iônica não foram incorporados ao modelo experimental. Dessa forma, os achados devem ser compreendidos como evidências de fenômenos físicos observados em um sistema experimental controlado.

Entre as limitações do estudo destacam-se a utilização de tecido *ex vivo*, a ausência de perfusão biológica, o número limitado de pontos de medição espacial e a avaliação de uma única condição principal de frequência e estimulação elétrica. Estudos futuros poderão incorporar mapeamentos espaciais de maior resolução, múltiplas frequências de excitação, modelagem computacional complementar e inclusões contendo características bioquímicas adicionais.

Apesar dessas limitações, os resultados demonstram que um *phantom* hepático híbrido multicamadas contendo tecido biológico real e uma inclusão heterogênea concentricamente organizada é capaz de reproduzir fenômenos de redistribuição espacial do potencial elétrico e da corrente elétrica. Esses achados reforçam a utilidade de modelos híbridos para investigação experimental da interação entre heterogeneidade eletrofísica e propagação de campos elétricos em meios biologicamente complexos, contribuindo para o desenvolvimento de plataformas experimentais mais realistas para estudos de bioimpedância espacial e bioeletrodinâmica aplicada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido utilizando um *phantom* hepático híbrido multicamadas contendo tecido hepático bovino *ex vivo* e uma inclusão tumoral heterogênea artificial. Embora essa abordagem permita maior controle experimental e introduza características estruturais não reproduzidas por modelos exclusivamente sintéticos, ela não representa integralmente a complexidade biológica de tecidos vivos.

O modelo experimental não incorporou processos fisiológicos dinâmicos, incluindo perfusão sanguínea, metabolismo celular, atividade enzimática, resposta inflamatória, remodelamento tecidual ou mecanismos ativos de transporte iônico. Consequentemente, os resultados obtidos devem ser interpretados como representações de fenômenos eletrofísicos observados em um sistema experimental controlado e não como reprodução direta do comportamento elétrico de tumores in vivo.

Outra limitação refere-se à utilização de uma inclusão tumoral artificial projetada para introduzir heterogeneidade dielétrica e condutiva controlada. Embora a arquitetura multicamadas empregada permita investigar efeitos de redistribuição espacial do campo elétrico, ela não reproduz integralmente características histológicas, vasculares ou metabólicas encontradas em neoplasias reais.

O mapeamento espacial foi realizado por meio de uma malha discreta de medição 5 × 5, o que limita a resolução espacial das análises. Regiões intermediárias entre os pontos amostrados podem apresentar variações locais não detectadas pelo método empregado.

Além disso, os experimentos foram conduzidos utilizando uma única condição principal de estimulação elétrica, baseada em sinal senoidal de 33 kHz associado a *offset* DC positivo. Dessa forma, os resultados não permitem extrapolações diretas para outras frequências, amplitudes ou configurações de estimulação.

Por fim, embora os achados observados sejam compatíveis com mecanismos teóricos de redistribuição espacial do campo elétrico em meios heterogêneos, o estudo não incluiu modelagem numérica acoplada nem técnicas de imageamento elétrico capazes de reconstruir diretamente a distribuição tridimensional do campo elétrico no interior do *phantom*. Assim, as interpretações apresentadas baseiam-se nos parâmetros elétricos experimentalmente medidos e em sua consistência com princípios estabelecidos da bioimpedância e da eletrodinâmica em meios heterogêneos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução de uma inclusão tumoral heterogênea multicamadas em um *phantom* hepático híbrido contendo tecido biológico real promoveu alterações mensuráveis na distribuição espacial do potencial elétrico e da corrente elétrica. Em comparação ao *phantom* controle, observou-se aumento local desses parâmetros na região correspondente à inclusão, indicando reorganização espacial da condução elétrica em um meio biologicamente heterogêneo.

Os resultados sugerem que heterogeneidades eletrofísicas localizadas podem influenciar a distribuição espacial de parâmetros elétricos em sistemas multicamadas complexos. Além disso, o modelo híbrido desenvolvido demonstrou potencial como plataforma experimental para estudos de bioimpedância espacial e interação entre campos elétricos e meios biologicamente heterogêneos.

Estudos futuros envolvendo diferentes frequências de estimulação, maior resolução espacial e modelagem computacional complementar poderão ampliar a compreensão dos mecanismos associados à redistribuição espacial do campo elétrico observada neste trabalho (5,8,9).

DECLARAÇÕES ÉTICAS E USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Ferramentas de Inteligência Artificial foram utilizadas exclusivamente para a elaboração de ilustrações esquemáticas com finalidade de aprimoramento da clareza visual do manuscrito.

REFERÊNCIAS

1.Berkelmann L, Wurlitzer M, Kadow S, Schackert G, Temme A, Kirsch M, *et al.* Tumour-treating fields (TTFields): investigations on the mechanism of action by electromagnetic exposure of cells in telophase/cytokinesis. Sci Rep. 2019;9(1):7362. doi:10.1038/s41598-019-43621-9.

2.Buisson C, Le Bihan M, Larrieu JM, Dubois L, Lafon C, Chapelon JY, *et al.* Dielectric and biological characterization of liver tissue in a microwave ablation context. Sensors (Basel). 2023;23(7):3434. doi:10.3390/s23073434.

3.Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys Med Biol. 1996;41(11):2271-2293. doi:10.1088/0031-9155/41/11/003.

4.Guedert R, Schimpf PH, Pinto R, Hoss I, de Oliveira JPS. Biological dispersion in the time domain using finite element method. Sci Rep. 2023;13:19827. doi:10.1038/s41598-023-49828-1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

5.Medeiros Junior G. Modulação eletrofotônica do metabolismo tumoral: uma modelagem computacional e análise probabilística do espaço paramétrico. J Med Biosci Res. 2026;3(2):221-228. doi:10.70164/jmbr.v3i2.1171.

6.Kuang W, Nelson SO. Low-frequency dielectric properties of biological tissues: a review with some new insights. Trans ASAE. 1998;41(1):173-184.

7.Laufer S, Ivorra A, Reuter VE, Rubinsky B. Electrical impedance characterization of normal and cancerous human hepatic tissue. Physiol Meas. 2010;31(7):995-1009. doi:10.1088/0967-3334/31/7/009.

8.Medeiros Junior G. Instabilidade eletrometabólica tumoral induzida por campos elétricos exógenos e fotobiomodulação: um framework biofísico-teórico. RECISATEC Rev Cient Saúde Tecnol. 2026;6(1):e61410. doi:10.70187/recisatec.v6i1.410.

9.Medeiros Junior G. Heterogeneidade elétrica em tumores: evidência experimental da redistribuição do campo elétrico em *phantoms multicamadas e implicações para modelos eletrometabólicos. RECIMA21. 2026;7(6):e768339. doi:10.47820/recima21.v7i6.8339.*

10.O'Rourke AP, Lazebnik M, Bertram JM, Mullins J, Pearce JA, Hagness SC. Dielectric properties of human normal, malignant and cirrhotic liver tissue: in vivo and ex vivo measurements from 0.5 to 20 GHz. Phys Med Biol. 2007;52(15):4707-4719. doi:10.1088/0031-9155/52/15/022.

11.Seo JK, Kim HJ, Lee J, Woo EJ. Effective admittivity of biological tissues as a coefficient of the generalized Laplace equation. Inverse Probl Sci Eng. 2013;21(5):865-885. doi:10.1080/17415977.2012.727089.

12.Stauffer PR, Rossetto F, Prakash M, Neuman DG, Lee T. *Phantom* and animal tissues for modelling the electrical properties of human liver. Int J Hyperthermia. 2003;19(1):89-101. doi:10.1080/0265673021000017064.

13.Wenger C, Salvador R, Basser PJ, Miranda PC. The electric field distribution in the brain during TTFields therapy and its dependence on tissue properties. Phys Med Biol. 2015;60(11):1-15. doi:10.1088/0031-9155/60/11/1.

14.Yilmaz T, Karadag A, Cansiz G, Kaya M, Demir M, Kivrak H, *et al.* Multiclass classification of hepatic anomalies with dielectric properties: from *phantom* materials to rat hepatic tissues. Sensors (Basel). 2020;20(2):530. doi:10.3390/s20020530.

15.Shannon CE. Communication in the presence of noise. Proc IRE. 1949;37(1):10-21. doi:10.1109/JRPROC.1949.232969.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.